



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**

**Facultad de Arquitectura  
Instituto de Investigaciones Históricas  
FES Aragón**

---

**Ingeniería Arquitectónica y Diseños Fractales**

---

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN ARQUITECTURA  
En el campo de conocimiento de  
Diseño Arquitectónico**

**PRESENTA:**

**Ing. José Alberto Morales Ortiz**

**TUTOR/A PRINCIPAL**

**M. Perla Rafael Santa Ana Lozada  
Facultad de Arquitectura. UNAM**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

**Dra. Arq. Karina Contreras Castellanos  
Facultad de Arquitectura. UNAM**

**Dr. Ing. Arq. Juan Gerardo Oliva Salinas  
Centro de Investigaciones en Arquitectura,  
Urbanismo y Paisaje. Facultad de Arquitectura. UNAM**

**SINODALES**

**M. Arq. Sandra Belinda Socci Martínez  
Sin adscripción (cursando el Doctorado en Arquitectura UNAM.)**

**Dr. En Diseño. Arq. Alberto González Pozo  
Posgrado en Arquitectura. UNAM**

**Ciudad Universitaria, CDMX a marzo del 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA



*INGENIERÍA  
ARQUITECTÓNICA y  
DISEÑOS FRACTALES*

MAESTRIA EN  
ARQUITECTURA

Campo de conocimiento:  
DISEÑO  
ARQUITECTÓNICO

*Por Mi Raza Hablará El Espíritu...*

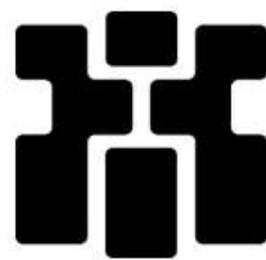
Ing. José Alberto Morales Ortiz



UNAM



FES Aragón



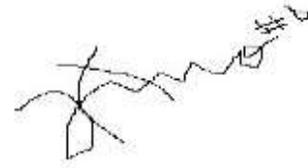
Instituto de  
Investigaciones Históricas

---

**Ingeniería Arquitectónica y Diseños Fractales**  
**Architectural Engineering and Fractal Design**

Contacto autor:

Correo electrónico: [joealbert\\_morales@hotmail.com](mailto:joealbert_morales@hotmail.com)



Ing. José Alberto Morales Ortiz

---

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco la experiencia de la Maestría en Arquitectura, a todos los que conforman la comunidad Universitaria y especialmente al Posgrado UNAM. A mi familia por su paciencia y creer en mí, a mi tutora la M. Perla Santa Ana, sus conocimientos y guía fueron una luz en el trabajo de tesis. Así como al Comité Tutor. Dra. Karina Contreras, su preocupación por la calidad del trabajo de maestría, me ayudo a resolver mis dudas y dar claridad a muchas de las ideas de la investigación, a través de sus correcciones y sugerencias fui encontrando la finalidad de esta tesis. Al Dr. Juan Gerardo Oliva, porque creyó en la investigación y siempre de manera emotiva, hizo observaciones puntuales. Con las cuales di solución a errores, que por no ser arquitecto, cometí al estudiar las obras de arquitectura en la investigación. Y a los sinodales: la primera etapa con la Dra. Dulce María Barrios, quien me hizo comprender que las cosas no se pueden hacer forzadas. Por eso en la investigación: se toca el tema del sentido humano de la arquitectura, dando difusión a la idea de 'arquitectura humana' de la que habla en sus seminarios. Al Dr. Alberto Gonzáles Pozo por recibirme en su hogar, desde la etapa en que me entreviste con usted, para pedirle fuera mi sinodal. Por sus sugerencias, comentarios y observaciones, todas muy puntuales, para que esta investigación se inclinara más hacia la arquitectura. Ofreciendo una aportación técnica diferente 'a todas las que hablan de este tema en la ciencia de la arquitectura'. Y en una segunda etapa, con la asignación de un nuevo sinodal, al Dr. Héctor Alain Allier por su tiempo y creer en el trabajo contribuyendo con señalamientos que favorecieron la culminación del trabajo de tesis. Gracias al Comité Académico, por la asignación de la M. Arq. Sandra Belinda Socci Martínez quien con su arrojo, contribuyó a completar el trabajo de investigación, para la presentación del examen: indispensable para el término de los trámites de grado. Y a los Profesores de la Maestría, también porque complementaron mis conocimientos y me acercaron este mundo hermoso de la arquitectura; del diseño arquitectónico y de los arquitectos...

DEDICATORIA

**A mi país, a mi universidad y a quienes tanto amo: los niños, mamá...**

<b>ÍNDICE:</b>	<b>Pág.</b>
<b>Prefacio</b>	<b>III-VI</b>
<b>1. <i>La Geometría Fractal y la Arquitectura</i></b>	
1.1    Introducción: un cuestionamiento de su entendimiento	<b>1</b>
1.2    El Fractal de Mandelbrot	<b>2</b>
1.3    Construcción Fractal con Geometría Clásica “The Koch Curve”	<b>4</b>
1.4    Consecuencia del uso Fractal en la Arquitectura	<b>15</b>
<b>2. <i>Ingeniería Arquitectónica</i></b>	
2.1    Introducción: métodos fractales para analizar y diseñar arquitectura	<b>41</b>
2.2    Arquitectura y el uso de las Matemáticas	<b>51</b>
2.3    Elementos Arquitectónicos y sus Dimensiones	<b>68</b>
<b>3. <i>Técnicas Fractales: tres dimensiones y auto similitud</i></b>	
3.1    Introducción: técnicas hechas a mano	<b>73</b>
3.2    Técnica 1. Tres Dimensiones Aplicadas a la Arquitectura	<b>73</b>
3.3    Técnica 2. Auto-similitud ‘Self Similarity’	<b>77</b>
<b>4. <i>Técnicas Fractales: Dimensión Fractal, Espacios y Uso de Materiales</i></b>	
4.1    Introducción: técnicas computacionales	<b>81</b>
4.2    Técnica 3. Espacios: Análisis de Dimensión Fractal	<b>87</b>
4.3    Técnica 4. Uso de Materiales: Formas Caóticas	<b>99</b>
<b>Conclusiones</b>	
–    Introducción: hallazgos	<b>112</b>
–    Repercusión en la Arquitectura Contemporánea	<b>118</b>
<b>Referencias</b>	<b>125</b>
<b>Apéndice:</b>	
–    Introducción: pruebas	<b>144</b>
–    Figuras en los acabados	<b>144</b>
–    Creación de un diagrama arquitectónico fractal	<b>146</b>
–    Superficies y estructuras (geometría y ensamblado por paneles)	<b>148</b>
–    Construcción con nodos	<b>150</b>

– Programación Arquitectónica Fractal (dinámica)	<b>154</b>
– Uso de Técnicas de Arquitectura Fractal	<b>161</b>

## Prefacio

El propósito de esta investigación, es desarrollar un estudio de la relación entre la geometría fractal y la arquitectura; primero se explica a grandes rasgos, que esta geometría – diferente a la de Euclides –, se compone por un proceso iterativo computacional; con lo que se pueden aproximar formas semejantes a las vistas en la naturaleza. Aunque se reconoce que en la arquitectura de todos los tiempos, ha existido una utilización de geometría, poseedora de cualidades fractales. La arquitectura diseñada y construida con geometría fractal, es diferenciable por la técnica: donde se utiliza la geometría fractal en el proceso de diseño arquitectónico y construcción, generando lo que se conoce como arquitectura fractal. Mientras que la arquitectura poseedora de cualidades fractales, anterior al descubrimiento de la geometría fractal, utiliza la geometría clásica de manera maestra. Con el conocimiento de la relación que se dio entre la geometría fractal y la arquitectura, se pretende ampliar el entendimiento de la arquitectura fractal. La cual, al igual que la geometría fractal, es computacional y se logra por medio de la ‘simulación’ (con números diferentes, obtenidos de manera aproximadamente aleatoria o ‘pseudo-aleatoria’). En diseño arquitectónico el uso de softwares avanzados, utilizan este proceso para construir y manejar formas nunca antes vistas en la arquitectura, incluso hechas con inteligencia artificial.

El caso de estudio de esta investigación, es la utilización de la geometría surgida del fractal de Mandelbrot; porque el científico hizo una relación entre su geometría fractal y la arquitectura. Los alcances del presente documento se desarrollaron en cuatro capítulos: **capítulo uno**, aquí se hace la revisión de los antecedentes, con el objetivo de familiarizarse con la manera en la que se llegó a analizar, diseñar y construir arquitectura con técnicas de geometría fractal. Viendo que el procedimiento matemático para construir un fractal es infinito, se puede sintetizar y poner un límite. Ya que la figura geométrica, se construye con la unión de una figura inicial e iteraciones de reproducciones idénticas de la misma, pero en diferentes escalas (todas las reproducciones son de un tamaño proporcional a una fracción, el tamaño de la figura inicial). El descubrimiento de la geometría fractal se dio en el año de 1977, por el matemático Benoit Mandelbrot, quien publicó su investigación utilizando por primera vez la palabra fractal en su libro<sup>1</sup>, ‘*Fractal: Forma, Oportunidad y Dimensión*’; ahí explica de manera visual, con figuras geométricas, que son las formas fractales.

---

<sup>1</sup> (Mandelbrot, Fractals: Form, Chance, and Dimension)

Se habla del momento del nacimiento, de la relación entre la geometría fractal y la arquitectura<sup>2</sup> y de la experiencia al empezar a usar esta geometría, en diseños arquitectónicos: “Desde principios de los años ochenta, un creciente número de escolares y diseñadores reconocían la influencia de los fractales en la arquitectura...”<sup>3</sup> Se reconoce que el estado del arte de la arquitectura fractal; es que la existencia del *diseño arquitectónico fractal* y la *construcción de arquitectura fractal*, son un aprovechamiento. Al igual que el análisis del cálculo de la dimensión fractal, con el que se han analizado las construcciones geométricas, de edificios de épocas anteriores a la geometría fractal. Demostrando con esta técnica, la presencia de detalles construidos con cualidad fractal, hasta llegar a las formas caóticas o complejas. Entonces la primera relación formal entre la geometría fractal y la arquitectura son las observaciones de Mandelbrot; quien declaró hay una arquitectura de formas variadas con cualidades fractales; y otra que es ortogonal y sin ornamento que no posee esta cualidad. La segunda relación importante, es de que luego del descubrimiento de Mandelbrot.

El arquitecto Peter Eisenman: “En contraste con los códigos proscritos de la arquitectura clásica y de la geometría cartesiana moderna, hoy el uso generativo de geometrías puede entenderse en el contexto de desarrollos en nuestro entendimiento de la naturaleza y los sistemas biológicos”.<sup>4</sup> En 1978 utilizó en su diseño la técnica de auto similitud ‘*Self Similarity*’, de la geometría fractal, logrando un aprovechamiento arquitectónico fractal.<sup>5</sup> La construcción de una forma arquitectónica, con la unión de una figura inicial y sus reproducciones. En consecuencia creo el primer diagrama arquitectónico, construido con la

---

<sup>2</sup> “The rise of fractal architecture: 1978-1988”. (J. M. Ostwald. *Fractal Architecture: Late Twentieth Century Connections Between Architecture and Fractal Geometry* 74). Ostwald, Michael, J. “Fractal Architecture: Late Twentieth Century Connections Between Architecture and Fractal Geometry”. *Nexus Network Journal*. Vol 3, No. 1 (2001): 73-83.

<sup>3</sup> “Since the early 1980s, a growing number of scholars and designers have acknowledged the influence of fractals upon architecture”. (J. M. Ostwald 23).

<sup>4</sup> “In contrast to the proscriptive codes of classical architecture and the Cartesian geometry of modernism, the generative use of geometries today can be understood in the context of developments in our understanding of nature and biological systems”. (Eisenman 53).

<sup>5</sup> Respecto a la casa 11<sup>a</sup>, se recabaron antecedentes provenientes de diferentes investigaciones. Una de ellas es la de la revista del COAM (colegio oficial de arquitectos de Madrid). “La geometría euclidiana no puede seguir expresando, actualmente, las incertidumbres y las relatividades del mundo moderno; por el contrario, la topología las abarca mejor gracias a sus distancias relativas y a sus superficies continuas e infinitas. Esto es lo que escribe P. Eisenman a propósito de esta casa que parece más una reflexión sobre el hombre y el espacio contemporáneo que un proyecto de albergue”. (Eisenman “Casa XI” 35). Eisenman, Peter. “Casa XI”. No. 218. May-Jun 1979. Revista arquitectura 100 años. COAM.org. 28 Feb. 2022 <<https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1977-1980/docs/revista-articulos/revista-arquitectura-1979-n218-pag34-36.pdf>>. Pp. 34-36

técnica fractal; por lo cual se califica, ya no solo un avance en la ciencia de las matemáticas, que habla de la presencia de geometría fractal en la arquitectura; sino de una técnica de diseño arquitectónico. A partir de este punto el arquitecto tiene nuevas herramientas de diseño arquitectónico, diferentes a las utilizadas con la geometría clásica. Cronológicamente en el tiempo el término ‘*arquitectura fractal*’ es un aprovechamiento, el cual abarca el diseño, la construcción y también el análisis. Respecto al análisis este surge con el libro ‘*La Geometría Fractal de la Naturaleza*’ del año de 1982. Donde Mandelbrot demuestra su teoría matemáticamente (una entre muchas otras cosas que hizo, fue aproximar matemáticamente los puntos que reproducían gráficamente la formas de las bahías de las líneas costeras de Gran Bretaña).<sup>6</sup>

Una vez que se explica el modo de hacer el cálculo de la dimensión fractal, el catedrático en arquitectura Carl Bovil, lo utilizó para medir aspectos geométricos de algunos edificios. Luego estas retículas de dimensión fractal<sup>7</sup> se utilizaron por otro catedrático en arquitectura, Michael J. Ostwald, para medir la arquitectura de muchos otros edificios.<sup>8</sup> Finalmente surgió la utilización de formas aleatorias llamadas complejas o caóticas (conocidas así; debido a que son irregulares y son difíciles de reproducir; y solo fueron posibles de construirse con el uso de la computadora). Aunque ya se habían construido formas complejas en el pasado, por ejemplo las del expresionismo.<sup>9</sup> Las formas complejas de edificios contemporáneos, por ejemplo, El Guggenheim de Bilbao: “El efecto Bilbao... Frank describió el edificio como la emulación de una flor que brota en el centro del edificio, con una nave que se extiende hacia afuera de uno de los lados”.<sup>10</sup> Del año de 1994, diseñado y construido gracias a un programa de la industria aeronáutica, con el uso de las computadoras. Logrando así formas arquitectónicas que antes eran imposibles de realizar; con materiales nunca antes utilizados; y que hasta antes de este tiempo eran impensables.

---

<sup>6</sup> “How long is the coast of Britain?” (Mandelbrot, *The Fractal Geometry of the Nature* 31)

<sup>7</sup> (Bovil, *Fractal Geometry in Architecture and Design*)

<sup>8</sup> (J. M. Ostwald)

<sup>9</sup> “La torre de Einstein de Mendelsohn... obras como el Goetheanum de Rudolf Steiner... Pero después de la Segunda Guerra Mundial... Le Corbusier dijo... vamos a buscar lo que llamaba los objetos a reacción poética ‘Le objet á réaction poétique’... como en Ronchamp... era un objeto a reacción poética... La escultura habitada de André Bloc... Frank Lloyd Wright... para el museo Guggenheim de New York... La terminal TWA de Eero Saarinen... En Berlín... La gran Philharmoniker... La Ópera de Sidney...” Fundación Juan March. “El Guggenheim de Bilbao: arquitectura y espectáculo | Luis Fernández-Galiano”. 5 May 2016. [Youtube](https://youtu.be/rBLnqIbdWdk). 13 Mar 2022 <<https://youtu.be/rBLnqIbdWdk>>

<sup>10</sup> “The Bilbao Effect... Frank described the building as emulating a budding flower in the center with a ship extending out to the one side”. (Smith 105-112).

Finalmente se enlistan a manera de resumen, las cuatro relaciones encontradas entre la geometría fractal y la arquitectura fractal, aportando un cambio al estado del arte. Enlistando estos cuatro momentos, sintetizando la experiencia técnica, de la *ingeniería arquitectónica para diseños fractales*. Luego en el **capítulo dos** se define, con apoyo de la proporción aurea (el número  $\Phi = \varphi = 1.618$  aproximado con la serie de Fibonacci), un método para comprobar la utilización de cada una de las teorías. La exhaustión geométrica y la división de segmentos, se realizan con el apoyo de celdas nombradas *paneles de Fibonacci*. Utilizados en la lectura y análisis geométrico de la arquitectura fractal, aunque la lectura de la arquitectura se puede realizar de muchas formas, según Eisenman en '*From Index to Codex*':

“Históricamente, las villas de Palladio se han leído de muchas maneras. Una, propuesta por el mismo Palladio, es un análisis de proporciones del tamaño de una habitación... Otras lecturas ven las villas como variaciones de un cubo ideal... Pero todavía hay otras formas de leer a Palladio que no tienen relación con las proporciones de habitaciones o la geometría ideal de un cuadrado... Una condición virtual en Palladio empieza desde una secuencia simétrica de espacios, que, leídos de adelante hacia atrás, pueden codificarse A-B-C-B-A”.<sup>11</sup>

El tema central es que la arquitectura está hecha, a diferencia de otras artes, para el ser humano y sus dimensiones: “Durante los últimos 40 años los teóricos de la arquitectura moderna (exceptuando algunas veces a Wright y Le Corbusier) se enfocaron en el espacio como un ingrediente esencial, que separa a la arquitectura de la pintura, escultura y literatura”.<sup>12</sup> Finalmente en el **capítulo tres** se utilizan las dos primeras teorías, para analizar algunos edificios fractales. Mientras que en el **capítulo cuatro**, se utilizan las retículas de dimensión fractal y los *paneles de Fibonacci* para construir un diagrama y finalmente se analizan obras de arquitectura, con formas caóticas o complejas. Las conclusiones dan respuesta a la hipótesis de: ‘si el uso de la geometría fractal en la arquitectura y en el diseño arquitectónico, implica un cambio, entonces puede ser significativo’.

---

<sup>11</sup> Historically, Palladian villas have been read in several ways. One, proposed by Palladio himself, is a proportion analysis of the size of a room... Other readings look at the villas as variation from an ideal cube... But there are still other ways of reading Palladio that have no relation to the proportions of rooms or the ideal geometry of a square... A virtual condition in Palladio begins from a symmetrical sequence of spaces, which, reading from front to back, can be coded A-B-C-B-A... (Eisenman 46).

<sup>12</sup> “Architecture as space. Architects have been bewitched by a single element of the Italian landscape: the piazza. Its traditional, pedestrian scaled, and intricately enclosed space is easier to like than the spatial sprawl of Route 66 and Los Angeles. Architects have been brought up on Space, and enclosed space is the easiest to handle. During the last 40 years theorists of Modern architecture (Wright and Le Corbusier sometimes excepted) have focused on space as essential ingredient that separates architecture from painting, sculpture, and literature. (R. D. Venturi 6-7).

## C1. La Geometría Fractal y la Arquitectura

**1.1 Introducción.** En este capítulo se exponen los antecedentes más representativos que se encontraron, donde se relaciona a la arquitectura con la geometría fractal y algunos de los detalles, dados en ese contexto histórico. Se buscó de manera discreta en libros, evidencias que hablaran de la geometría fractal y la arquitectura. Sin embargo antes de hablar de esta relación, hay que explicar la geometría fractal y el fractal de Mandelbrot, pues además de ser la base técnica de esta investigación, es esta teoría matemática la que originó el descubrimiento de la geometría fractal. Se considera importante entender la parte matemática de esta geometría, para comprender porque se reconoce a cierto tipo de arquitectura poseedora de características fractales (otros campos profesionales también tienen elementos fractales, los circuitos en la electrónica, por ejemplo). Benoit Mandelbrot en su libro<sup>13</sup> advierte de las implicaciones de la geometría fractal, haciendo notar que la geometría que se conocía hasta su época, era muy limitada para describir las formas de las nubes – que no son esferas –, de las montañas – que no son conos –, de las costas – que no son círculos –...

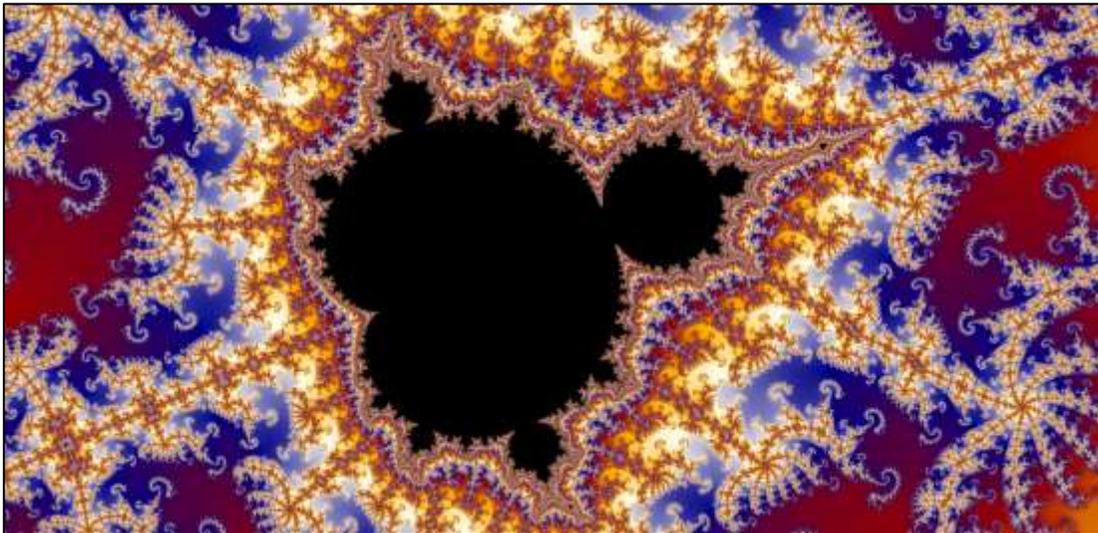


Fig. 1. La dimensión del Fractal. Imagen.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> “Until Mandelbrot developed the concept of fractal geometry in the 1960’s and 70’s, most mathematicians believed this irregular shapes were too fragmented and amorphous to be described mathematically... Mandelbrot describes how geometric patterns relate to every aspect of the physical world around us” (Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance, and Dimension*). “Hasta que Mandelbrot desarrolló el concepto de geometría fractal en los años 1960’s y 70’s, la mayoría de matemáticos creían que esta formas irregulares eran demasiado fragmentadas y amorfas para ser descritas matemáticamente”. (Trad. Propia, leyenda parte trasera de la pasta)

<sup>14</sup> Mandelbrot, Mandala. “Fractal de Mandelbrot”. 20 Jun. 2012. [WordPress.com](https://ordinarycreativity.wordpress.com/2012/06/20/mandelbrot-mandala/). 15 Sep. 2020 <<https://ordinarycreativity.wordpress.com/2012/06/20/mandelbrot-mandala/>>

**1.2 El fractal de Mandelbrot.** La representación matemática de este fractal, se da a partir de un proceso iterativo computacional, donde se prueban valores aleatorios que oscilan dentro de un intervalo. La figura se compone a partir de la ecuación a:  $\{Z_{n+1} = Z_n^2 + C\}$  de la cual resulta geoméricamente la figura. El fractal representa la geometría fractal de Mandelbrot el científico que la descubrió, pero además representa la primera relación entre la geometría fractal y la arquitectura. Pues el científico no dejando cabos sueltos, hizo relaciones y observaciones, acerca de ejemplos de otros campos disciplinarios en donde hay formas geométricas fractales. Entre ellos habló de la arquitectura, distinguiendo la que es poseedora de cualidades fractales y la que no los tiene. En el caso geométrico, la figura se compone de millones de iteraciones de la ecuación del fractal.

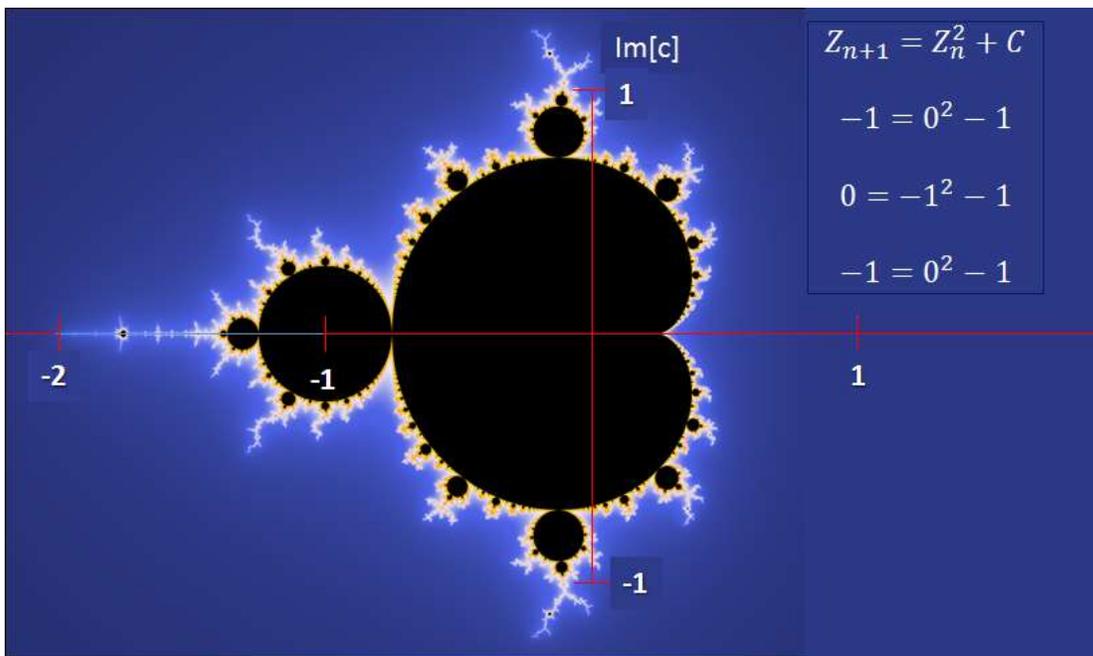


Fig. 2. “La ecuación de Mandelbrot”. Imagen.<sup>15</sup>

Al empezar la iteración se iguala con cero ‘ $Z = 0$ ’, luego se realizan más iteraciones, de las cuales: los resultados son los puntos con los que se traza la figura. En las investigaciones y análisis referentes al estudio de su comportamiento, se sabe que el conjunto solo se forma alrededor de ciertos números. Al ver la secuencia de la ecuación cuando  $C = I$  esta se comporta creciendo en magnitud rápidamente, pasando de uno a dos luego a cinco, veintiséis y así sigue aumentando de valor rápidamente a esto se le llama “explosión”. Que como se explicó anteriormente, es cuando los números se vuelven tan inmensos, que no tienen

<sup>15</sup> (Veritasium. “This equation will change how you see the world (the logistic map)”).

representación gráfica en la computadora. Se dice que tienden al infinito, entonces el valor tomado del número “1” no pertenece al conjunto de Mandelbrot, es decir no está en su dominio. Por el contrario, si el número permanece finito en múltiples iteraciones, si pertenece al conjunto de Mandelbrot. Así sucede con el valor “ $C = -1$ ” que es parte del conjunto:

Cuando  $\rightarrow C = 1$

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + C$$

$$1 = 0^2 + 1$$

$$2 = 1^2 - 1$$

$$5 = 2^2 + 1$$

$$26 = 5^2 + 1$$

Cuando  $\rightarrow C = -1$

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + C$$

$$-1 = 0^2 - 1$$

$$0 = -1^2 - 1$$

$$-1 = 0^2 - 1$$

Con la ecuación se puede ver, que mientras una explota en valores creciendo de manera exponencial, lo cual se muestra en su última iteración. La cual tiene un valor de veinticinco más uno. Esto puede verse gráficamente con una curva exponencial, mientras tanto en la otra prueba, se pudo ver que las soluciones se mantienen oscilando en el intervalo  $\{-1, 0\}$  (esta condición es la que se busca en los valores para que pertenezcan al conjunto). En esta investigación solo se muestran estas dos soluciones, para argumentar la explicación que se está dando, acerca de la manera en que se construye el fractal y así conocer los valores que son solución de la ecuación. Los cuales están dentro del intervalo, que va de menos dos a una fracción de uno, donde se encuentran valores que pueden ser infinitos; por ejemplo  $\frac{\pi}{4} = 0.78539816 \dots$ . Finalmente el conjunto de números solución para probar en la ecuación, son los que se obtienen por medio de iteraciones, para construir la figura punto por punto.

Matemáticamente los números que permanecen dentro del conjunto y su comportamiento son un campo de estudio nuevo, se ha descubierto con la ecuación logística para modelar la población  $\{x_{n-1} = rx_n(1 - x_n)\}$ ,<sup>16</sup> donde se descubrió que sus iteraciones

---

<sup>16</sup> Veritasium. “This equation will change how you see the world (the logistic map)”. 10 Abr. 2020. [YouTube](https://youtu.be/ovJcsL7vyrk). 01 Abr. 2021 <<https://youtu.be/ovJcsL7vyrk>>. Min. 6:50

forman un diagrama de bifurcación. Si se grafica respecto a  $(x_n, x_{n+1})$  es una parábola invertida. Esta ecuación, ha sido utilizada para modelar el crecimiento poblacional de especies silvestres como los conejos, suponiendo que la tasa de crecimiento es 'r' y su límite es uno menos equis ' $(1 - x)$ '. El caso es que al estar tomando datos, se ha observado que tanto en una simulación como en un ejemplo de la vida real, el crecimiento de la población se estabiliza ya sea que crezca o que decrezca constantemente hasta extinguirse. Pero hay un punto cuando la población está en crecimiento, en el cual se mantiene la tasa de variación año con año y la constante varía oscilando. La población es mayor un año y al otro año es menor y así continua. Su gráfica en una simulación es un diagrama de bifurcación y su característica geométrica es fractal, cuando la tasa de crecimiento "r" es mayor que 3 la gráfica se bifurca, es decir se forma un diagrama de bifurcación que tiene diferentes comportamientos según el periodo. "Y de hecho es parte del fractal más famoso que existe, el fractal de Mandelbrot".<sup>23</sup>

**1.3 Construcción Fractal con Geometría Clásica "The Koch Curve"**. Una vez que se revisó la forma en la que se construye el fractal de Mandelbrot. Y que se generalizaron aspectos geométricos de la construcción fractal, se puede constatar y ver que: 'las construcciones geométricas de cualidad fractal, siempre han existido, con la utilización de geometría clásica'. Esto se logra, con construcciones geométricas, parecidas a la que se utilizó en la construcción de la curva "The Koch" – lograda con geometría clásica –. La curva se distingue por tener una construcción y forma fractal y en su construcción solo se utilizan líneas; segmentos de líneas; el orden y la simetría, algo muy similar a como se construye una figura fractal. Pero en épocas en las que no había computadora y las anotaciones, resultados e iteraciones se hacían a mano. Estos logros se alcanzaron gracias a la técnica basada en la "auto similitud", después mejorada con la técnica de la geométrica fractal:

"la reproducción de una figura o forma de origen en diferentes escalas conservando la figura inicial 'forma' y las proporciones, descrita como 'self-similarity'. Hace referencia a que la figura de origen se repite de forma idéntica – con estructura similar – pero en diferentes escalas a la estructura de origen, y además tienen la característica de que juntas forman una nueva figura".<sup>17</sup>

La '*auto similitud*' se puede ver de forma gráfica con la construcción a mano de un fragmento de la '*Curva Koch*'. Los 'Elementos' de Euclides ayudan a determinar la recta, el segmento,

---

<sup>17</sup> (Sherif. Ezzeldin 40)

la circunferencia, los ángulos rectos y las paralelas, y con estos elementos geométricos se pueden construir todas las figuras geométrías clásicas. Trazar una recta, con el postulado uno: “Dos puntos distintos cualesquiera determinan un segmento de recta”.

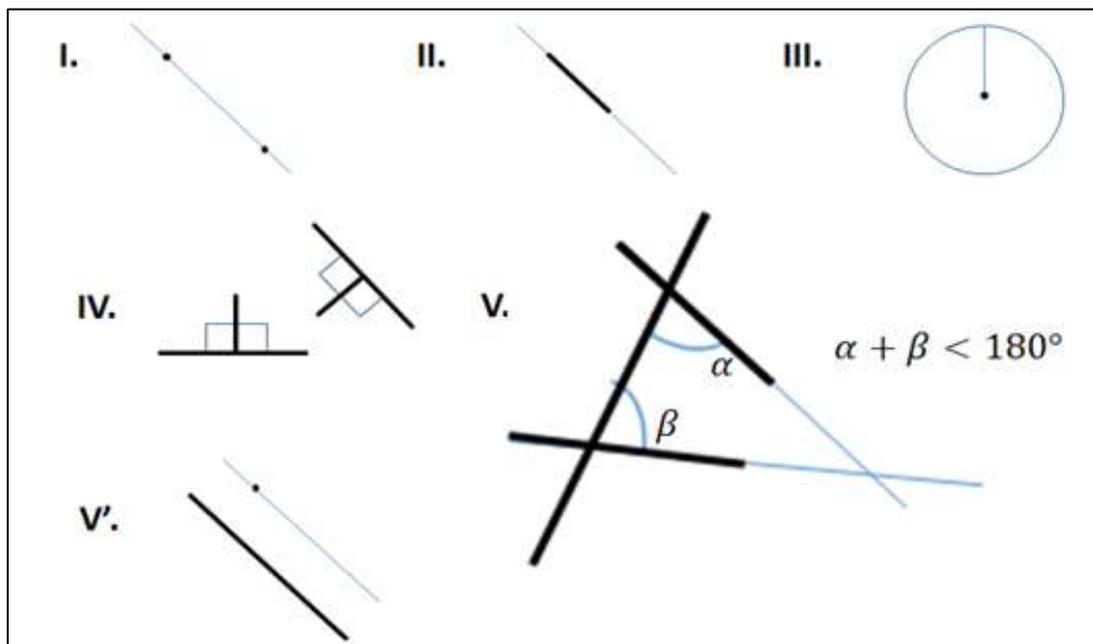


Fig. 3. “Postulados de Euclides”. Fuente: Elaboración propia.

La utilización de la línea tiene muchos propósitos, por ejemplo: la recta para medir distancias; el modo de trazar una circunferencia para medir los arcos. Estos elementos son:

1. Dos puntos distintos cualesquiera determinan un segmento de recta.
2. Un segmento de recta se puede extender indefinidamente en una línea recta.
3. Se puede trazar una circunferencia dados un centro y un radio cualquiera.
4. Todos los ángulos rectos son iguales entre sí.
5. Por un punto exterior a una recta, se puede trazar una única paralela.<sup>18</sup>

En la figura siguiente se construye la curva “The Koch”, con una línea inicial de 9 unidades que se fracciona en tres líneas de 3 unidades, la distancia de estas líneas inclinadas corresponde a  $\{d = \sqrt{1.5^2 + 3^2} = \sqrt{2.25 + 9} = \sqrt{11.25} = 3.354\}$  que se obtiene con el teorema de Pitágoras. Con dos líneas de estas se une el segmento retirado en la primera iteración, todas ordenadas con una simetría basada en la división del segmento inicial.

<sup>18</sup> Euclides. “Postulados Libro I”. Jun. 1997. Copyright Applet. D. E. Joyce. Clark University. 20 Mar. 2021 <[https://web.archive.org/web/20120420125059/http://www.euclides.org/menu/elements\\_esp/indiceeuclides.htm](https://web.archive.org/web/20120420125059/http://www.euclides.org/menu/elements_esp/indiceeuclides.htm)>

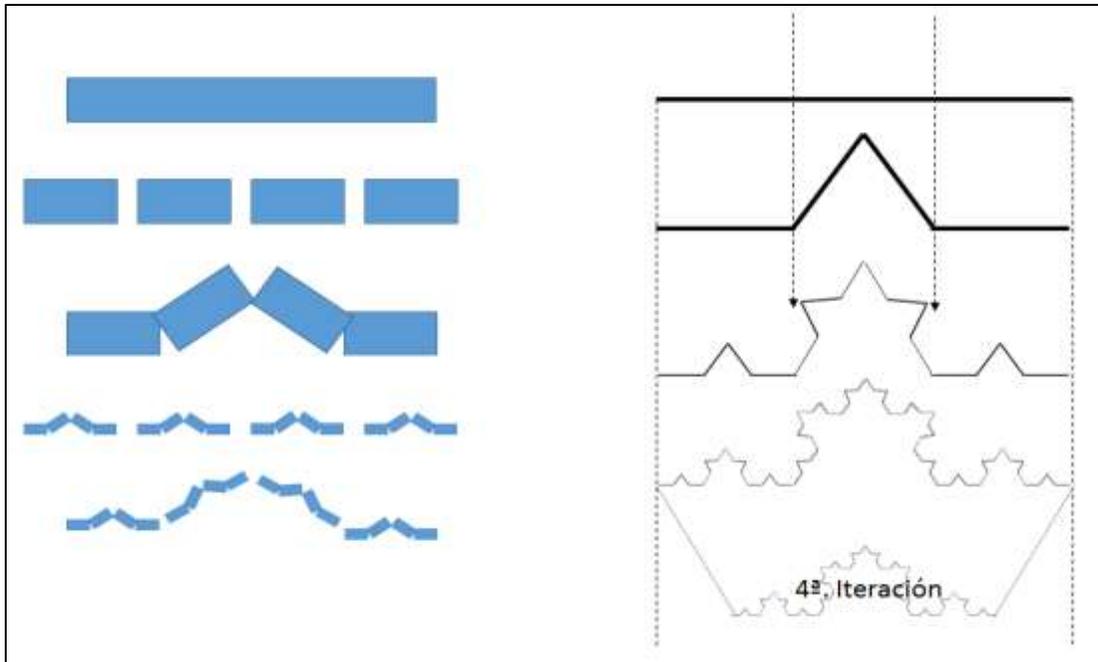


Fig. 4. Trazado de la “Koch Curve”. Fuente: Elaboración propia.

La formación de una nueva figura, construida con iteraciones (proceso que se dijo se reproduce hasta el infinito), se logra con solo líneas. Al hacer una conexión entre la geometría y la arquitectura, al igual, hay formas de cualidad fractal hechas con geometría clásica. Después, llegaron las expresiones arquitectónicas fractales, diseñadas con computadora.



Fig. 5. “De la pequeña escala a la gran escala”. Imágenes<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Elaboración propia con imágenes de Zoser reconocido en el mundo de la arquitectura y la ingeniería por la construcción de la pirámide escalonada – altura 60 mts. - de Saqqara 1700 a.C. Fuente: “Pirámide escalonada de Zoser”. 2021. [Commons](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zoser_Pyramid.jpg). 19 Mar. 2021 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Pir%C3%A1mide\\_escalonada\\_de\\_Zoser](https://es.wikipedia.org/wiki/Pir%C3%A1mide_escalonada_de_Zoser)>. Y de Augusto, emperador arquitecto: El óleo de Charles de La Fosse Augusto revisando los planos del nuevo puerto de Miseno, Siglo XVII.Y “el teatro de Marcelo”. 2021. <[https://1.bp.blogspot.com/-6\\_b2Bm5\\_cx0/UWfgZS-lfGI/AAAAAAAX30/9ATxMd2kwzE/s1600/Augusto+++El+teatro+de+Marcelo+en+Roma.jpg](https://1.bp.blogspot.com/-6_b2Bm5_cx0/UWfgZS-lfGI/AAAAAAAX30/9ATxMd2kwzE/s1600/Augusto+++El+teatro+de+Marcelo+en+Roma.jpg)> – altura 30 mts. – terminado por Augusto años 13 – 11 a.C.

Entonces en muchos de los edificios antiguos, se pueden encontrar detalles fractales, y al igual que sucede con la curva The Koch, su construcción se puede explicar con geometría clásica. En la pirámide escalonada hay seis prismas, en el teatro hay múltiples cambios.

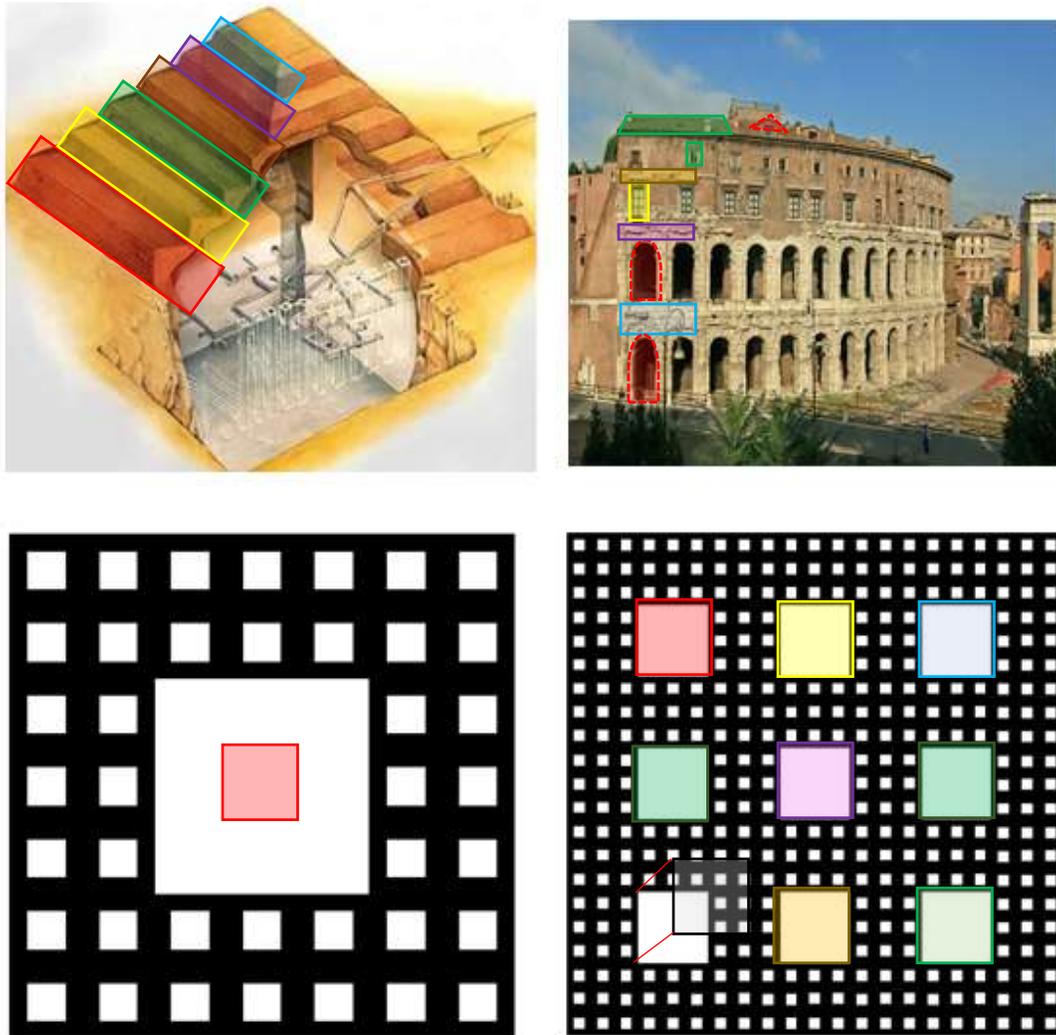


Fig. 6. “La multiplicación exponencial de formas”. Fuente: elaboración propia de ‘Carpets lacunarity’. Imágenes.<sup>20</sup>

La manera en la que se multiplicaron los espacios, entre la pirámide y el teatro, a pesar de que ambos edificios están hechos bajo la dimensión de ‘la escala humana’. Pasó de un espacio de guarda: ‘el de la pirámide’, al teatro con muchos espacios para uso humano. El cambio presenta una multiplicación exponencial, para comprenderla se utiliza la figura seis, donde

<sup>20</sup> ‘Carpets lacunarity’. Original. (Mandelbrot), Egypt, Tour. “The Step Pyramid of Djoser at Saqqara in Egypt - The Primary Pyramid Structure”. 2021. touregypt.net. 11 Mar. 2021 <<http://www.touregypt.net/featurestories/dsteppyr2.htm>>. Jensens. “Theater of Marcellus, Rome”. 7 Jul. 2008. [es.wikipedia.org](https://es.wikipedia.org). 11 Feb. 2021 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Teatro\\_de\\_Marcelo#/media/Archivo:Marcellus\\_theater\\_Rome.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Teatro_de_Marcelo#/media/Archivo:Marcellus_theater_Rome.jpg)>

se ve el modo en el que se multiplican las alfombras ‘lacunarity’ (que aunque no es obvio, “ambas tienen la misma dimensión D”).<sup>21</sup> Incluso está multiplicación exponencial, se ve también en el cambio y uso de diversidad de formas geométricas, en el caso analizado: se pasó de usar prismas, a usar más de nueve formas distintas. Visto esto en una línea de tiempo, se acusa la suma de técnicas constructivas, de dos diferentes épocas: la arquitectura arcaica de la pirámide y los elementos de la arquitectura del teatro ‘cercana a Vitruvio y sus elementos de la arquitectura’.<sup>22</sup> Sin embargo Alberti con su obra, confirma la técnica constructiva, escribiendo, dibujando y con el edificio. Wittkower reconoció que Alberti<sup>23</sup> cambió la arquitectura de columnas, por una arquitectura de muro, en sus propias palabras al hablar del ‘Tempio Malatestiano’ dice: “Alberti estaba añadiendo la idea del arco triunfal, directamente en la pared” lo cual habla directamente de un cambio en la geometría.

“Desde Pitágoras y Platón, se aspiraba a que las proporciones arquitectónicas, debían expresar la armonía del universo a través de cocientes matemáticos.”<sup>24</sup> En la obra hecha en los espacios exteriores del edificio “Santa María Novella”, León Battista Alberti,<sup>25</sup> deja ver como hace uso de las proporciones para construir los detalles de esta obra:

“The façade is in four levels. On the first level the side pilasters are striped alternately in equal green and white marble bands. There are 15 green bands, and 14 white. On the next level the side pilasters have 6 green bands, and 5 white. On the third story the pilasters have 13 green bands, and 12 white. These numbers all relate to known rational values for  $\sqrt{3}$ . The ratio 26:15 is a good rational proxy for  $\sqrt{3}$ ...” (Íbidem). “La fachada es en cuatro niveles. En el primer nivel las pilastras laterales están estriadas alternativamente por igual con bandas verdes y

---

<sup>21</sup> “Clearly, D being the same in both cases is not obvious”. (Mandelbrot, *The Fractal Geometry of the Nature* 318). “Claramente no es obvio que la ‘D’ es la misma en ambos casos”. (Trad. Propia).

<sup>22</sup> “La arquitectura se compone de Ordenación,... Disposición,... Eurytmia,... Simetría,... Ornamento y de la Distribución...” (Vitruvio 32).

<sup>23</sup> “Wittkower’s analysis of Alberti... Now, one of the curious aspects of Alberti’s architectural theory is the distinction he draws between a notion of an architecture of the wall, on the one hand, which is a structural statement, and on the other hand, the question of the column,... And by relegating the column to the realm of the decorative, Alberti, according to Wittkower, confronted one of the fundamental problems of Renaissance architecture. How do you define a wall?” (Erika “Lecture 2.2 Wittkower and Alberti”).

“El análisis de Wittkower sobre Alberti... Ahora, uno de los curiosos aspectos de la teoría arquitectónica de Alberti, es la distinción que establece; entre una noción de arquitectura del muro, que es un enunciado estructural, en una mano. Y en la otra mano, la cuestión de la columna,... Y al relegar la columna al ámbito de lo decorativo, Alberti, según Wittkower, se enfrentaba a uno de los problemas fundamentales de la arquitectura renacentista. ¿Cómo se define una pared?”

<sup>24</sup> “Geometría y aritmética son la clave de la ideología palladiana. En ellas se basa su teoría matemática, y de las proporciones armónicas que afectan cada espacio individual, el cual se correlaciona secuencialmente con los siguientes tomando como medio compositivo predominante la simetría de los espacios... Desde Pitágoras y Platón... Alberti... eligió usar cocientes enteros”. (Palladio, *Los Cuatro Libros de Arquitectura* 27)

<sup>25</sup> (K. L. Williams 190-191)

blanco mármol. Hay 15 bandas verdes y 14 blancas. En el siguiente nivel las pilastras laterales tienen 6 bandas verdes y 5 blancas. En el tercer piso las pilastras tienen 13 bandas verdes y 12 blancas. Estos números están relacionados a los conocidos valores racionales para la raíz de tres  $\sqrt{3} = 1.732$ . El radio 26:15 es una buena aproximación racional para la raíz de tres  $\sqrt{3}$ . (Trad. Propia).

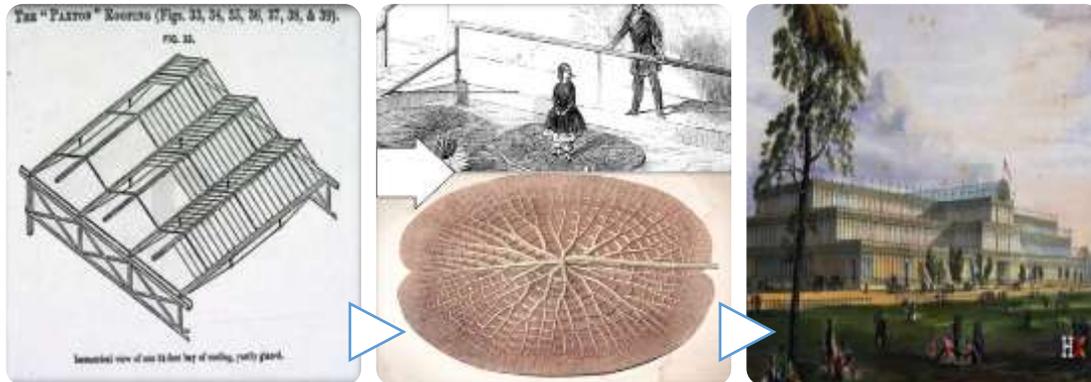


Fig. 7. ‘Las proporciones utilizadas por Alberti’. Imagen.<sup>26</sup>

En Alberti ya se pueden ver; el uso de cambio de formas geométricas siguiendo la regla de auto similitud; la simetría y el uso de las proporciones, de manera que se le da una armonía a la fachada; el orden de los elementos y sus cambios de dimensión; y la disposición, todas sugieren una formación, la cual se logra con medidas estándar. En la época de Vitruvio podría ser el conocido pie romano *33.26 cm.*, mientras que con (Palladio, Los Cuatro Libros de Arquitectura 25) en pies vicentinos  $1 \text{ pie} = 34,78\text{cm}$ . De esta manera se pueden explicar, los casos que se fueron dando, de construcción de formas arquitectónicas con cualidad fractal. Imitando a la naturaleza con la utilización de geometría clásica aplicada de forma maestra. Por ejemplo: “The Crystal Palace. 1850”, su diseñador Joseph Paxton, construyó la Lily House, inspirado en la flor Lily. Pues observó lo rígidas que eran (foto de Praxton observando a su hija posar sobre una flor de Lily “Gráfica 1”). Y dedujo que esta rigidez se debía a la

<sup>26</sup> Florencia es Arquitectura y Arte. “Museo Santa María Novella”. 2021. Florencia.es. 19 Jun 2021 <<http://www.florencia.es/arquitectura-y-arte/los-monumentos/las-plazas/plaza-santa-maria-novella>>

especie de redes intrincadas, que se forman con los nervios de la hoja. Con esta idea creo un espacio con una estructura, en forma de una especie de red, la “Lily House”. Ese mismo principio utilizado en la Lily House se puede ver en el “Crystal Palace”.<sup>27</sup>



Grafica 1. Utilización de formas de la naturaleza. Imagen<sup>28</sup>

De la observación, surgida a partir de ver la utilización de las formas de la naturaleza, para hacer diseños estructurales y arquitectónicos. Se deduce que la geometría fractal utilizada en la arquitectura, no es una abstracción poética, sino una consecuencia: de ir en el camino en búsqueda de las formas que imitan a la naturaleza. La antesala ideal para hacer arquitectura con geometría fractal, los antecedentes apuntan a los cambios multidimensionales (tanto en las obras como en sus elementos) y la utilización de la regla de ‘*auto similitud*’. Hasta llegar a las retículas, que sugieren cambios multidimensionales. Tal es el caso que se da en lo que hizo con su arquitectura Frank Lloyd Wright,<sup>29</sup> por ejemplo: el deslizamiento de una forma clásica ‘el triángulo’, al realizar el diseño arquitectónico de la ‘Palmer house’.

<sup>27</sup> En la “Part. X: Contemporary Approaches to Design and Analysis” (K. M. Williams, *Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future: Vol. II 18-20*), explica algunos de los temas que se revisan en esta sección. Ahí en esa pequeña síntesis de los capítulos, nombra tres aprovechamientos de geometrías en la arquitectura.

“... chapters..., ... which concern surfaces, including minimal surfaces (soup bubbles) and two forms of topographic tiling (aperiodic and quasi-periodic)... different methods for using geometry to generate architecture. These include classical proportional systems, linear algebra and perspective hypercube constructions... the use of computational techniques for the analysis of geometry in historic structures”.

“... capítulos... los cuales tratan de superficies, incluyendo superficies mínimas (soup bubbles = ‘burbujas de jabón’) y dos formas de construir tejado con topografía (aperiódico y cuasi periódico)... diferentes métodos para usar geometría y generar arquitectura. Esto incluye sistemas clásicos de proporciones, álgebra lineal, y construcciones híper-cúbicas... el uso de técnicas computacionales para el análisis geométrico en estructuras históricas”.

<sup>28</sup> (Hays. “Lecture 5.3 Joseph Paxton”)

<sup>29</sup> “Rompió la caja, empezó a hacer arquitectura con planos que se deslizaban y todas estas innovaciones formales y estéticas, las trasladó a Holanda y a través de Holanda a Alemania. Y cambiaron el rumbo de la arquitectura moderna, para generar lo que luego se llamó estilo internacional”. (Fundación Juan March. “Frank Lloyd Wright | Luis Fernández-Galiano). Min: (8:30 – 8:45).

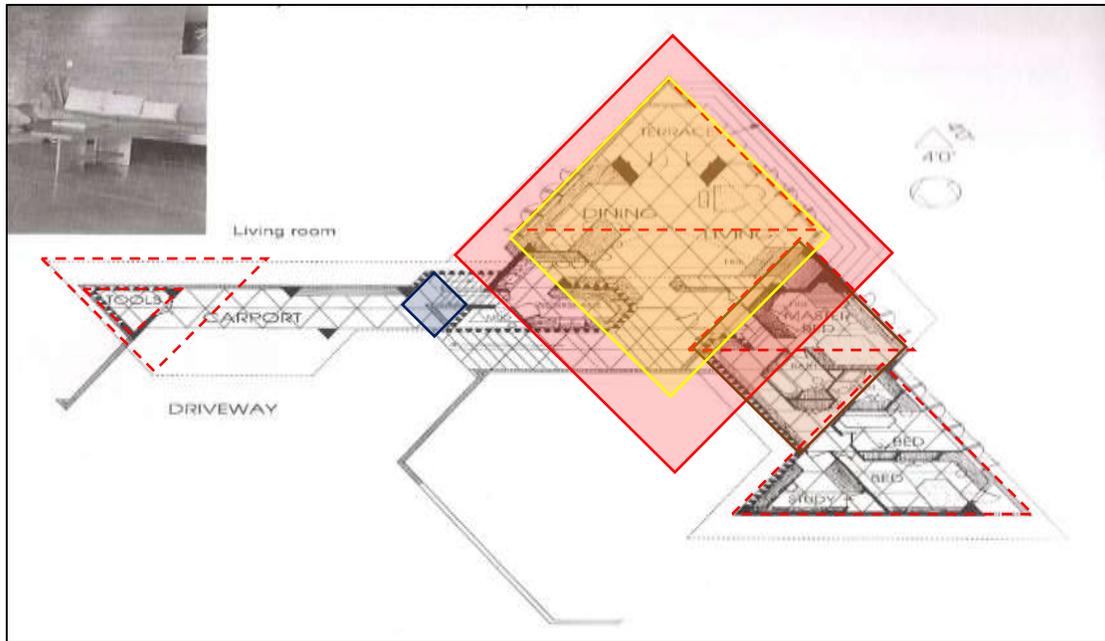


Fig. 8. “The Palmer House”. Imagen.<sup>30</sup>

En esta obra como se mencionó hay un deslizamiento de triángulos, la retícula surge de un cuadrado girado, marcado con el *panel de Fibonacci 6 rojo* y el *panel 5 amarillo* así los demás triángulos con cambios de dimensiones surgen de la retícula. Leonard K. Eaton,<sup>31</sup> menciona que una técnica observada en la arquitectura de Wright, es el uso de dos constantes en sus diseños: la geometría y la naturaleza.<sup>32</sup> Wright enraizó su arquitectura en la naturaleza pronunciando “un sentido de lo orgánico” como “indispensable para el arquitecto”,<sup>33</sup> sus obras son consideradas iconos de la arquitectura moderna americana.<sup>34</sup> En la ‘Palmer House’ Eaton<sup>35</sup> menciona que las formas fractales, se pueden encontrar en distintos elementos de la casa, construidos por triángulos truncados o el triángulo de inicio en diferentes dimensiones. Los triángulos del piso, las luces... En sí, la importancia radica en observar el cambio de dimensión de las retículas, porque cada elemento tiene su propia retícula.

<sup>30</sup> Frank Lloyd Wright Building Conservancy. Palmer House Structure. 3 Jul.2013. SaveWright.org. 20 Mar. 2021 <<http://wrightchat.savewright.org/viewtopic.php?t=7158>>

<sup>31</sup> (K. M. Williams, *Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future: Vol. I* 325-337).

<sup>32</sup> (Íbidem).

<sup>33</sup> “Chapter 14. The prairie house. James F. O’Gorman... Wright rooted architecture in nature and pronounced ‘a sense of the organic’ as ‘indispensable to an architect’”. (O’Gorman 274).

<sup>34</sup> Alofsin, Anthony. “Chapter 15. Wright, influence, and the world at large”. 2004. American Architectural History: A Contemporary Reader, edited by Keith Eggner, Taylor and Francis. ProQuest Ebook Central. 13 Oct 2020 <<http://ebookcentral.proquest.com/lib/biblitesm/detail.action?docID=200277>>. “Frank Lloyd Wright and his work are icons of modern American architecture”. (Alofsin. 281-315)

<sup>35</sup> (Williams, {vol. 2} 325-337)



Fig. 9. Vistas de la Palmer house. Imagen.<sup>36</sup>

Carl Bovil<sup>37</sup> al hacer observaciones, sobre la cualidad fractal de la arquitectura de Wright, dice “las construcciones de Frank Lloyd Wright proveen... ejemplos de progresiones..., que van de una gran a una menor escala...”<sup>38</sup> Y es imprescindible considerar que la configuración de la casa, empezó en el proceso de diseño arquitectónico y que cada forma y cambio de dimensión tiene una retícula propia. Además de estos ejemplos, también se dieron ejemplos de obras de arquitectura, que tenía la particularidad de tener formas esculturales. Conocidas también, por tener la presencia de formas caóticas y/o complejas, en su arquitectura. Por épocas, se fue pasando de lo ornamental a lo estructural, hasta llegar a tener nuevas morfologías en la arquitectónica. En la arquitectura moderna, la ‘Capilla de Notre-Dame-du-Haut de Ronchamp’, Le Corbusier por ejemplo: logró un edificio de condición escultórica... “era un objeto a reacción poética”,<sup>39</sup> de los que hay muchas otras muestras.<sup>40</sup>

<sup>36</sup> Frank Lloyd Wright Palmer House. “Gallery”. 2009. [FLW Palmer House LLC](http://flwpalmerhouse.com/gallery.php). 15 Mar. 2021 <<http://flwpalmerhouse.com/gallery.php>>

<sup>37</sup> (Bovil, Fractal Geometry in Architecture and Design 23-27)

<sup>38</sup> (*Ídem* 119)

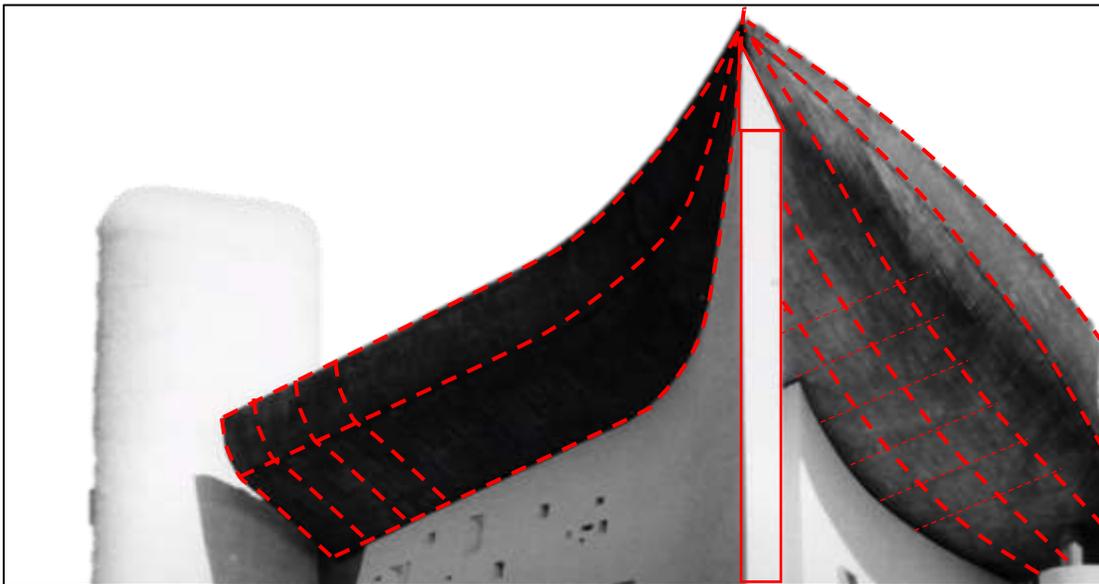
<sup>39</sup> Fundación Juan March. “El Guggenheim de Bilbao: Arquitectura y espectáculo | Luis Fernández-Galiano”. 8 Jun 2016. [YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=rBLnqlbdWDk). 2022 <<https://www.youtube.com/watch?v=rBLnqlbdWDk>>. Min. (7:45-8:05)

<sup>40</sup> (Sherif. Ezzeldin 41)



Fig. 10. ‘La búsqueda de Le Corbusier de la forma en la arquitectónica’. Imagen.<sup>41</sup>

Se sobrepuso una retícula en parte del dibujo de ‘Romchamp’, la retícula sigue la forma curva, son líneas curvas punteadas en color rojo.



Gráfica. 2. La retícula curva de Ronchamp. Imagen.<sup>42</sup>

<sup>41</sup> Imagen: ‘Capilla de Notre-Dame-du-Haut de Ronchamp’. (Fundación Juan March. “El Guggenheim de Bilbao: arquitectura y espectáculo | Luis Fernández-Galiano”). Min. (7:45).

<sup>42</sup> (Fundación Juan March. “Norman Foster | Luis Fernández-Galiano”). Min. (9:43).

Los edificios hechos con formas casi esculturales,<sup>43</sup> son una muestra de lo que después fueron las formas caóticas o complejas, que se construyen con técnicas multidimensionales. En este caso, el Guggenheim de New York y el Guggenheim de Bilbao, se utilizan para hacer un contraste de este cambio. Uno con su condición escultural hecho con geometría clásica y el otro es arquitectura fractal, hecha con métodos geométricos computacionales. Estas son formas difíciles de construir, en sus elementos y en su geometría arquitectónica, son diseños únicos. Y esto hace que puedan tener elementos difíciles de vivir: en los espacios interiores del Guggenheim de New York, hay elementos como rampas o planos inclinados.



Fig. 11. Del Guggenheim de New York al Guggenheim de Bilbao. Imágenes.<sup>44</sup>

Igualmente los muros contorsionados e inclinados y la estructura aparente en los espacios interiores del Guggenheim de Bilbao, son tan intrincados, que no se pueden asimilar a primera vista. En este caso por su forma, pueden ser difíciles de vivir, aun así son una representación simbólica de la arquitectura.<sup>45</sup>

<sup>43</sup> “El caos la catástrofe estaban de moda en aquel entonces...”. Min. (19:10-19:15). “Claro el ordenador permitía hacer esas cosas que antes eran difíciles de dibujar y no digamos ya de construir...”. Min. (22:32-22:38). (Fundación, Juan, March. “El Guggenheim de Bilbao: arquitectura y espectáculo | Luis Fernández-Galiano”).

<sup>44</sup> Wikiarquitectura. “Guggenheim Bilbao”. 29 Sep. 2022. es.wikiarquitectura.com. 29 Sep. 2022 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/guggenheim-bilbao/>>. Wikiarquitectura. “Museo Guggenheim de New York”. 24 Oct. 2022. es.wikiarquitectura.com. 24 Oct. 2022 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/museo-guggenheim-de-nueva-york/>>

<sup>45</sup> “The idea of Spirit appearing, of, sort of, shining forth in objects of art is important, and Hegel defends a kind of two-fold thesis about this... the paradigm of the symbolic is architecture, The real paradigm of the classical is sculpture,... The real paradigm of the romantic is painting and music...” (Hays “Lecture 3.6 The end of Art”).  
 “La idea del espíritu aparente, de una suerte de brillo, delante en los objetos de arte es importante. Y Hegel defiende un tipo de tesis de dos lados... El paradigma de lo simbólico es la arquitectura... El verdadero

**1.4 Consecuencia del uso Fractal en la Arquitectura.** Michael J. Ostwalt<sup>46</sup> describe dos etapas importantes de la ‘*arquitectura fractal*’, haciendo énfasis incluso en que la utilización del concepto ‘*arquitectura fractal*’, es un tipo de uso de las matemáticas en un campo fuera de ellas. Sin embargo el concepto de arquitectura fractal, es un beneficio en el campo de la arquitectura y comprende dos ramas: el análisis de arquitectura anterior a este descubrimiento, en donde se buscan detalles de cualidad fractal; y el diseño y la arquitectura fractales. A estas expresiones se les puede llamar formalmente ‘arquitectura fractal’. Ambas etapas se reconocieron hasta después de 1977 y fueron una repercusión de la geometría fractal de Mandelbrot;<sup>47</sup> quien argumento con ejemplos de edificios construidos, que arquitectura posee detalles fractales y que arquitectura no los tiene. Esta es la primera relación entre la geometría fractal y la arquitectura, ocupada como una teoría que define parte de la *ingeniería arquitectónica para diseños fractales*. **Primera teoría.** A partir de la relación, que hizo Mandelbrot,<sup>48</sup> acerca de la cualidad fractal que observó en el edificio de Bellas Artes Francesas. La cual se refiere a la utilización de tres dimensiones diferentes – yarda, pie y centímetro –, en la configuración del edificio:

“El perímetro de un edificio de las Bellas Artes como la Ópera de Paris, se mide con tres diferentes escalas una vara de una yarda dividida en tres pies, una cinta que mide pulgadas y una regla con centímetros, de lo que resultan tres diferentes medidas... Mandelbrot establece que los edificios de Mies van der Rohe no son fractales, porque al medirlos con las tres escalas que argumenta hay en las Bellas Artes, las dimensiones deben de ser las mismas. Mandelbrot identificaba el edificio de Mies ‘*Seagram Building*’ como una estructura de concreto en lo alto

---

paradigma de lo clásico es la escultura... El verdadero paradigma del romanticismo es la pintura y la música...” (Trad. Propia).

<sup>46</sup> Ostwalt, Michael J. “Fractal Architecture”. Nexus Network Journal. Vol. 3, No. 1 (2001): 73-83. (J. M. Ostwald 240) El Dr. Michael J. Ostwald es profesor de Análisis Arquitectónico en la University of New South Wales (UNSW), Sydney (Australia). Y Decano asociado de investigación en la Facultad de Artes Diseño y Arquitectura

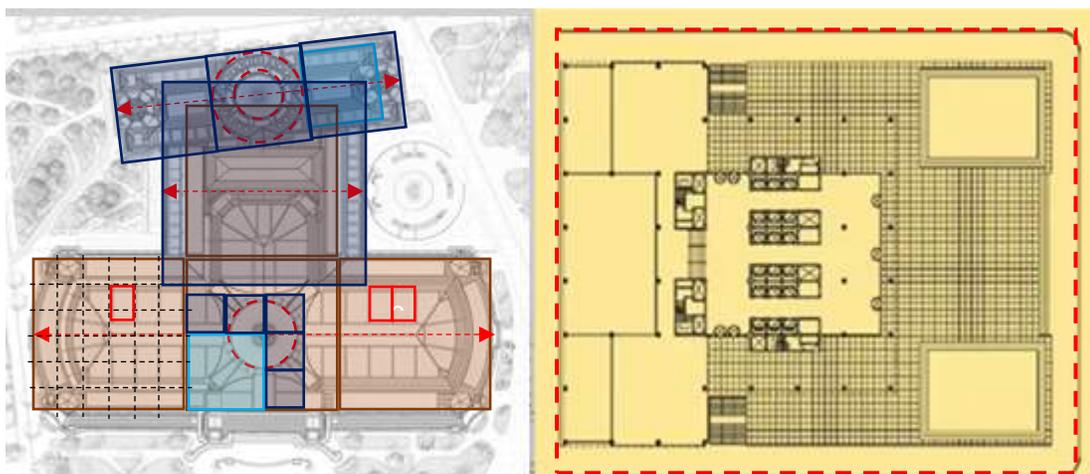
<sup>47</sup> (Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance, and Dimension*), (Mandelbrot, *The Fractal Geometry of the Nature*).

<sup>48</sup> (J. M. Ostwald 23-25) “Benoit Mandelbrot, suggests that certain architectural styles possess formal properties similar to those of various natural fractals. This argument is encapsulated in his statement that ‘a high period Beaux Arts building is rich in fractal aspects’ (1982: 24), because it possesses ‘very many scales of length and favour[s] self-similarity’ (1982: 23)”.

“Benoit Mandelbrot sugiere que cierto tipo de estilos arquitectónicos poseen propiedades formales similares a esos vistos en varios fractales naturales. Su argumento se basa en el hecho de que una gran parte del periodo de las Bellas Artes tiene edificios que son ricos en aspectos fractales, porque poseen muchas diferentes escalas de medidas y detalles de auto similitud”.

del cielo, con una cortina de paredes de vidrio y bronce con una forma rectangular simple y similar”. Lo cual es la antítesis de la geometría fractal<sup>49</sup>

A continuación se pone la imagen, donde se muestra el perímetro de ambos edificios y se hace notar lo que Mandelbrot vio. El cambio de medidas en el perímetro de la ópera, contra el perímetro rectangular del ‘Seagram Building’.<sup>50</sup> Ostwald dice que: Mandelbrot establece que la escala frontera de los edificios de Mies van der Rohe no es fractal, porque cuando uno los mide con las tres herramientas mencionadas previamente (la vara de una yarda, la cinta y la regla), las dimensiones deben ser las mismas – es decir no hay variaciones –.



Gráfica 3. “Las plantas de la Opera de Paris y el Edificio Seagram”. Imágenes.<sup>51</sup>

<sup>49</sup> “Mandelbrot argues that if, for example, the perimeter of a Beaux Arts building like the Paris Opera is measured using three different scales — a yardstick divided into feet, a tape measure in inches and a ruler with centimetres — three different lengths will result. While this is true of many buildings, Mandelbrot’s identification of the Beaux Arts as being especially fractal is also supported by the way this style actually does feature elements repeated at different scales”. (Íbidem).

“Mandelbrot argumenta que si, por ejemplo, el perímetro de un edificio de Bellas Artes como la Ópera de Paris se mide utilizando tres diferentes escalas – una vara de una yarda dividida en pies, una cinta de medir en pulgadas y una regla con centímetros – resultarían tres medidas diferentes. Mientras que esto es verdad en muchos edificios, la identificación de Mandelbrot de los edificios las Bellas Artes como que son especialmente fractales, en realidad es también soportada por la forma en que este estilo se caracteriza por usar elementos que se repiten en diferentes escalas”.

<sup>50</sup> “Mandelbrot states that the ‘scalebound’ (1982: 24) buildings of Mies van der Rohe are not fractal because, when measured with the three tools mentioned previously (the yardstick, the tape measure and ruler), the dimensions would be the same”. (Ídem 24).

“Mandelbrot establece que la ‘escala obligada’ en los edificios de Mies van der Rohe no es fractal porque cuando se mide con las tres herramientas mencionadas anteriormenete (la yarda, la cinta de medir y la regla), las dimensiones deben ser las mismas”.

<sup>51</sup> Imágenes: Wikiarquitectura. “Gran Palacio de Bellas de las Artes. Arquitectos: Albert Louvet, Albert Thomas, Charles Girault, Henri Deglane. 1900. Paris. Image 1/94”. 2021. [Es.wikiarquitectura.com](https://es.wikiarquitectura.com). 04 Abr. 2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/gran-palacio-de-las-bellas-artes/>>. Wikiarquitectura. “Edificio Seagram. Arquitecto: Ludwig Mies van der Rohe & Philip Johnson. 1958. New York”. 2021. [es.wikiarquitectura.com](https://es.wikiarquitectura.com). 4 Abr..2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/edificio-seagram/>>

Mientras que la Ópera de París está conformada, por lo que se podrían llamar tres bloques de forma distinta, el Seagram es un rectángulo. Los cuadrados, llamados *paneles de Fibonacci*, se utilizan para dividir y señalar secciones de la planta de la Ópera, con flechas rojas se marcan los cambios dimensionales. Se utilizan el *panel 1 azul*, *panel 3 naranja* y *paneles auxiliares en azul marino*. Cada panel representa, una dimensión y una retícula:

$$\text{Panel uno} \rightarrow PA_1 = 1\text{cm}$$

$$\text{Panel tres} \rightarrow PA_3 = 2\text{cm}$$

La premisa es que si se existen cambios multidimensionales, como los vistos por Mandelbrot en la planta de la Ópera de París (condición que se puede ver en edificios de todas las épocas, los anteriores a la geometría fractal, se hacían con geometría clásica: según se dijo, utilizada de manera maestra y buscando imitar las formas de la naturaleza), los edificios tienen detalles fractales. Y los diseñados con geometría fractal, si utilizan esta observación técnica, que da vida a la teoría uno o primer técnica fractal: ‘composición de un elemento arquitectónico, en este caso la planta, con al menos tres dimensiones diferentes’. Son edificios fractales

**1.5 Diseños Arquitectónicos Fractales. Segunda Teoría.** La técnica de Eisenman de generar un espacio a partir de la unión en un conjunto, de una figura inicial y sus reproducciones en diferentes escalas. También llamada la técnica de auto similitud “Self Similarity”. Es la segunda relación entre la arquitectura y la geometría fractal. “Unos cuantos meses después de publicadas las investigaciones<sup>52</sup> de Mandelbrot, el arquitecto Peter Eisenman, diseñó ‘House 11a’ . “La casa es escalada de forma efectiva en sí misma, un infinito número de veces, formando un tipo de arquitectura fractal”.<sup>53</sup> Eisenman utilizó una figura de origen con forma de “L”<sup>54</sup> y la fue reproduciendo en diferentes escalas. En (J. M. Ostwald) se menciona que para Eisenman, la escala fractal hacía frente a cuestiones como la “presencia del edificio, la originalidad y el objeto estético”. En aquella época en que la geometría fractal fue un boom publicitario,<sup>55</sup> la producción de arquitectura fractal tuvo su esplendor de 1978-

---

<sup>52</sup> Mandelbrot, Benoit. “Fractals: Form, Chance and Dimension”. USA: W.H.Freeman & Company; 1st edición. 1977.

<sup>53</sup> (J. M. Ostwald 75).

<sup>54</sup> Peter Eisenman. (Efrie, 2014). (Schizo, 2014). “House 11a mockup”. 2014. [Researchgate.net](https://www.researchgate.net/figure/House-11a-mockup-Peter-Eisenman-Efrie-2014-Schizo-2014_fig2_326033004). 12 Feb. 2021 <[https://www.researchgate.net/figure/House-11a-mockup-Peter-Eisenman-Efrie-2014-Schizo-2014\\_fig2\\_326033004](https://www.researchgate.net/figure/House-11a-mockup-Peter-Eisenman-Efrie-2014-Schizo-2014_fig2_326033004)>

<sup>55</sup> Schwarz, Michael. Bill, Jersey. “Fractals – Hunting the Hidden Dimension”. 2008. [WGBH educational Foundation and the Catticus Corporation](https://www.youtube.com/watch?v=KKAb_oxKcoU). 08 Ago 2020. <[https://youtu.be/KKAb\\_oxKcoU](https://youtu.be/KKAb_oxKcoU)> Min. (23:15 – 23:42).

1988. Luego su caída en el periodo de 1989-1999, fueron épocas en las que el concepto de arquitectura fractal, ante la crítica era tema de burla: “algunos escritores de arquitectura, se burlaron de la obsesión de sus colegas con la teoría del caos, las dinámicas no lineales y la geometría fractal...”<sup>56</sup>

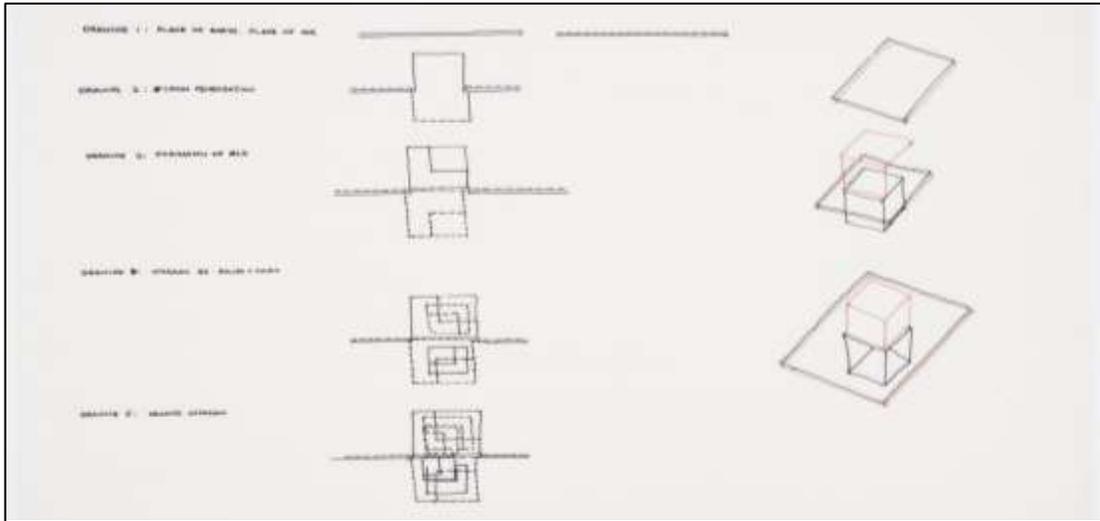


Fig. 12. “Proceso de diseño de la casa 11a.” Imagen<sup>57</sup>

Para entender mejor esta técnica, se muestra el ejemplo de un rectángulo inicial, con el que se hace un diagrama arquitectónico. Con la regla de *auto similitud*, de la geometría fractal. La idea es hacer notar como se fraccionó el espacio con una figura inicial, rectángulo con coordenadas en el *panel 5 amarillo*, el rectángulo del perímetro total es independiente, con esto ninguna fracción es auto similar a este. La figura inicial se multiplica y se reproduce en otras dimensiones, con las que se forma un conjunto, que representa el diagrama arquitectónico. Las flechas horizontales y verticales se utilizan para ordenar los *paneles de Fibonacci*, con su unión se puede trazar una espiral logarítmica – asociada con la espiral de Fibonacci –. De esto surgen, de entre muchas otras, las siguientes medidas:

$$\begin{array}{l}
 PA_1 = 1cm^2 \quad F_h = 1 \times 0.6 = 0.6cm^2 \quad F_v = (1 + 0.6) \times 0.62 = 0.99cm^2 \\
 Matriz = PA_3 = 4cm^2 \quad F_h = 2 \times 0.55 = 1.1cm^2 \quad F_v = (2 + 0.55) \times 0.6 = 1.53cm^2 \\
 PA_5 = 9cm^2 \quad F_h = 3 \times 1.2 = 3.6cm^2 \quad F_v = (3 + 1.2) \times 1.3 = 5.46cm^2
 \end{array}$$

<sup>56</sup> “As early as 1988 some architectural writers were deriding their colleague’s obsession with Chaos Theory, Nonlinear dynamics and fractal geometry”. (Ostwalt, Michael J. “Fractal Architecture”. Nexus Network Journal. Vol. 3, No. 1 (2001): 77). “Tan temprano como 1988, algunos escritores de arquitectura se burlaron de sus colegas y su obsesión con la teoría del caos, las dinámicas no lineales y la geometría fractal”.

<sup>57</sup> Eisenman Peter. “Casa 11a Palo Alto California”. 1978. Fuente: Canadian Center for Architecture 08 Mar. 2021 <<https://www.cca.ca/en/search/details/collection/object/326043>>

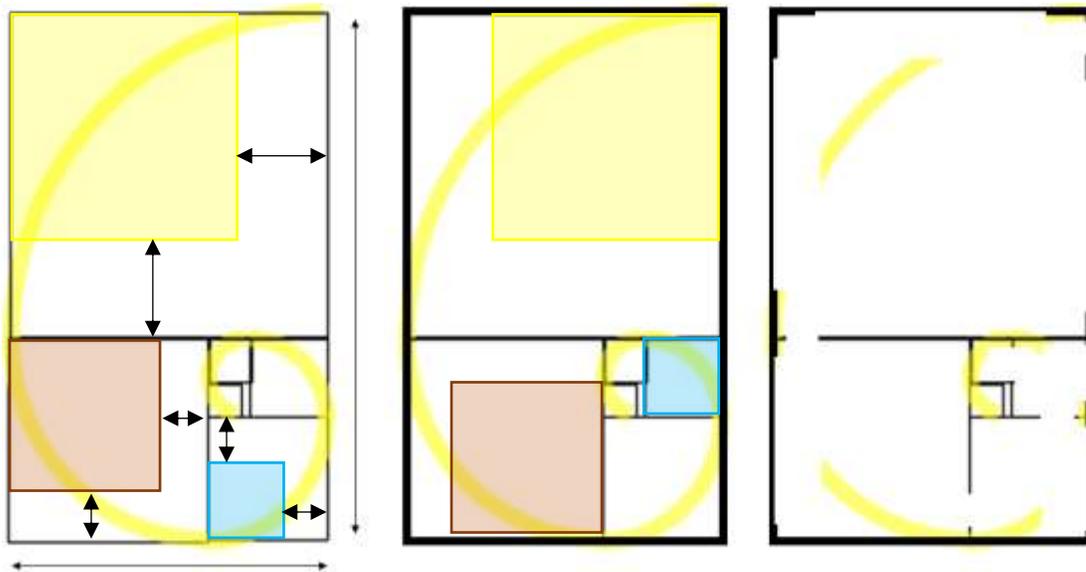


Fig. 13. Utilización de los *paneles de Fibonacci* para dividir un diagrama arquitectónico. Elaboración propia.

La matriz de dimensiones es el resultado de las áreas de los paneles y de las diferencias sobrantes. Por ejemplo el área total del rectángulo señalado con este panel, se está calculando en centímetros cuadrados, comprobar la regla de *auto similitud*.  $\rightarrow 1 + 0.6 + 0.99 \approx 2.59cm^2 = \{área\ del\ rectángulo\ de\ [1.6cm \times 1.62cm = 2.59cm^2]\}$ . Entonces la configuración de espacios<sup>58</sup>, que fue un símbolo de modernidad, con el que se pensaron y se hicieron espacios interiores más cómodos y posibles de vivir. Aluden a la comparación que se hizo entre la pirámide y el teatro:

<sup>58</sup> Hay muestras desde la época arcaica, con lo que se conoce como un uso de retículas, el plan hipodámico o trazado en damero (que es un planteamiento donde el arquitecto griego Hipodamo de Mileto, hizo planes para diseñar ciudades, de acuerdo a una retícula cuadrada). Se observó un uso de las retículas para el diseño arquitectónico, (Ortín 17-25) reconoce desde el capítulo: “La retícula como arquitectura sistemática”. El esfuerzo que Jean Nicholas Louis Durand, profesor de arquitectura de la Ecole Polytechnique de Paris, a principios del siglo XIX hizo para mejorar la actividad de la composición arquitectónica. “Durand basaba su método en una cuadrícula que sirviera como soporte gráfico...”

Explica Rafael Moneo: ‘Para Durand, el espacio en el que la arquitectura va a producirse es un espacio homogéneo y neutro, indiferente. Es el espacio cartesiano infinito, en el que la regularidad de la cuadrícula alude ya en sí misma a la condición fundamental cuantitativa de tal espacio’..., se puede considerar a Durand como el padre de esta malla ortogonal que permite una regulación ordenada sobre la que levantar tanto edificios como elementos de éstos (muros, pilares...), así como la generadora y ordenadora de espacios... Indica Juan Antonio Cortés: “cada cambio arquitectónico se basa en los constituyentes geométricos de la propia retícula...” (Ídem 27).

Con esta idea de planta libre levantada sobre una cuadrícula, Le Corbusier realiza su propuesta de la estructura Dom-ino... Esta retícula cuadrada sirve como plantilla para la colocación de la estructura en forma de pilares situados a la misma distancia unos de otros en ambas direcciones... (Ídem 29).

También fue Mies van der Rohe un gran potenciador de la planta libre, usando la retícula como elemento organizador de la estructura y cerramientos... Por otro lado, la retícula de Mies está, a su vez, formada por una retícula menor de cuadrados dentro de la cuadrícula principal, se trata de submúltiplos... (Ídem 31-33).

“Sin embargo pronto se comprendió que estas construcciones eran sólidas lo cual no les permitía tener espacios interiores, lo cual a través de generaciones de experimentación se llegó a descubrir ‘mejores modos de desafiar a la gravedad; el domo; el techo de bóveda doble; el arco puntiagudo’...” (*La Gran Historia SI-E5*)

La forma y espacialidad de los edificios ha ido cambiando, gracias al desarrollo tecnológico y constructivo; a sus estructuras y a sus materiales:

“en plena etapa de la revolución industrial, se construye uno de los primeros edificios con estructura interior de hierro, lo cual luego fue una tipología común. Se trata de la fábrica Textil (molino de lino) Benyon, Bage & Marshall en Shrewsbury, (1797-1807) cuyo edificio es de 5 pisos, con un muro perimetral de albañilería que por dentro se estructura en base a un entramado de tres filas de columnas de hierro, conectadas por vigas de sección más ancha en su cara inferior, lo cual permitía el apoyo de bovedillas para conformar el entrepiso”. (Ídem *La Gran Historia SI-E5*).

Estos cambios significativos, se logran a través del tiempo y la experiencia con la forma arquitectónica, hasta llegar a una arquitectura libre de ornamentos.<sup>59</sup> Lo que para Vitruvio era: que la condición de los edificios en los lugares públicos debía cumplir con que “tales construcciones deben lograr seguridad, utilidad y belleza...”<sup>60</sup> Para Palladio era: “en toda construcción deben considerarse tres cosas... la utilidad o comodidad, la perpetuidad y la belleza...”<sup>61</sup> Y muchos de estos elementos que se forjaron desde la antigüedad, con sus nuevas interpretaciones, siguen siendo la base de una buena obra de arquitectura. Incluso aquí entra la arquitectura fractal.

**Tercera teoría.** Esta es la tercera relación, que se encontró se dio, entre la geometría fractal y la arquitectura. La técnica de las ‘retículas de dimensión fractal’,<sup>62</sup> aplicada por primera vez en la arquitectura, por Carl Bovil. Y utilizada después por Michael J. Ostwald y Josephine Vaughan,<sup>63</sup> para estudiar edificios en búsqueda de su dimensión fractal, (Bovil, *Fractal Geometry in Architecture and Design*) lo utiliza en un dibujo de la Robie House:

---

<sup>59</sup> “The outward forms of ‘The New Architecture’ differ fundamentally in an organic sense from those of the old... The liberation of architecture from a welter of ornament...” (Gropius 19, 23). Gropius, Walter. *The New Architecture and the Bauhaus*. Cambridge, Massachusetts U.S.A: The MIT Press, 1965.

“Las formas exteriores de la ‘nueva arquitectura’ se diferencian fundamentalmente de las viejas en un sentido orgánico...”

<sup>60</sup> (Vitruvio 36)

<sup>61</sup> (Palladio, *Los Cuatro Libros de Arquitectura* 51).

<sup>62</sup> (Bovil, *Fractal Geometry in Architecture and Design* 119-127).

<sup>63</sup> (J. M. Ostwald).

Conteo de celdas – cajas – en la Robie House:

Conteo de celdas	Tamaño de celdas	Dimensión de celdas
16	8	24ft = 731cm
50	16	12ft = 365cm
140	32	6ft = 182cm
380	64	3ft = 91cm

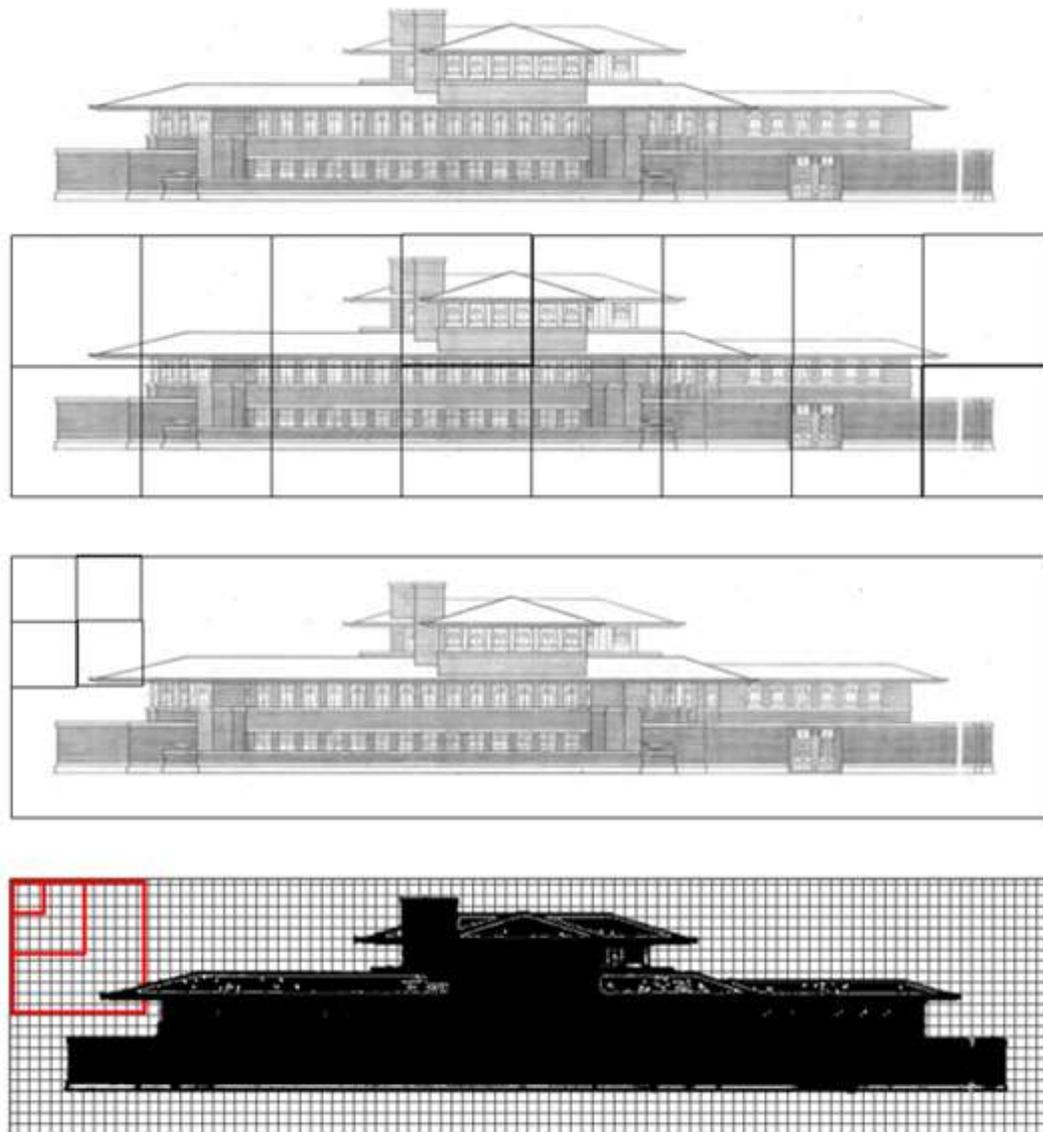


Fig. 14 “Las retículas de Dimensión Fractal utilizadas en la Robie House”. Imagen

Este cálculo es difícil de comprender, debido a que el proceso de capturar casillas ocupadas en diferentes iteraciones (visualmente es equivalente al escaneo y/o copia de una imagen), lo cual implica una serie de cálculos matemáticos sin fin. El estudio de la forma característica de la obra en imagen o en construcción, es parte de las observaciones, donde se deduce lo

que hace ser distinguible a la obra. Cuando se realiza el análisis de la dimensión fractal (la fórmula da el promedio – de diferentes iteraciones –, de la diferencia de casillas ocupadas, divididas entre la diferencia del entre el número de casillas de la base).

$$D_b = \frac{[\log N_{s2} - \log N_{s1}]}{[\log 1/s_2 - \log 1/s_1]}$$

$$\begin{aligned} D_{(box,24'-12')} &= \frac{[\log(50) - \log(16)]}{[\log(16) - \log(8)]} \\ &= \frac{(1.699 - 1.204)}{(1.204 - 0.903)} \\ &= \frac{0.495}{0.301} \\ &= 1.645 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{(box,12'-6')} &= \frac{[\log(140) - \log(50)]}{[\log(32) - \log(16)]} \\ &= \frac{(2.146 - 1.699)}{(1.505 - 1.204)} \\ &= \frac{0.447}{0.301} \\ &= 1.485 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{(box,6'-3')} &= \frac{[\log(380) - \log(140)]}{[\log(64) - \log(32)]} \\ &= \frac{(2.580 - 2.146)}{(1.806 - 1.505)} \\ &= \frac{0.434}{0.301} \\ &= 1.441 \end{aligned}$$

Dado a que este es un cálculo, que al igual que el método exhaustivo o la integral, tiende al infinito. La manera más exacta de hacer estos cálculos infinitesimales, es con números logarítmicos y la diferencia entre las distintas iteraciones, es lo que se aproxima cada vez más a la medida de la forma del elemento arquitectónico de estudio. El promedio en el análisis de Bovil a la ‘Robbie House’, arroja una dimensión fractal  $D = 1.523$ . Si se saca la diferencia entre esta dimensión ‘D’ y la proporción aurea quedaría *Diferencia* →  $\{(D = 1.523) - (A = 1.618)\} = 0.095$ . Hay que mencionar, respecto a la utilización de las retículas de dimensión fractal, que desde el trabajo de Bovil y luego el de Ostwald y Vaughan: se logró formalizar el aprovechamiento en el uso de estas retículas y sus iteraciones. Esto dejó ver, en la presente investigación, una oportunidad para realizar otros análisis. Partiendo

de revisar el uso que se le ha dado a las retículas, en el diseño arquitectónico y en la arquitectura.

Las retículas se han utilizado de diferentes formas en la arquitectura, tanto en casos urbanos como el plano Damero, hasta en la configuración de la planta de un edificio como lo hizo Durand.<sup>64</sup> Quien utilizó la cuadrícula de base para sus retículas, con las cuales iba formando elementos arquitectónicos.

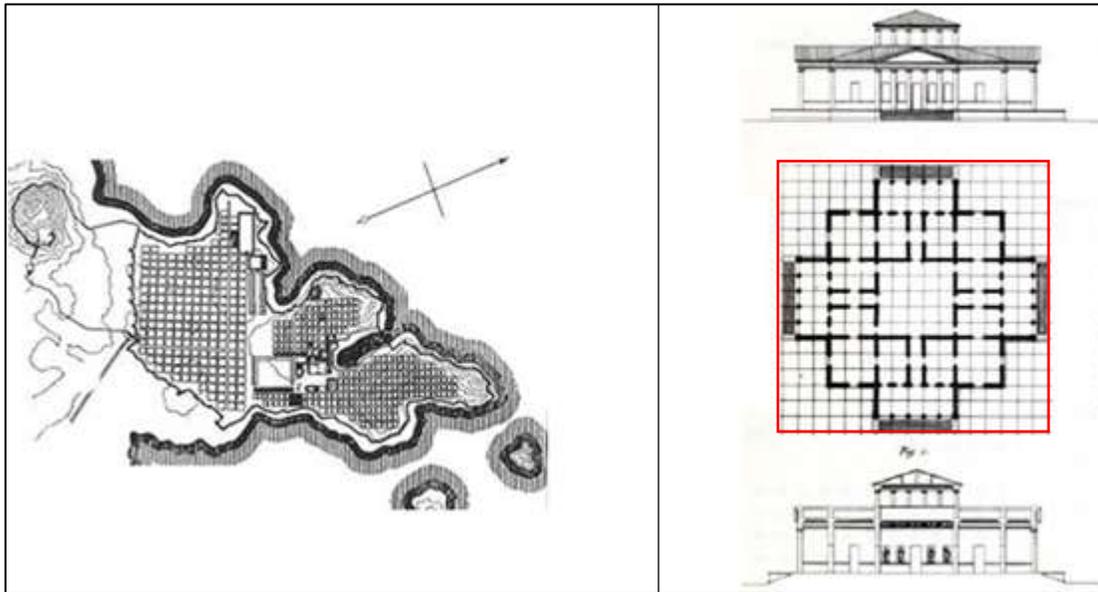


Fig. 15. Uso urbano y uso arquitectónico de las retículas. 'plan Hipodámico y Durand'. Imágenes.<sup>65</sup>

Ya que la geometría como técnica fue utilizada, desde la época arcaica, para medir y dividir la tierra. Se piensa que muy probablemente, la retícula es un sistema antecesor directo del sistema constructivo de poner hilos, para marcar el terreno. Ya sea heredado o no el plan hipodámico – hecho por el arquitecto Hipódamo de Mileto del siglo V a.C. –, es una muestra

<sup>64</sup> En el trabajo: “La geometría como mecanismo compositivo en la historia de la arquitectura: la retícula en la arquitectura moderna”. Hecho en la ‘Universidad Politécnica de Valencia: Escuela Técnica Superior de Arquitectura’, en el año 2016. (Ortín 17-21) ofrece una línea de tiempo muy interesante del uso que se ha dado de la retícula en la arquitectura. “Jean Nicolas Louis Durand: fue profesor de arquitectura a principios del siglo XIX en la École Polytechnique de París, donde redactó su tratado más importante sobre el método de proyectar la arquitectura: Précis des leçons d’architecture données à l’École Royale Polytechnique, en el que trataba de establecer un método práctico y estándar de proyección de la arquitectura basado en la composición reticular, de modo que pudieran emplearlo tanto ingenieros como arquitectos... Para llevar a cabo esta racionalización del proyecto, Durand basaba su método en una cuadrícula que sirviera como soporte gráfico sobre el que se organizaban los elementos arquitectónicos del proyecto,... Con la cuadrícula como base se forman figuras geométricas que no tienen entidad en sí mismas, lo que permite el desarrollo de los elementos formantes del conjunto del edificio, tal como patios, escaleras, etc.”

<sup>65</sup> Imagen 1.- Plan hipodámico o de damero. Wordpress. "Hipódamo de Mileto". 2012. [Wordpress.com](https://elartedelurbanismo.files.wordpress.com/2012/02/006-hipodamo-de-mileto.jpg). 2022 <<https://elartedelurbanismo.files.wordpress.com/2012/02/006-hipodamo-de-mileto.jpg>>. Imagen 2.- J. N. L. Durand. Combinaciones horizontales. Compendio de arquitectura. 1819. (Ortín 18).

de utilización de la retícula ortogonal, que a pesar de ser para trazar en un terreno pertenece a la rama del urbanismo. Por tal motivo “se puede considerar a Durand como el padre de esta malla ortogonal, que permite una regulación ordenada sobre la que levantar tanto edificios como elementos de éstos (muros, pilares...), así como la generadora y ordenadora de espacios” (Ortín 25). Prácticamente la retícula es un recurso técnico con el cual se puede dividir, segmentar, ordenar, disponer, etc., cada uno de los elementos arquitectónicos al configurar un edificio. Retículas símbolo de la modernidad:

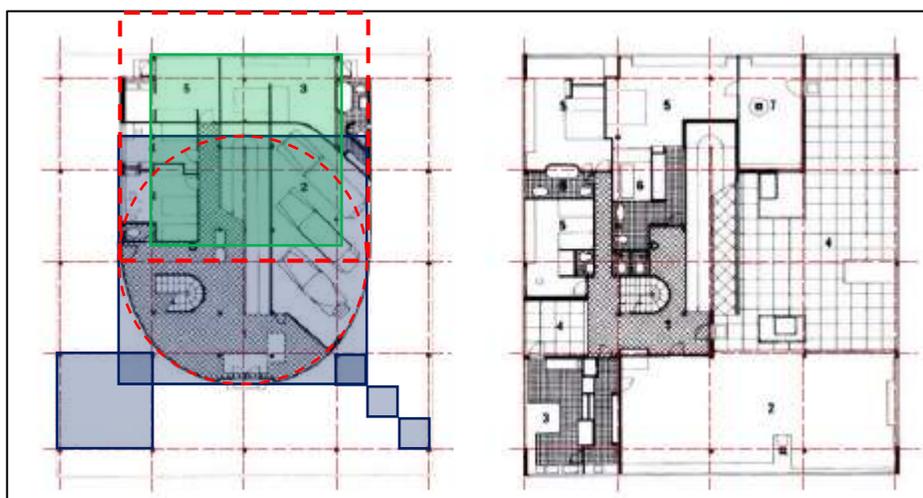


Fig. 16. Retícula de la Villa Savoye de Le Corbusier. Imágenes.<sup>66</sup>

Ya para la época de principios del Siglo XX, arquitectos como Le Corbusier,<sup>67</sup> hacían un uso técnico de las retículas para dimensionar sus diseños arquitectónicos y poder proyectar los edificios que querían. En las retículas utilizadas, ya se puede observar la dimensión fraccionaria, y el movimiento o deslizamiento de retículas de diferentes dimensiones. Pues no es más una retícula rígida e inamovible, sino que esta se divide a partir de una dimensión base, en este caso la combinación de la retícula y sus cerramientos, la cuadrícula para organizar y los cerramientos para generar espacios<sup>68</sup>. En las imágenes que presenta (Ortín),

<sup>66</sup> (Ortín 30, 32)

<sup>67</sup> “La esencia de la modernidad en el principio del siglo XX se puede relacionar principalmente con la planta libre, que surge de la combinación de la retícula y del cerramiento; se trata de dos elementos distintos, pero, a su vez, complementarios: la cuadrícula (repetitiva, homogénea e isótropa) es el elemento que organiza la estructura del conjunto y los cerramientos (únicos, finitos) son los generadores de espacios. Con esta idea de planta libre levantada sobre una cuadrícula, Le Corbusier realiza su propuesta de la estructura Dom-ino, donde la cuadrícula pasa a ser la responsable de la definición del proyecto... Tal como la definía Barry Maitland: ‘La estructura Dom-ino es usada como un marco de referencia ordenador de un sistema de paredes no portantes que definen el volumen específico del edificio’...” (Ídem 29).

<sup>68</sup> “A partir del siglo XX, la retícula se afianzó como un elemento emblemático de modernidad... En pintura, la retícula significa la autonomía del arte respecto al mundo natural. Sin embargo, en la arquitectura, la retícula sirve, al igual que buscaba Durand, como soporte geométrico de orden, un elemento que condiciona la

utilizadas en la figura anterior, es notable como la retícula en rojo es el elemento compositivo. A partir de este marco de referencia ordenador, los demás espacios, se configuran sobre una malla más pequeña o ‘fraccionada’. Así mismo por su parte Mies hacia un gran uso de la planta libre, utilizando la retícula como “elemento organizador de la estructura y cerramientos...”<sup>69</sup>

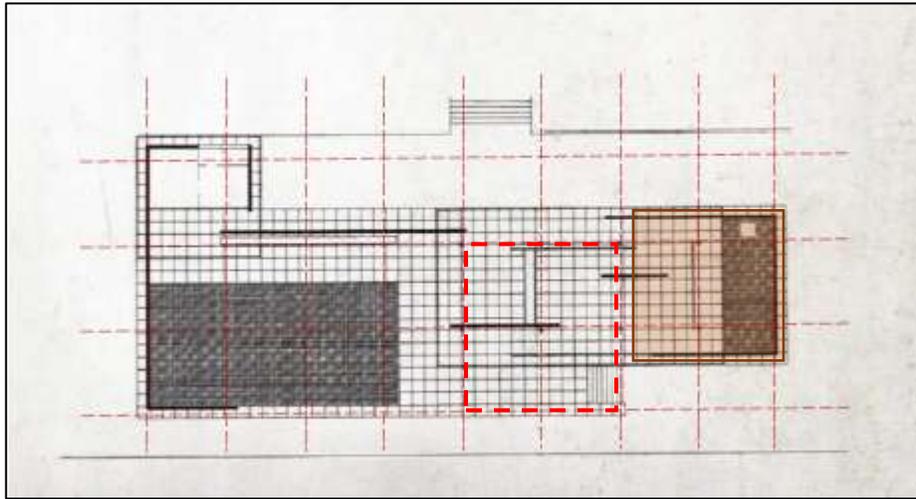


Fig. 17. Pabellón de Barcelona de Mies. (Ortin).

Así como en la retícula de la Villa Savoye de Le Corbusier, se marcó que el *panel 4 verde* coincide con cuatro casillas de la retícula. Y a partir del movimiento del *panel auxiliar azul marino* que encierra el círculo con el que se forma el arco y coincide con el ancho de la planta baja de la villa. En la gráfica de la planta del pabellón, se hizo una partición con rectángulos que se aproximan a la proporción aurea. En el cuerpo del patio, que recibe la entrada al Pabellón con un espejo de agua, el cual está al sur del edificio. Se utilizaron los *panel 2 rosa*, *panel 4 verde* y *panel 6 rojo*. Luego el otro rectángulo en el patio norte, en donde se ve un desfase hacia el sur, ahí donde está el cuerpo de entrada al edificio y las salas. Se utilizaron los *panel 1 azul*, *panel 3 naranja* y *panel 5 amarillo*. Con la utilización de los paneles, se demuestra cuantos rectángulos áureos de diferente dimensión, se perciben en la imagen. El

---

organización de los espacios del edificio y la combinación de los elementos arquitectónicos... Con esta idea de planta libre levantada sobre una cuadrícula, Le Corbusier realiza su propuesta de la estructura Dom-ino, donde la cuadrícula pasa a ser la responsable de la definición del proyecto...” (Ídem 27-34).

<sup>69</sup> “Mies van der Rohe un gran potenciador de la planta libre, usando la retícula como elemento organizador de la estructura y cerramientos... Todos los elementos están situados en función de una cuadrícula, que está representada únicamente en planta... En muchos de sus proyectos, esta retícula bidireccional está enfatizada por pilares cruciformes, indicando las dos direcciones principales... Por otro lado, la retícula de Mies está, a su vez, formada por una retícula menor de cuadrados dentro de la cuadrícula principal, se trata de submúltiplos...” (Ídem 31-33).

último rectángulo áureo enmarcado con un rectángulo en rayas punteadas de color rojo y fondo azul marino, es una transformación del rectángulo áureo formado con los paneles 1, 3, 5. Si bien no existe una ornamentación aparente, la ornamentación utilizada por Mies, es una ornamentación del tipo natural.<sup>70</sup> Que Vitruvio, describió se logra con la captación de elementos naturales dentro del edificio. Y la disposición y ordenación de elementos arquitectónicos logran esta característica, de utilizar áreas y volúmenes para lograr aprovechar los recursos naturales como la luz solar.

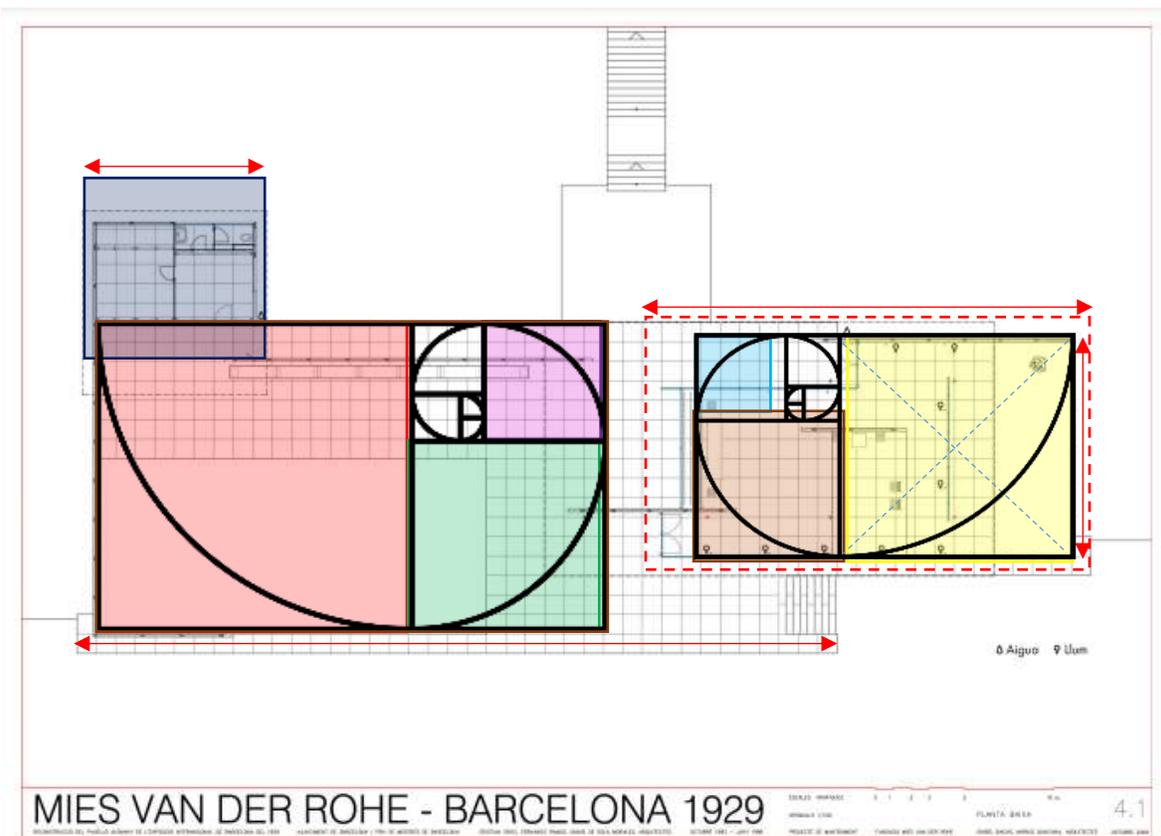


Fig. 18. La técnica de auto similitud en elementos arquitectónicos. Imagen<sup>71</sup>

En el plano se dan las condiciones adecuadas, para poder demostrar si existe la utilización de la regla de auto similitud o no. Las proporciones igualmente, dan una idea de la manera en que se relacionan dimensionalmente los segmentos, en este caso medidos con flechas.

$$FA_4 = 10.15, \quad FA_3 = 6, \quad FA_2 = 2.95, \quad FA_1 = 2.1$$

<sup>70</sup> (Vitruvio 33)

<sup>71</sup> Fundació Mies Van der Rohe Barcelona. "Plano planta". 2014. <https://miesbcn.com/es/el-pabellon/>. 11 Oct 2021 <<https://miesbcn.com/wp-content/uploads/2014/04/planol-planta.pdf>>

$$\text{Proporción 1} = \frac{10.15}{2.1} = 4.83$$

$$\text{Proporción 2} = \frac{10.15}{2.95} = 3.44$$

$$\text{Proporción 3} = \frac{10.15}{6} = 1.69$$

$$\text{Proporción 4} = \frac{6}{2.95} = 2.03$$

$$\text{Proporción 5} = \frac{6}{2.1} = 2.85$$

$$\text{Proporción 6} = \frac{2.95}{2.1} = 1.40$$

El Pabellón de Barcelona, enseña lo que Viollet-le-Duc veía como lo que captura la unidad en la experiencia de la arquitectura, a través de un filtro histórico.<sup>72</sup> Los dibujos de Mies tenían que: “la misma gramática constructiva se utilizaba para los talleres, para la central térmica, para la capilla”.<sup>125</sup> La utilización de otras retículas, construidas imitando a las formas de la naturaleza, donde se hace un uso extraordinario de la dimensión fraccionaria. Se encuentra en lo visto con arquitectos como Wright,<sup>73</sup> quien mostró a manera de logro, la creación de nuevas expresiones de diseño arquitectónico. Surgidas de composiciones reticulares que cambian en forma y dimensión, ya sea para la construcción de los espacios interiores o exteriores de un edificio y sus cambios dimensionales. Esto hace, de estos proyectos arquitectónicos, espacios arquitectónicos de geometría multidimensional.

---

<sup>72</sup> “Yet it was during those years that his efforts at restoring the past were first initiated in the development of a pictorial approach for capturing the unity of architectural experience through the historicist filter”. (Bressani 45).

“Sin embargo, fue durante esos años que sus esfuerzos por restaurar el pasado, fueron iniciados por primera vez en el desarrollo de un enfoque pictórico. Para capturar la unidad de la experiencia arquitectónica a través de un filtro histórico”.

<sup>73</sup> “Wright empleó como recurso la geometría... especialmente el uso de la retícula, que la reinterpretó de forma ingeniosa y experimentó con numerosas combinaciones para intentar lograr el sistema más ideal para el diseño del espacio... Wright utilizaba la retícula de un modo similar al de Le Corbusier y Mies, ya que le servía como trazado de sus plantas, destacando el espacio interior de forma que fuera amplio, similar a la planta libre... Esta trama está “orgánicamente” unida a la construcción, ya que será la definitoria de los elementos estructurales y definirá los límites del espacio. Se trata de una trama de cuadrados de mismo tamaño y geometría que aúnan construcción y morfología... Sin embargo, el tratamiento que Wright hace de la retícula es mucho más interesante que el que hacen sus coetáneos, ya que Wright experimenta con todas las posibilidades que se le pueden dar a este sistema...” (Ortín 37-41).

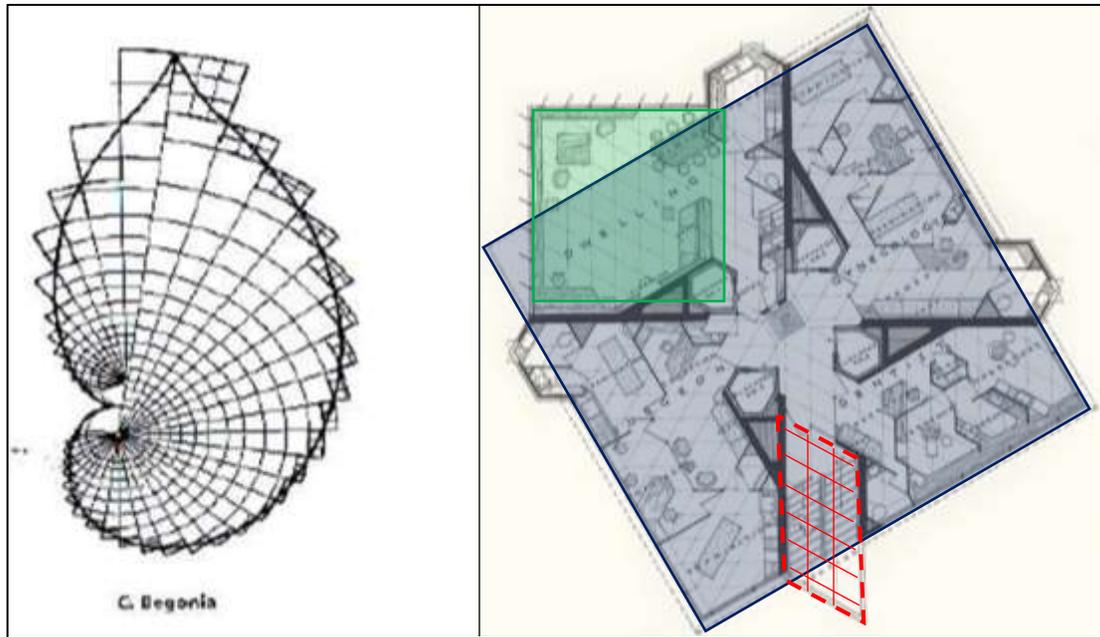


Fig. 19. Línea de tiempo cambio de dimensión de las retículas. Imágenes.<sup>74</sup>

Al grado que se puede observar una función iterativa, muy similar a la utilizada por los dibujantes de objetos de la naturaleza, al dibujar una hoja de alguna especie específica de planta. Cada cuadro es de tamaño diferente, es una iteración diferente con particiones diferentes, que buscan la forma final<sup>75</sup> adaptándose en tamaño y ubicación. Después de estas expresiones, luego se dio, un cambio en el uso de la retícula. A mediados del siglo XX sufriría un cambio interpretativo realizado por Kahn<sup>76</sup>, quien consideraba la retícula, como un elemento generador de espacio. La partición de su retícula, muestra una retícula, lograda con pausas entre cuadros pequeños. Una fila con una columna, luego deja una pausa y repite la fila y la columna, todas con las medidas del ancho y largo del cuadro menor.

<sup>74</sup> Imagen 1. (Doczi 12). Imagen 2. Archdaily. “The tree that escaped the crowded forest: Lessons from Frank Lloyd Wright’s the Price Tower”. 25 Mar. 2021. [Archdaily.com](https://www.archdaily.com/tag/frank-lloyd-wright). 15 Mar. 2022 <<https://www.archdaily.com/tag/frank-lloyd-wright>>

<sup>75</sup> Por ejemplo, esta experimentación que hacía Wright: “comenzando por la utilización del ángulo recto, se trata de la Casa Johnson, donde la planta está diseñada por una superposición de cuadrículas...” (Ortín 37-41).

<sup>76</sup> “Durante la segunda mitad del siglo XX se hace una reinterpretación de la arquitectura, que viene de la mano del arquitecto Louis Kahn..., quien recibió una influencia de Beaux-Arts, buscó una nueva forma de entender la modernidad..., considera la retícula como generador de espacio, incluyendo una habitación en este espacio. Al igual que pasaba con la retícula de Durand, así como en la de Mies y Le Corbusier, esta cuadrícula geométrica es definida por líneas ilimitadas y puntos de intersección de estas líneas, dando lugar a los pilares, tal y como ha ocurrido hasta entonces. Sin embargo, la innovación introducida por Kahn fue la eliminación del espacio continuo e ilimitado para sustituirlo por un conjunto de espacios contenidos en habitaciones, lo que da lugar a un espacio discontinuo; es decir, el edificio se trata de una serie de recintos limitados definidos como áreas propias...”. (Ídem 47-48).

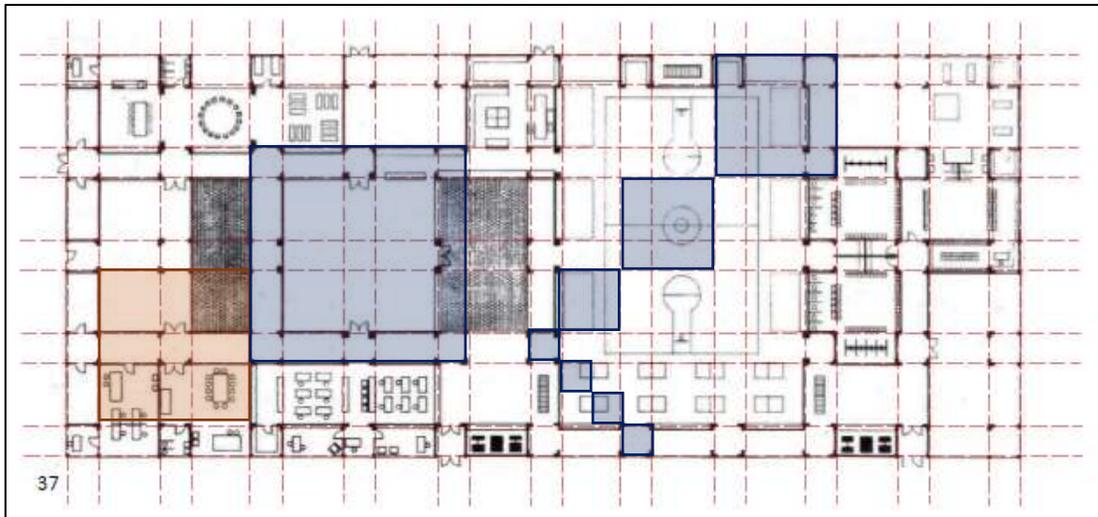


Fig. 20. Louis Kahn y sus principios ordenadores. Imágenes.<sup>77</sup>

En la imagen siguiente, la cuadrícula de la retícula, coincide con los paneles:

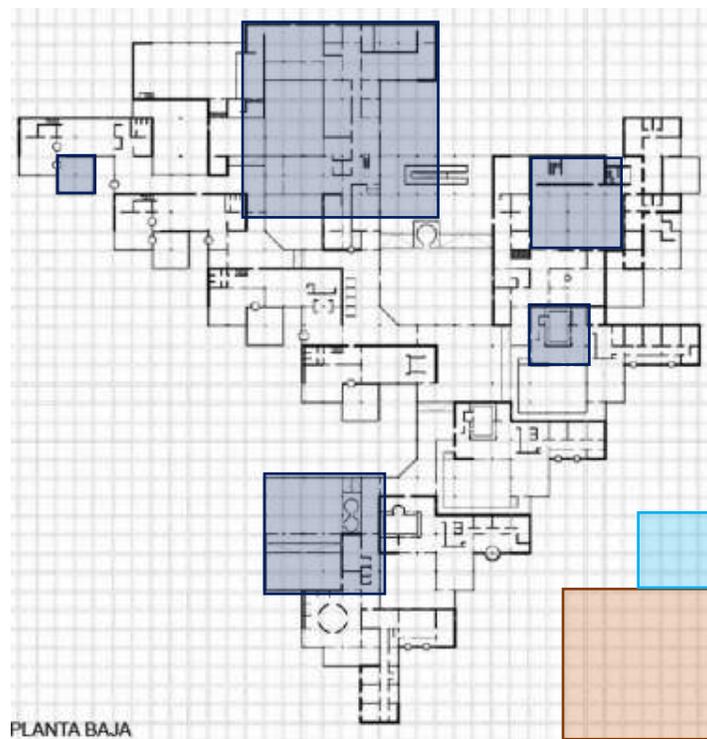


Fig. 21. Aldo van Eyck. "edificio de orfanato".

Posteriormente unos años más tarde, apareció el concepto de los mat-buildings,<sup>78</sup> edificios con estructura en forma de matriz geométrica. Buscando dejar un diseño arquitectónico y/o

<sup>77</sup> Imagen 1.- "Loius Kahn: Centro para la comunidad Judía, Trenton New Jersey. 1957. Planta. (Ídem 54). Imagen 2.-"Aldo van Eyck. Orfanato de Ámsterdam, Holanda. 1960. Planta baja esquema reticular. (Ídem 62).

<sup>78</sup> "Esta tipología de edificio surge en los años cincuenta y sesenta del siglo XX a raíz de desacuerdos entre los miembros del CIAM. Los mat-building son una serie de edificios modulares que surgen de una matriz

construcción abierta a un crecimiento ilimitado. En el edificio de Orfanato diseñado por Aldo van Eyck, argumenta (Ortín) tiene una planta que está basada en una organización fractal, llamada ‘curva de dragón’. Es imprescindible hacer notar, es que esa organización fractal, al igual que las estructuras como la curva ‘The Koch’: son estructuras de geometría clásica con detalles de cualidad fractal. Pues aun no pertenecen a la geometría fractal descubierta por Mandelbrot, en la figura “edificio de orfanato”, la retícula es de una sola dimensión coincide con un *panel 1 azul y panel 3 naranja*. Ahora las retículas de dimensión fractal, se diferencian por las iteraciones, se explica el análisis hecho con la casa Robie.<sup>79</sup> Donde Bovil utiliza la dimensión de las celdas: “the box counting method grid size”, que se caracteriza por ser un método iterativo. Esta técnica se puede aplicar, incluso, con perspectivas de diferentes partes del edificio.<sup>80</sup>

En el dibujo de la casa “Robbie House”, se hace el conteo de celdas ocupadas, considerando que en cada iteración, hay mayor número de celdas y de menor tamaño. En el caso de la retícula con celdas (8, 16), es decir tamaño 8 y número de celdas igual a 16, la figura de la casa ocupa espacios en todas las 16 celdas. Luego en la retícula con celdas (16, 50) la figura solo ocupa 50 celdas de entre un total de 64. En la siguiente (32, 140) ocupa 140 de un total de 256, luego (64, 380) ocupa 380 de un total de 1024. Finalmente estos datos, acomodados en la ecuación de la dimensión “D” y según la investigación de Michael J. Ostwald,<sup>81</sup> el promedio de los resultados se aproxima a la dimensión “D” calculada. El análisis realizado por Bovil de la “Robbie House”, arroja una dimensión fractal  $D = 1.523$ . Para mejorar el entendimiento de esta técnica, la más difícil de entender, por su característica matemática. Bovil explica que el tipo de reproducción, que se da en la geometría fractal es

---

geométrica abierta (trama, retícula, malla) cuya característica principal es la búsqueda del crecimiento ilimitado, de tal modo que al edificio puedan agregarse nuevos módulos dentro de la retícula infinita... Estos nuevos sistemas son los que crean los miembros del Team X: los mat-buildings, que cuentan con morfologías con capacidad de crecimiento y son adaptables a múltiples programas, rompiendo con la idea de edificios definitivamente acabados..., este proyecto se puede considerar la aparición de los primeros edificios-estera. Se trata de un Orfanato diseñado por Aldo van Eyck entre 1955 y 1960. La manera de Van Eyck de interpretar esta nueva idea de edificios capaces de expandirse, le lleva a un proyecto basado en una planta de organización fractal, la llamada ‘curva de dragón’... Es un elemento lineal que se va enrollando sobre sí mismo, entrelazando actividades, formado por una retícula de cuadrados que va tapizando el plano con entrantes y salientes, y que da lugar a lo que él definía como – *claridad laberíntica* –” (Ortín 57-62).

<sup>79</sup> “The range of scales to use in the measurement of the fractal dimension of an architectural composition is also very important”. (Bovil, *Fractal Geometry in Architecture and Design* 118).

“El rango de escalas, para usar en la medición de la dimensión fractal de una composición arquitectónica, también es muy importante.”

<sup>80</sup> (J. M. Ostwald 240)

<sup>81</sup> (J. M. Ostwald 46-50).

fraccional, por eso está presente en la arquitectura. Para experimentarlo, se toman dos imágenes de edificios y se realiza el cálculo de dimensión fractal:

1.- La Catedral Metropolitana de Managua, 1993.<sup>82</sup> Su conjunto presenta detalles de cualidad fractal, asociados a la técnica de auto similitud o “Self Similarity”.

2.- Fachada Museo Guggenheim Bilbao, 1997.<sup>83</sup> Representa el uso de la geometría fractal de formas caóticas. Son edificios fractales llamados escultura por sus formas.<sup>84</sup>



Grafica 4. Fuente: elaboración propia, obras arquitectónicas y formas de la naturaleza.

Solo se hacen dos iteraciones, con el fin de mostrar la manera en la que se usan, las retículas de dimensión fractal. La finalidad principal es hacer notar, que es un método iterativo, lo

<sup>82</sup> El conjunto del edificio tiene una serie de cúpulas, que son de interés por sus detalles de cualidad fractal, asociados a la técnica de auto similitud. Fuente imagen: Legorreta. “Proyecto Catedral de Managua” 1993. [Legorreta.mx](https://www.legorreta.mx/es/proyecto-catedral-de-managua#pid=5). 11 Ene. 2019 <<https://www.legorreta.mx/es/proyecto-catedral-de-managua#pid=5>>

<sup>83</sup> En las formas caóticas de este edificio, asociadas a una flor, el arquitecto Frank Gehry observó el contexto de Bilbao, una ciudad de industria metalúrgica. “El Museo Guggenheim de Bilbao, que es en el contexto de la arquitectura, entendida como espectáculo. La arquitectura pues, en lo que tiene de componente escultórico, pero también de ícono emblemático...” (Fundación Juan March “El Guggenheim de Bilbao: arquitectura y espectáculo | Luis Fernández-Galiano”. Min. 0:25- 0:50).

<sup>84</sup> El arquitecto pensando en el clima de Bilbao no creía conveniente hacer de acero la fachada y pensó en el titanio pero este es lo doble de caro... Luego entonces hubo una oferta de este material y fue su oportunidad única e irreplicable. “A lot of titanium comes from Russia, and that month the russians dumped a lot of titanium on the market at a low price...” (Isenberg 148-162).

“Mucho del titanio viene de rusia, y ese mes los rusos movieron en el mercado mucho titanio a bajo costo”. (Trad. Propia).

Fuente imagen. Guggenheim, Bilbao. “El Museo Guggenheim de Bilbao: El Edificio”. 1997. Guggenheim-Bilbao.eus. 5 Feb. 2019 <<https://www.guggenheim-bilbao.eus/el-edificio>>

cual exige la utilización de varias copias de la misma imagen. Sobre de las cuales, se van sobreponiendo las nuevas iteraciones, de las retículas de dimensión fractal. Estas tienen la característica de seguir la regla de *auto similitud*, pues siempre tienen el mismo perímetro, pero el número de casillas cambia.

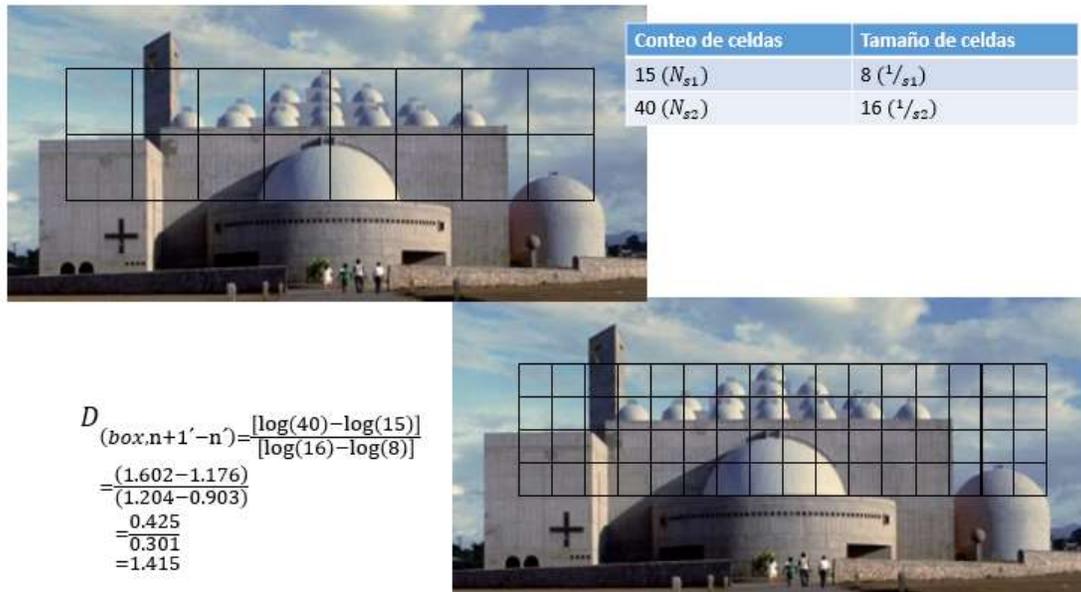
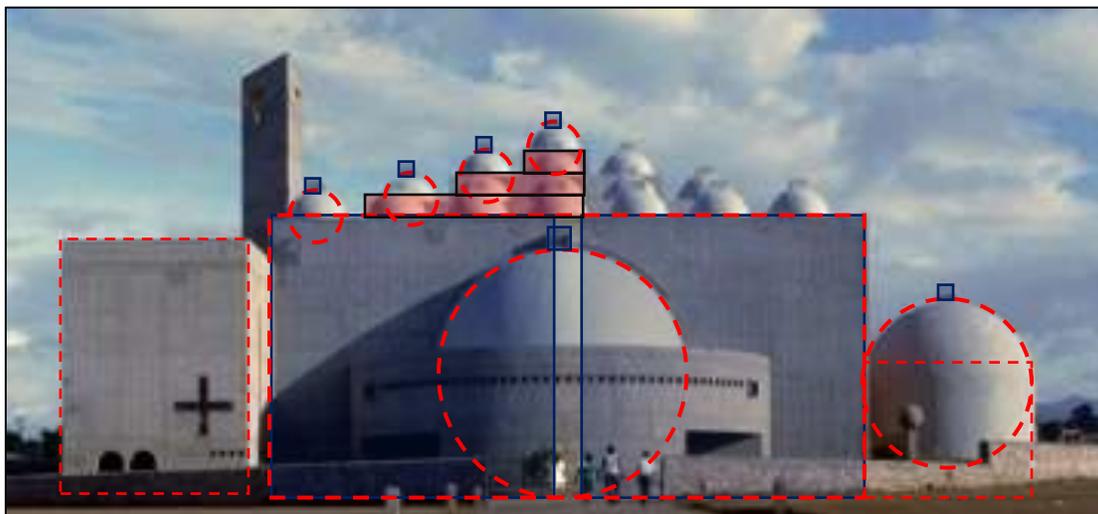


Fig. 22. Cálculo 1 de dimensión fractal en una porción del edificio. Fuente: Elaboración propia.

En apenas dos iteraciones, el número de casillas ocupadas, capturan diferentes detalles de la imagen estudiada, de manera gráfica las iteraciones dan datos acerca de la composición.



Gráfica 5. Análisis geométrico 1, utilizando el cálculo de la dimensión fractal.

Nuevamente se refuerza el argumento del método iterativo de las retículas de dimensión fractal, porque se puede aproximar la forma estudiada, a un nivel gráfico de punto por punto.

Lo cual sirve para el dibujo plano y en perspectiva, pero es independiente de un análisis geométrico, pues la perspectiva esta correlacionada directamente con el cambio y transformación de la forma geométrica canónica. Por eso en el análisis geométrico de una obra de arquitectura: se necesita el perfil plano de la figura sin deformaciones. El resultado es que cada cuadro o figura geométrica tiene su propia retícula, de la manera siguiente:

- 1.- La retícula encierra la imagen de interés, con una retícula rectangular o cuadrada que cubra la imagen y con un perímetro que es constante entre iteraciones.
- 2.- Del conteo de casillas, se toma una casilla individual para analizar, con esta se puede hacer la retícula de la forma arquitectónica.

La ‘Catedral Metropolitana de Managua’, en la sección analizada, da de resultado una dimensión fractal  $D = 1.585$ . Esos puntos miden la forma, según la introducción del libro ‘The Fractal Dimension of Architecture’,<sup>85</sup> donde se reconoce que el uso de la geometría fractal en la arquitectura: es una ciencia compleja. Por su parte, Peter Eisenman, mencionó<sup>86</sup> en “Moving Arrows, Eros and other Errors” del año de 1985. Un discurso, donde fundamenta el argumento de que; el uso de la discontinuidad; la recursividad; y la reproducción de la figura de origen, en diferentes dimensiones o regla de ‘auto similitud’, son técnicas de la geometría fractal. Así el análisis de dimensión fractal<sup>87</sup> de la arquitectura, ofrece posibilidades para construir las retículas de cada forma encontrada, utilizando el método de exhaustión geométrica. Por ejemplo una forma geométrica icónica, se puede modelar con retículas complejas, en la fase de diseño arquitectónico. Esto pasó con el ‘Guggenheim de Bilbao’, el cual fue posible de construir, gracias a que se tenían todos los detalles de la forma

---

<sup>85</sup> “This book describes a unique way of measuring, analyzing and comparing buildings using fractal dimensions”. (J. M. Ostwald).

“Este libro describe una forma única de medir, analizar y comparar edificios utilizando dimensiones fractales”.

<sup>86</sup> (Sherif. Ezzeldin 42)

<sup>87</sup> “The box-counting method for determining the fractal dimension of an image is probably the best-known approach, in any discipline, for quantifying characteristic visual complexity. This method has been studied extensively... The particular version of the box-counting approach that has typically been used in almost all architectural and urban analysis is known by scientists and mathematicians as the ‘basic’ or ‘naïve’ version, because it uses the base mathematical process without any optimization or refinement...” (J. M. Ostwald).

“El método de conteo de cajas para determinar la dimensión fractal de una imagen, es probablemente el enfoque más conocido, en cualquier disciplina, para cuantificar características visuales complejas. Este método ha sido estudiado extensamente... La versión particular del método de conteo de cajas que se ha usado típicamente en casi todos los análisis arquitectónicos y urbanos es conocida por científicos y matemáticos como la versión ‘básica’ o ‘ingenua’, porque usa el proceso matemático base sin ninguna optimización o refinamiento”. (Trad. Propia).

geométrica en computadora. Tanto de la estructura y de los espacios arquitectónicos exteriores e interiores.

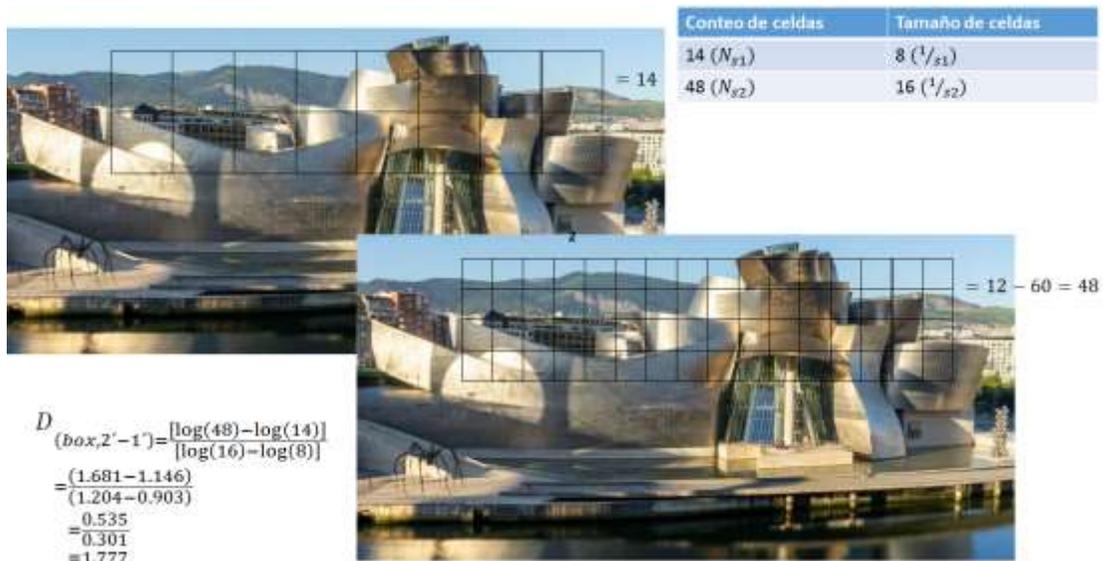


Fig. 23. Cálculo 2 de dimensión fractal en una porción del edificio. Fuente: Elaboración propia.

Las retículas iteradas, ejemplifican muy bien, el cambio multidimensional. Un recurso muy utilizado, de manera mental, por los arquitectos que dibujan de forma maestra. Además, es un principio básico de diseño, de la arquitectura fractal de formas caóticas o complejas. Que se favoreció con el manejo del espacio multidimensional, gracias a las computadoras, sin embargo hay arquitectos que pueden dibujar a pulso detalles multidimensionales y varios cambios de perspectiva. Lo cual les permite reproducir tanto una obra que tienen enfrente, de la misma manera en la que también pueden hacer el diseño arquitectónico, de una que tienen en la mente. En cuestión, hablar del dibujo y del diseño arquitectónico, hechos utilizando el espacio multidimensional es notable porque: no cualquiera alcanza a tener este tipo de habilidad.<sup>88</sup> Se observó que el grabado es una de esas técnicas de dibujo multidimensional, los frontispicios de los libros de arquitectura, desde el Renacimiento ya incluían muestras de grabados en sus portadas. Con esta técnica de dibujo, que a su vez es muy equivalente a lo que se hace en un material como la roca, al esculpir figuras en una columna y en sus ornamentos. Se está trabajando volumétricamente.

<sup>88</sup> “El dibujo se convierte, digamos en su seña de identidad...”. Min. (8:50-8:54). Aquí el conferencista habla sobre Norman Foster y su don del dibujo. Luego hace referencia a las habilidades de dibujo de Richard Rogers con quien fue socio una temporada: (“Es incapaz de dibujar...”). Min. (14:17-14:37). (Fundación Juan March. “Norman Foster | Luis Fernández-Galiano”). Con esta cita se quiere hacer notar que dibujar es una labor dura.



Gráfica 6. Análisis geométrico 2, con el cálculo de la dimensión fractal.

La técnica de la geometría fractal utilizada en la arquitectura, tiene muchas vertientes e hipótesis,<sup>89</sup> en el edificio del Guggenheim de Bilbao. Se marcaron con líneas punteadas rojas algunas curvas de los espacios exteriores, el conteo de cajas ‘Box Counting Method BCM’, da detalles de la forma. No obstante, es un trabajo complejo, en los elementos arquitectónicos individuales o sobre todo el edificio. Pues las curvas no tienen simetría aparente, son más de carácter caótico. Parte de la conclusión, del trabajo que se hace con el cálculo de la dimensión fractal, en obras de arquitectura. Es que este método se puede aplicar sobre cualquier imagen, el resultado es obtener casilla por casilla detalles de la obra, hasta el punto de tener un escaneo de la forma arquitectónica. Inclusive también es aplicable a diferentes tipos de edificios,<sup>90</sup> en realidad no se tiene un límite, pues se pueden aproximar las formas de la naturaleza. Aquí el mérito es que con esta teoría se obtiene una técnica, basada en el método iterativo aplicado en retículas.

**Cuarta teoría.** Esta es la cuarta relación que se encontró, hay entre la arquitectura y la geometría fractal. Los edificios como el Guggenheim de Bilbao y sus formas fractales:

---

<sup>89</sup> Bovil también menciona diferentes aplicaciones a las que se les ha dado uso a partir del descubrimiento y uso de la geometría fractal en la arquitectura. “Deconstruction would be better expressed through the use of fractal planning. Actually some of what Tschumi wrote about Pare de la Villette in *Architectural Design: Deconstruction in Architecture suggests fractal images*”. (Bovil, *Fractal Geometry in Architecture and Design* 176).

“La deconstrucción puede ser mejor expresada, a través del uso de una planeación fractal. En realidad algo de lo que Tschumi escribió sobre Parque de la Villette en su diseño arquitectónico es: ‘La deconstrucción en arquitectura sugiere imágenes fractales’.

<sup>90</sup> (Gurung 66). “A Case Study: Perspective Fractal Analysis Robbie House”. (fig. 25).



Fig. 24. ‘Las formas del Guggenheim de Bilbao y Arm’s Storey Hall, Melbourne’. Fuente: Collage elaboración propia, imágenes.<sup>91</sup>

Estos inspiraron muchas otras obras, que cuentan en sus espacios, con formas fractales caóticas y/o complejas.



Fig. 25. Federation Square. Fuente imagen.<sup>92</sup>

Así fue que el uso de las formas fractales en la arquitectura se empezó a utilizar, es decir los arquitectos, utilizaron la geometría fractal de forma explícita en el diseño arquitectónico y la construcción de algunos de sus edificios. De ahí, hasta la construcción de edificios diseñados por computadora, como el “Guggenheim de Bilbao” o el “Federation Square” de Australia.<sup>93</sup>

<sup>91</sup> Guggenheim Bilbao. “El Edificio”. 1997. Frank Gehry. 02 Ene. 2020 <<https://www.guggenheim-bilbao.es/el-edificio>> y. Foto de: Biatch. “Green building swanston street Melbourne” 9 Oct. 2006 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green\\_building\\_swanston\\_street\\_melbourne.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_building_swanston_street_melbourne.jpg)>

<sup>92</sup> FED.SQ. “The Federation Square Melbourne”. Jun. 2015. Creative Victoria. 10 Ene. 2021 <<https://fedsquare.com/about>>

<sup>93</sup> Sherif, Lobna. Ezzeldin, Sherif. “Fractal Geometry in Architecture: From Formative Idea to Superficial Skin Design”. 2014. Conference Paper. Arab Academy for Science, Technology & Maritime Transport, Cairo. 29 Mar. 2021 <<https://www.researchgate.net/publication/326033004>>

Donde se puede ver, en sus espacios exteriores – fachada –, las figuras fractales construidas con la técnica de *auto similitud* de triángulos.



Fig. 26. Federation Square Australia: Atrium & environmental analysis. (Sherif. Ezzeldin).

En el trabajo de Lobna Sherif, se expone como la construcción del Federation Square, fue realizada a partir de un análisis y diseño con geometría fractal. La forma incluso fue hecha explícitamente para regular el medio ambiente al interior del atrio y menciona incluso que el diseño fractal y los materiales actúan como una chimenea térmica. En otras obras, el museo Guggenheim de Bilbao de Frank Gehry, por ejemplo. En el que investigaciones como Vyzantiadou; reconoce a las formas fractales extravagantes que se encuentran en el edificio: hay “26 auto-reproducciones similares de los pétalos de una ‘flor de metal – independientemente de sus materiales –’ que son desdoblados, retorcidos y curvados generando una geometría formal y espacial”.<sup>94</sup> En el edificio del Arm’s Storey Hall en Melbourne, se distinguen los patrones pentagonales metálicos que forman un sistema de auto-organización simultáneamente caótico, tanto en el espacio interno como en el externo. En la construcción del Guggenheim de Bilbao: “gracias a estos planos de CATIA – software computacional – realizados con esta tecnología de la industria aeronáutica, pudo no solamente dibujar, sino encargar toda la fabricación de los elementos metálicos de la estructura, sin apenas errores”.<sup>95</sup>

Evidentemente si hay una diferencia, un rasgo y una técnica para poder diseñar edificios de arquitectura fractal, así como la hay para añadir elementos clásicos a la arquitectura contemporánea. Por eso Michael J. Ostwald y Josephine Vaughan en *The Fractal Dimensión of Architecture*,<sup>96</sup> al analizar ochenta y cinco casas icónicas de la arquitectura con el método de retículas de dimensión fractal. Especifican que los resultados del análisis son cualitativos

<sup>94</sup> (Vyzantiadou 52).

<sup>95</sup> (Fernández-Galiano. El Guggenheim de Bilbao: “arquitectura y espectáculo”). Min. (50:43-51:04)

<sup>96</sup> (J. M. Ostwald).

(solo se observan las propiedades que hacen a estas casas especiales).<sup>97</sup> Esto permitió comprender los antecedentes en el uso de las retículas y el grado de ajuste por iteración, que permite la retícula fractal, para buscar la forma. Parecido a lo visto en el diseño de la ‘Palmer house’, con la utilización de una retícula multidimensional triangular.



Fig. 27. Ópera de Sidney y sus formas. Imagen.<sup>98</sup>

El uso de las retículas, en el caso de la arquitectura de formas complejas o caóticas, tiene la característica de hacerse con volúmenes. Desde una base canónica construida con retículas tridimensionales, de ahí se obtiene un entendimiento multidimensional de la forma, inclusive aunque solo se trate de imaginar posibilidades...<sup>99</sup> Ese es el motivo por el cual en la arquitectura además de la proyección y/o construcción, se contempla el problema de diseño arquitectónico, ahí es donde nacen las ideas. Todo esto relacionado con la forma arquitectónica, que en la etapa de diseño, permite hacer muchas propuestas con los elementos arquitectónicos. Ya sea el diseño con geometría fractal;<sup>100</sup> el análisis con una simulación; y hasta los comportamientos de la forma arquitectónica, ante variables climáticas; así también

---

<sup>97</sup> "..., the eighty-five houses analyzed in this book are understood almost exclusively in qualitative terms. That is, the properties that make them special or significant are documented and communicated using textual descriptions, supplemented by photographic or graphic media". (J. M. Ostwald 1-2).

<sup>98</sup> "..., las 85 casas analizadas en este libro son entendidas exclusivamente en términos cualitativos. Esto es, las propiedades que las hace especiales o significativas se documentan y comunican usando descripciones textuales, adicionalmente por fotografías o medios gráficos". (Trad. Propia).

<sup>99</sup> Commonwealth of Australia. "Ópera de Sidney". 2007. [Unesco.16 Jul. 2021 <https://whc.unesco.org/es/list/166>](https://whc.unesco.org/es/list/166)

<sup>100</sup> Cénotaphe a Newton by Étienne-Louis Boullée.

<sup>100</sup> (Sherif. Ezzeldin 43-47). Fuente imágenes de la 'figura 28': <[https://www.researchgate.net/publication/326033004\\_FRACTAL\\_GEOMETRY\\_IN\\_ARCHITECTURE\\_FROM\\_FORMATIVE\\_IDEA\\_TO\\_SUPERFICIAL\\_SKIN\\_DESIGN](https://www.researchgate.net/publication/326033004_FRACTAL_GEOMETRY_IN_ARCHITECTURE_FROM_FORMATIVE_IDEA_TO_SUPERFICIAL_SKIN_DESIGN)>

se pueden revisar aspectos de la luz solar, la iluminación y el calor (pues la luz solar, es un conductor de calor y fuente de energía y vitaminas para las células del cuerpo humano).

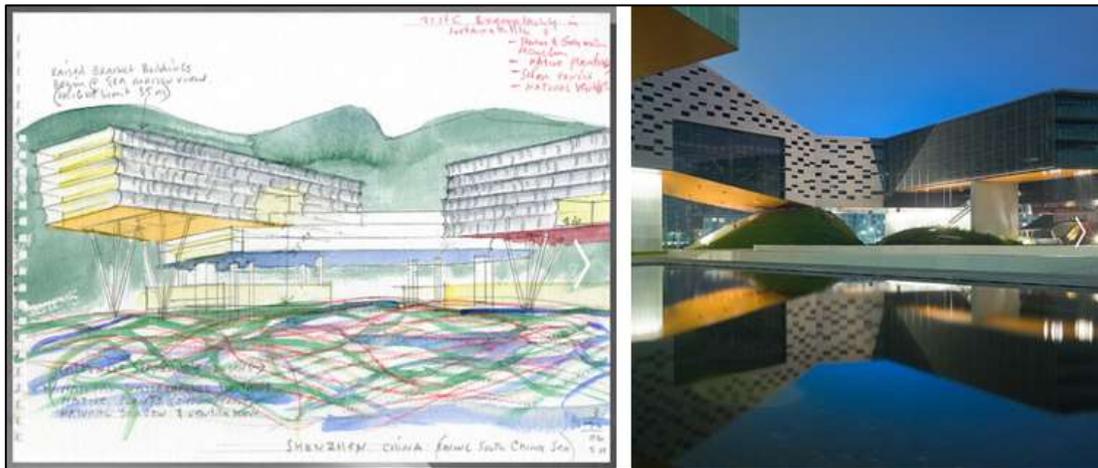


Fig. 28. Diseño y obra arquitectónica fractal. Imágenes.<sup>101</sup>

En estos casos se hace uso del espacio multidimensional, el arq. Eisenman, lo hizo usando explícitamente ‘la idea de la geometría fractal de Mandelbrot’.<sup>102</sup> Adoptando una nueva técnica geométrica arquitectónica, con la que se empezó a diseñar y después a construir edificios. Las aproximaciones de la forma arquitectónica, se hacen sobre el elemento arquitectónico; pueden ser muros, perfiles, vigas, tubos, ventanas, puertas, etc.; elementos con los que se construye el edificio. Cuando la forma de la arquitectura tiene cambios de dimensiones variados y/o aleatorios, es decir, que la forma no sigue ningún patrón o es compleja. Con esta técnica de la arquitectura fractal de formas caóticas se estudia, diseñar o construyen estos detalles fractales. Por ejemplo, pueden ser formas caóticas o formas a las que se llega, a partir de la técnica deconstructiva. Esta técnica y su aparición se relacionan de alguna forma, también con Eisenman y Jaques Derrida<sup>103</sup> y “la posible culminación de la fascinación de Eisenman por la arquitectura fractal, con el proyecto Choral Works”.

<sup>101</sup> Steven Holl. “Horizontal Skyscraper – Vanke Center”. Shenzhen, China 2009 Steven Holl Architects. 12 Ene. 2021 <<https://stevenholl.com/projects/vanke-center?>>

<sup>102</sup> (Ross, Neil. Michael, Schwarz. Bill, Jersey. “Fractals: Hunting the Hidden Dimension”). Min. (14:55 – 21:32).

<sup>103</sup> “Perhaps the culmination of Eisenman’s fascination with fractal architecture is the project Choral Works, which Eisenman designed with the assistance of the philosopher Jacques Derida... In this project, actually not a building but a small garden, both time, in the form of precedents, and space, as a dislocation of Le Corbusier’s rediscovered Venetian hospital, are self-referential and are present in a variety of controlled iterations... Eisenman claims that ‘at each scaling [of the design] aspects of the changes in time, changes in rivers, borders, etc., are introduced’... Scaling, self-similarity and self-referentiality are all present in Choral Works.”. (Ostwalt, Michael J. “Fractal Architecture” 76).

Eisenman al respecto dice que el escalamiento, la auto-similitud, y la auto-referencia están todas presentes en Choral Works de 1985. Este trabajo es posterior al de Parc de la Villette del año de 1982, uno de los primeros complejos considerados de arquitectura deconstructivista. Sin embargo, Parc de la Villette, fue construido por el arquitecto Bernard Tschumi. A pesar de esto, Tschumi antes de construir la Villette, invitó a participar en la construcción de un jardín a Peter Eisenman. Quien a su vez, propuso al filósofo post-estructuralista Jacques Derrida – aunque ese proyecto no se concretó –. Es evidente, en la Villette, que Tschumi mostró ese sentimiento apegado a la fragmentación de formas arquitectónicas.

En estos tiempos el movimiento constructivista ruso proponía la idea de “construir nuevas estructuras arquitectónicas que sirvan a su tiempo”. Así el surgimiento del deconstructivismo, lo menciona Tschumi, es un movimiento que quiere liberar a la arquitectura de las reglas de la arquitectura moderna.<sup>104</sup> Incluso al comparar los proyectos de Parc de la Villette y Choral Works, se pueden ver elementos de esta técnica deconstructiva de Parc de la Villette, en el trabajo de Choral Works. Esta pausa tan grande dedicada al deconstructivismo, es para hacer notar este es una técnica fractal, la cual se puede clasificar dentro de la teoría cuatro. Formas arquitectónicas fractales caóticas o complejas.

---

“Quizás la fascinación de Eisenman por la arquitectura fractal culminó con el proyecto Choral Works, que Eisenman diseñó con la ayuda del filósofo Jacques Derrida... En este proyecto, en realidad no un edificio, pero un pequeño jardín. Ambos tiempos, en la forma de precedentes y espacio, como una dislocación del redescubierto hospital veneciano de Le Corbusier, son autorreferenciales y están presentes en una variedad de iteraciones controladas... Eisenman afirma que 'en cada escala [del diseño] se introducen aspectos de los cambios en el tiempo, cambios en los ríos, las fronteras, etc., son introducidos'... La escala, la auto-similitud y la auto-referencialidad están presentes todas, en Choral Works”. (Trad. Propia).

<sup>104</sup> (Tschumi)

## C2. Ingeniería Arquitectónica para Diseños Fractales

**2.1 Introducción.** Una vez que se revisó el modo, en el que se dio la relación entre la geometría fractal y la arquitectura. A través de este capítulo, se revisan algunas de las técnicas de geometría existentes, en diferentes periodos en que se encontraba la arquitectura. Con la idea, de comprender un poco la manera en la que se asimiló el uso de la geometría fractal y así revisar, cual fue la consecuencia *a posteriori*. Se empieza el capítulo, explicando en que consiste la *ingeniería arquitectónica para diseños fractales*:<sup>105</sup>

- 1.- En la utilización de las cuatro teorías expuestas en el capítulo uno.
- 2.- La simulación del método iterativo con la utilización de casillas individuales provenientes de retículas, cada una fuera de la retícula representa una celda única de color, nombrada *panel de Fibonacci*. Debido a que se escogió, estas sigan la serie de Fibonacci en sus medidas, al igual que sucede al trazar la espiral del mismo nombre.
- 3.- Con los *paneles de Fibonacci*, se simula el cálculo de la dimensión fractal, con la finalidad de poder estudiar las retículas de las formas arquitectónicas y/o dibujarlas, diseñarlas y construirlas.

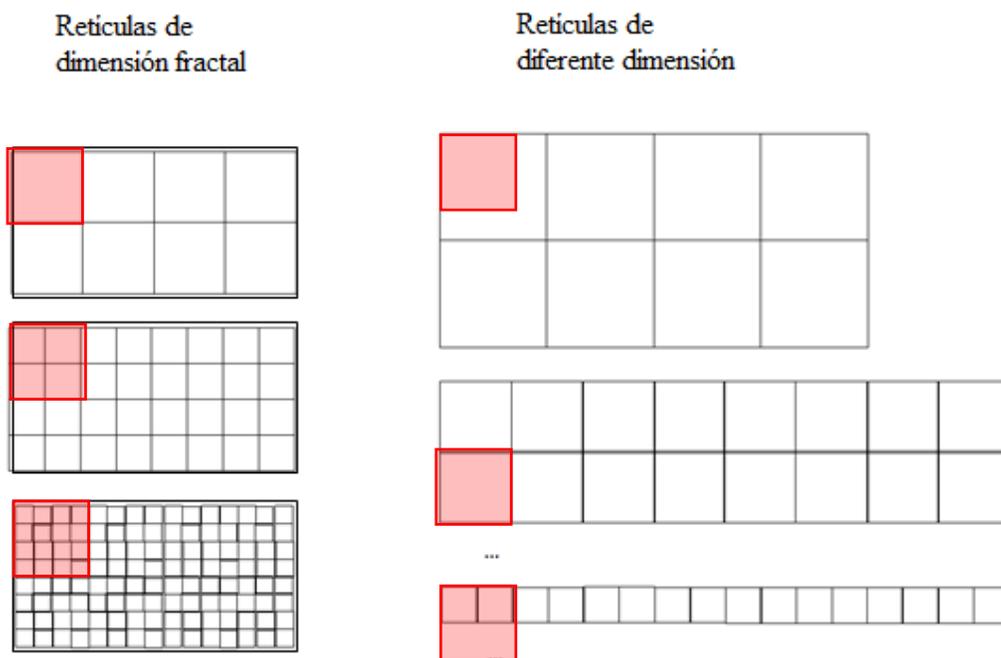


Fig. 29. 'Reticulas de dimensión fractal y retículas que se distribuyen según la serie de Fibonacci'. Elaboración propia.

<sup>105</sup> La cual se utiliza para realizar análisis geométricos.

Sin embargo siguiendo la serie, se puede tener un cuadrado de  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ , que en una escala de 1:100 son cinco por cinco metros. Y se pueden tener las siguientes medidas corridas en metros,  $1\text{m.}$ ,  $2\text{m.}$ ,  $3\text{m.}$ ,  $4.11\text{m.}$   $5\text{m.}$  Parte de la *ingeniería arquitectónica para diseños fractales*, consistente en utilizar los *paneles de Fibonacci* y a manera del método exhaustivo griego, la casilla individual o celda, proveniente de una retícula. Se fracciona para medir, una sección discreta, sobre un elemento arquitectónico.

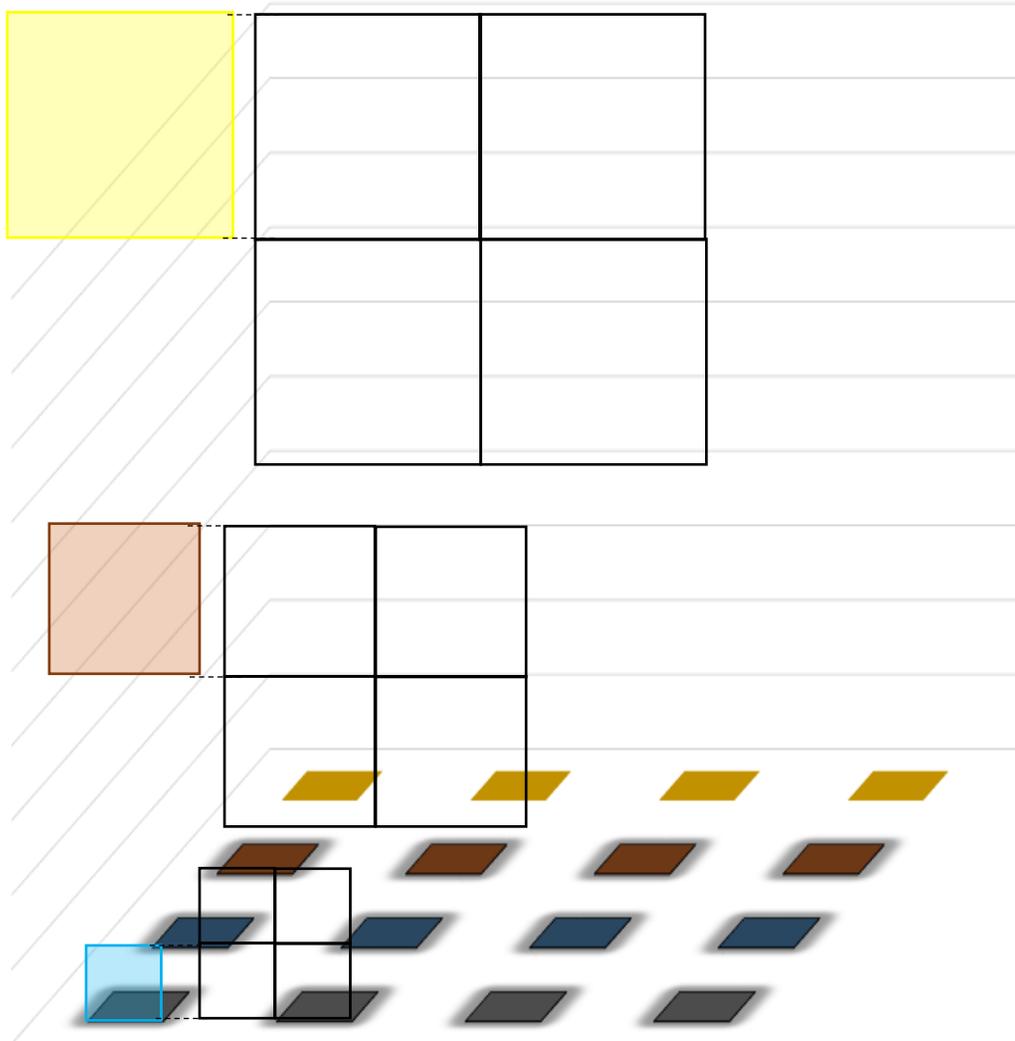


Fig. 30. 'Paneles de Fibonacci en centímetros'. Fuente: Elaboración propia.

Para que la utilización de los paneles sea más identificable, los paneles se nombraran con las letras 'PA' – en alusión a la palabra panel –.

**$PA_1 = 1\text{cm}$**  → Color azul

$$PA_2 = 1inch = 2.54cm / 1.618 = 1.569 \approx 1.57cm \rightarrow \text{Color rosa o morado}^{106}$$

$$PA_3 = 2cm \rightarrow \text{Color naranja}$$

$$PA_4 = 1in = 2.54 / 1cm = 2.54cm \rightarrow \text{Color Verde}$$

$$PA_5 = 3cm \rightarrow \text{Color Amarillo}$$

$$PA_6 = 2.54cm \times 1.618 = 4.109 \approx 4.11cm \rightarrow \text{Color rojo}$$

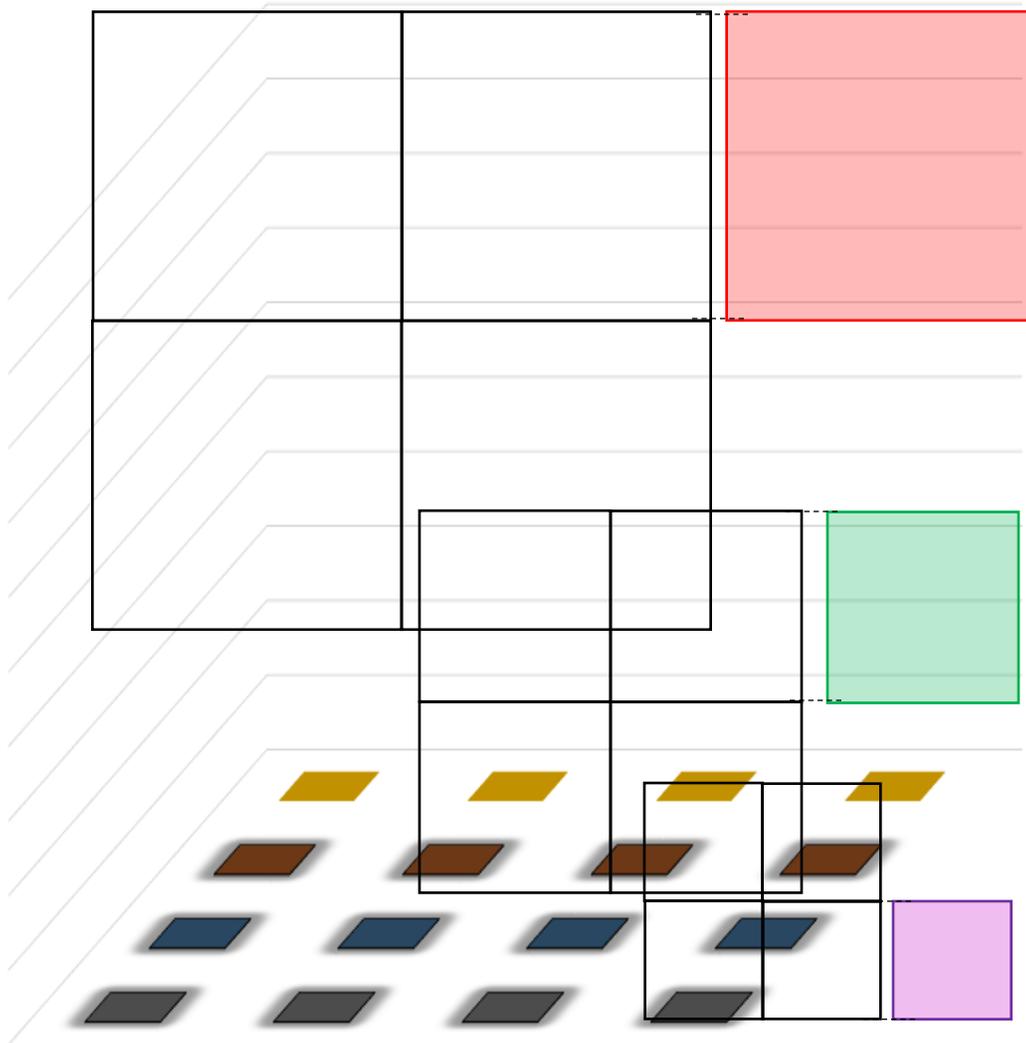


Fig. 31. 'Paneles de Fibonacci en pulgadas'. Elaboración propia.

<sup>106</sup> Se utiliza la definición como color rosa o morado, porque según la imagen donde se sobrepone el panel, favorece la vista de uno u otro color.

Tres paneles con medidas en centímetros y tres paneles con medidas en escala según pulgadas, los cuales se han venido definiendo para utilizarlos de marco de referencia y coordenadas, para construir retículas. Luego se aplica el método exhaustivo, para estudiar alguna forma particular, en búsqueda de detalles de cualidad fractal. En caso de tratarse de un diseño arquitectónico, se muestra que los *paneles de Fibonacci* son una técnica didáctica para descifrar formas arquitectónicas y construir sus retículas fractales.

**Análisis con Paneles de Fibonacci del Plan de la Saline de Chaux.** Este edificio se analiza, mostrando las cualidades de los *paneles de Fibonacci*. La fábrica de sal, ha sido en la historia de la humanidad, importante para el crecimiento de una ciudad. Entonces la producción de sal, ha tenido un papel importante, en el desarrollo de las civilizaciones y las ciudades.<sup>107</sup> En este análisis, se enfoca la atención al cambio en la disposición de elementos de la fábrica, en el proceso de diseño arquitectónico. Se señala como elemento central el Patio Recepción y a partir de este, se observa el cambio de lugar de la ‘tienda’, aunque siempre está junto a las plantas. En el Plan 2 – imagen de la derecha – se percibe que la ‘tienda’, además de las plantas, tiene a su lado izquierdo el ‘Apartado de Dirección’. Y en la esquina siguiente los ‘Cuartos de Barricas’, mientras que en el Plan 1. Al menos el ‘Apartado de Dirección’ está a la entrada en el lugar opuesto a los elementos ‘Tienda’, ‘Barricas’.

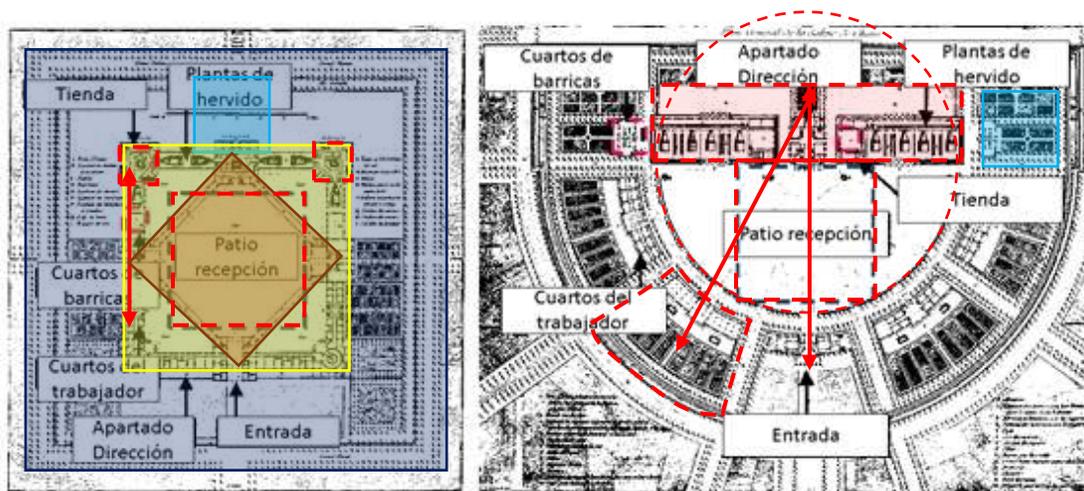


Fig. 32. “Los planes de la Saline de Chaux”. Imágenes.<sup>108</sup>

<sup>107</sup> “Virtually every región in the world makes salt...” (Bitterman 8). “Virtualmente en toda región del mundo hace sal”. (Trad. Propia)

<sup>108</sup> Ledoux, Claude-Nicolas. “Plan de la Saline de Chaux, ‘Adapted from ‘Plan du premier projet proposé Ledoux concernant la construction de la Saline royale d’Arc-et-Senans (1773-1774)’” 2020. [Commons](#). 13 Nov.

Al hacer un diagrama de flujo entre los elementos analizados sucede lo siguiente.

Siguiendo un orden contrario a las manecillas del reloj:

*Patio Plan<sub>1</sub> → Plantas → Tienda → Dirección → Barricas*

*Patio Plan<sub>2</sub> → Plantas → Tienda → Barricas – Dirección*

Siguiendo el orden de las manecillas del reloj:

*Patio Plan<sub>1</sub> → Dirección → Barricas → Tienda → Plantas*

*Patio Plan<sub>2</sub> → Barricas → Dirección → Tienda → Plantas*

En el caso del plan de la Saline de Chaux, se señalaron aspectos relacionados con la sintaxis espacial, haciendo un diagrama de flujo de las actividades. Es interesante ver la transformación en el diagrama y encontrar que los espacios exteriores del edificio, tienen detalles con geometrías arquitectónicas complejas, que son de interés por sus detalles de cualidad fractal relacionados con las formas caóticas y complejas.

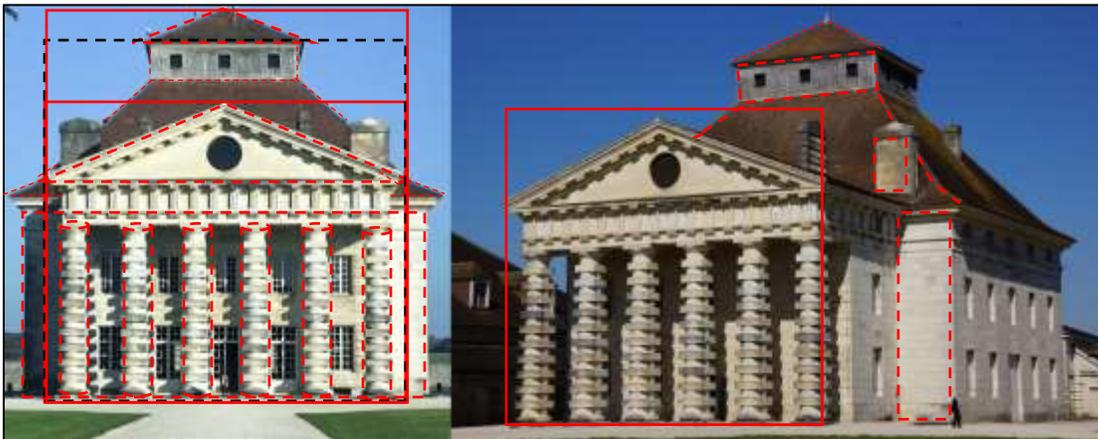


Fig. 33. Las formas arquitectónicas de estudio. Imágenes.<sup>109</sup>

De algún modo se señala lo que se percibe del frente del edificio, en la imagen en perspectiva, luego en la imagen de frente se tiene un *panel auxiliar negro*: que es el cuadrado de  $4.8 \times 4.8\text{cm}$ , de líneas punteadas. Tomando a este como marco de referencia, se sacan las proporciones de que tan largos o anchos son los rectángulos presentes, los que marcan la

2020 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Premier\\_projet\\_salines\\_royales\\_d%27Arc-et-Senans.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Premier_projet_salines_royales_d%27Arc-et-Senans.jpg)>, Ledoux, Claude-Nicolas. "Adapted from 'Plan de la Saline de Chaux (1778-1804)'. 2020. Commons. <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arc-et-Senans\\_-\\_Plan\\_de\\_la\\_saline\\_royale.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arc-et-Senans_-_Plan_de_la_saline_royale.jpg)>

<sup>109</sup> Wikipedia. "House of Directors at the Saline Royale d'Arc et Senans, France. 1806". 1 Jun. 2007 by Süssbrich, Rolf. Wikimedia.org. 30 Ene. 2021 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Salina\\_Real\\_de\\_Arc-et-Senans#/media/Archivo:France\\_arc\\_et\\_senas\\_saline\\_royal\\_main\\_building\\_1.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Salina_Real_de_Arc-et-Senans#/media/Archivo:France_arc_et_senas_saline_royal_main_building_1.jpg)>

entrada del edificio. Las columnas compuestas, tienen características mezcladas entre el orden toscano y a cierta distancia – como la de un tambor – la siguiente pieza de la columna esta abrazada por un prisma rectangular.<sup>110</sup> Hay una simetría entre la forma de la columna luego el prisma, columna prisma y ese juego de alternado que construye toda la columna. *Panel 1 azul*, ambos forman un rectángulo áureo, el *panel 5 amarillo* simplemente cubre el volumen que emerge del techo. Y finalmente el *panel 4 verde* y *panel 2 rosa*, ambos terminan de cubrir la imagen en perspectiva del edificio.

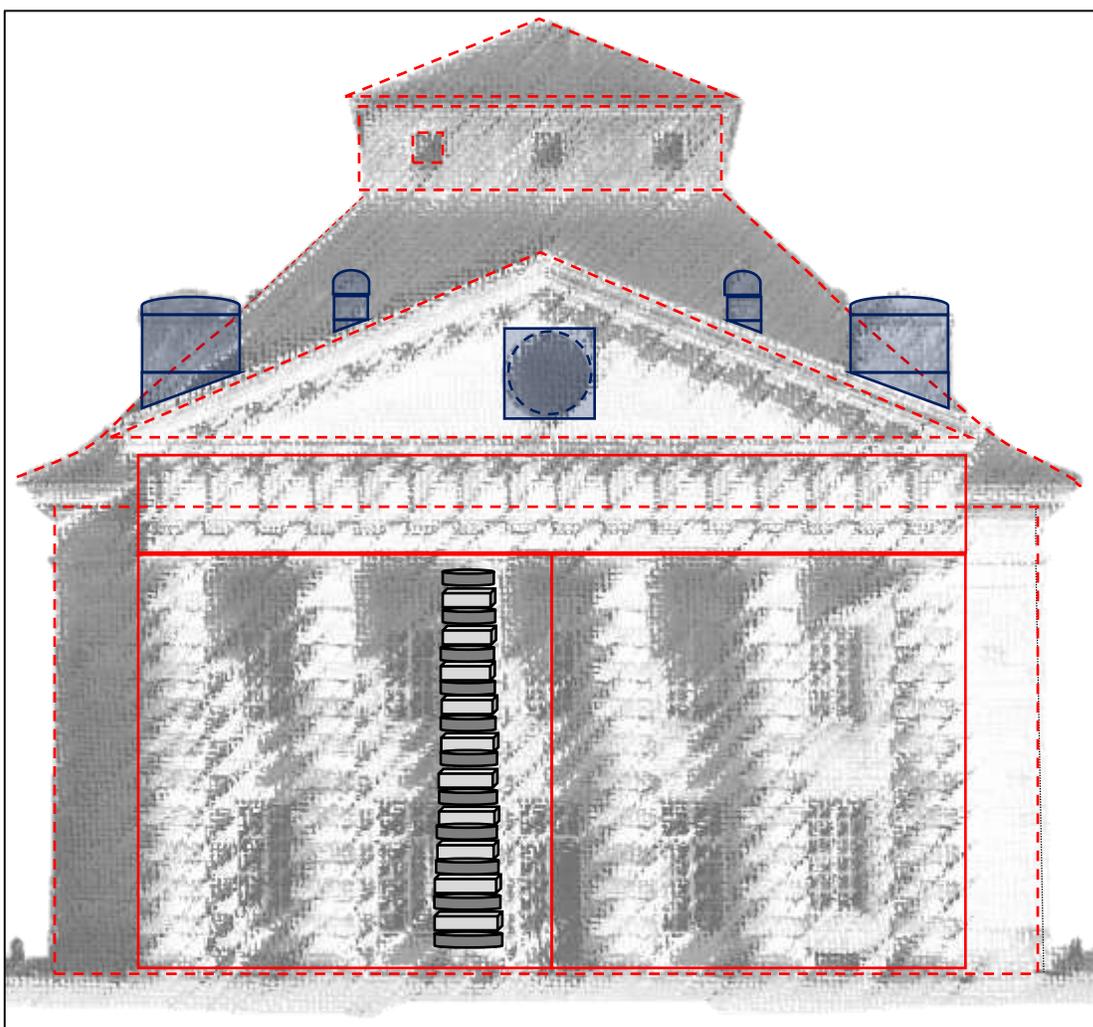


Fig. 34. Las formas complejas de la Saline de Chaux. Fuente: elaboración propia.

<sup>110</sup> En el capítulo tres al analizar el edificio del director de la Saline de Chaux, se interpretó la forma de las columnas como un símbolo y un signo, el símbolo de que las columnas se construyen por ensamble de tambores, estos están proporcionados de tal forma que no son rectos sino tienen curva como si estuvieran torneados, al final por el ensamble la columna queda torneada con una forma que va de gruesa a delgada. Los prismas rectangulares que están acomodados simétricamente y con el mismo ritmo entre los distintos pilares, dividen la columna en veinte tambores, solo del cuerpo de la columna sin contar el capitel ni la basa.

El análisis geométrico es muy visual, solo se buscan figuras geométricas, ya que cada elemento tiene su propia retícula y los paneles son un marco de referencia dimensional. Estas retículas de elementos arquitectónicos, se pueden construir individualmente y en conjunto.

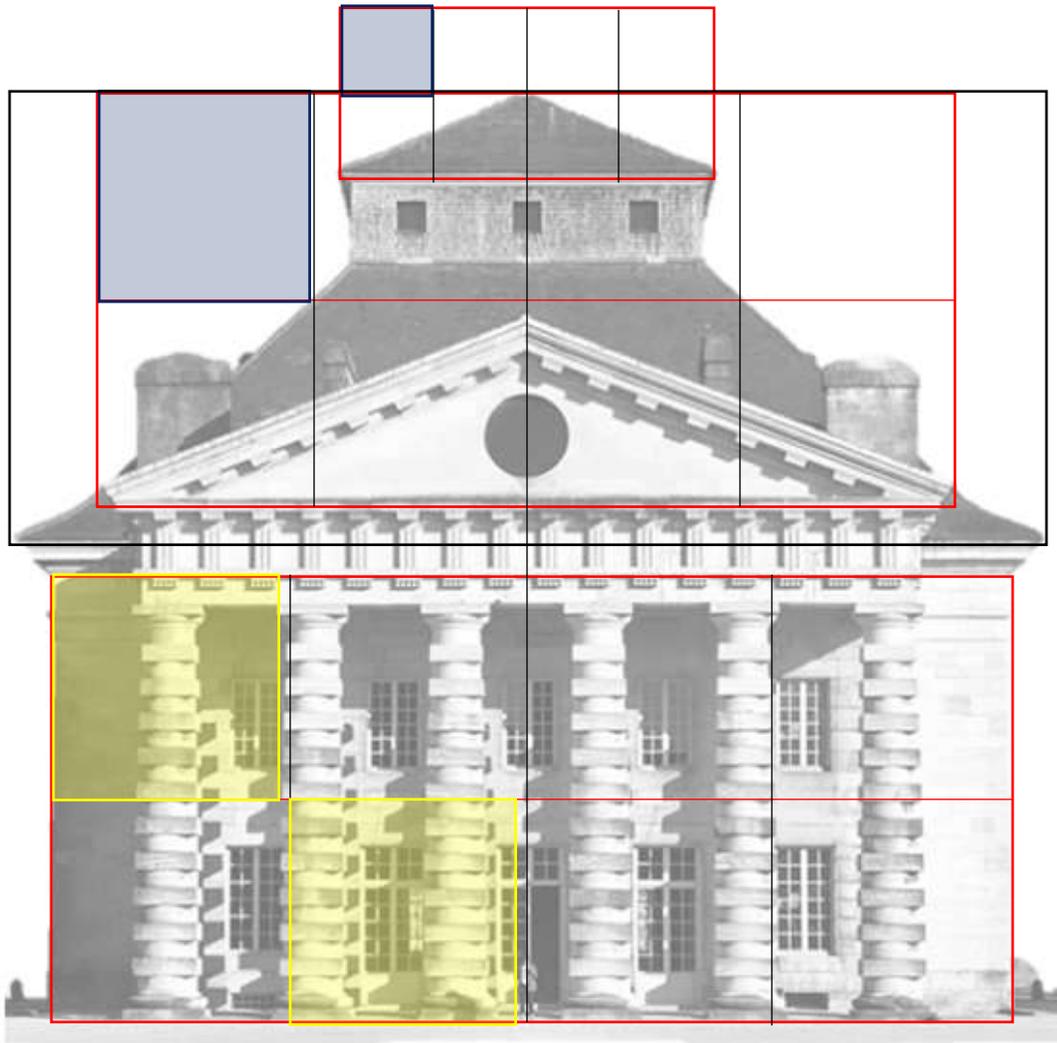
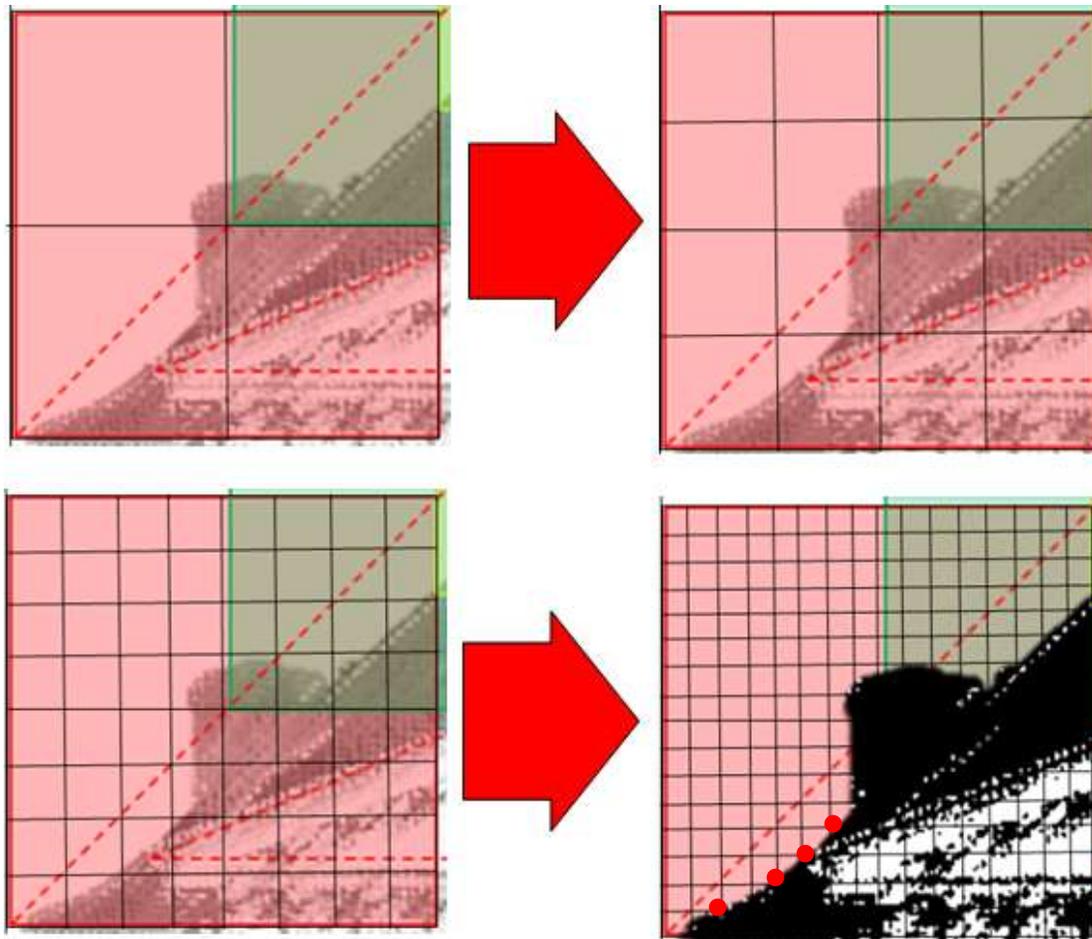


Fig. 35. Retículas multidimensionales. Fuente: elaboración propia.

En el caso de la aproximación con paneles, se tienen tres retículas con perímetro rojo, en las que se dividió el edificio. En cada una se acomoda un panel, esta sección se utiliza de coordenada, por ejemplo para analizar la forma de los tambores<sup>111</sup> de las columnas.

<sup>111</sup> Mega, Arqueología. “Grecia (desmontando la Acrópolis de Atenas) – Documentales”. 2018. [Youtube.com](https://www.youtube.com/watch?v=jnIbwahcL6Q&t=2148s). 30 Feb. 2021 <<https://www.youtube.com/watch?v=jnIbwahcL6Q&t=2148s>> Min. (20:00- 23:00).



Gráfica 36. Aproximación por segmentos que dividen el panel de dimensión fractal

A su vez los paneles se pueden seccionar, como las retículas de dimensión fractal, en orden de tener aproximaciones más exactas de la forma del elemento arquitectónico. En el caso de la curva que se forma en el techo, mientras más se fraccione la retícula, se encuentran puntos más próximos a la curva. Aquí es donde se reconoce la característica geométrica exhaustiva de las retículas de dimensión fractal y su proceso iterativo. Aun cuando la expresión arquitectónica, muestre en su complejidad, una construcción proveniente de un diseño arquitectónico muy elaborado. Al dibujarlo de manera exhaustiva, así como lo hacen los arquitectos muy dedicados,<sup>112</sup> que todo el tiempo están diseñando y construyendo. Se ejercita, uno de los procesos cognitivos, del diseño arquitectónico.

<sup>112</sup> “Foster carried the Olsen block in his mind everywhere he went for the entire twelve intense months that it took to design and built it. He made the sketches, and drew the kind of perspectives that attempt to convey an architect’s ideas to his client”. (Sudjic 146).

“Foster tenía en su mente el bloc de Olsen a todos lados donde iba, por los siguientes intensos doce meses que tomó diseñar y construirlo. El hizo bocetos y dibujó el tipo de perspectivas que intentan transmitir las ideas del arquitecto a su cliente”. Trad.

Ya sea que la utilización de los paneles de Fibonacci, en el caso bidimensional y con cubos, para las composiciones más elaboradas: igual que las de la arquitectura fractal de formas caóticas o complejas. Las *cajas de Fibonacci* en este caso se utilizan para realizar el método exhaustivo con cubos. Cada cubo es un marco de referencia, relacionado biunívocamente con las medidas en centímetros o pulgadas, que siguen los *paneles de Fibonacci*, en este caso se tiene:  $1\text{cm}^3, 3.87\text{cm}^3, 8\text{cm}^3, 16.38\text{cm}^3, 27\text{cm}^3, 69.42\text{cm}^3$ . Analizadas con el manejo de volúmenes a partir de cubos, en función de ordenar los volúmenes, ya sea debajo de una estructura compleja o deconstruyendo una forma canónica inicial. Se utilizan seis cubos y sus metros cúbicos correspondientes:

$$C_1 = 1 \times 1 \times 1\text{cm} = 1\text{cm}^3$$

$$C_2 = 1.57 \times 1.57 \times 1.57\text{cm} = 3.87\text{cm}^3$$

$$C_3 = 2 \times 2 \times 2\text{cm} = 8\text{cm}^3$$

$$C_4 = 2.54 \times 2.54 \times 2.54\text{cm} = 16.39\text{cm}^3$$

$$C_5 = 3 \times 3 \times 3\text{cm} = 27\text{cm}^3$$

$$C_6 = 4.11 \times 4.11 \times 4.11\text{cm} = 69.43\text{cm}^3$$

En una escala de 1:100, el cubo seis tiene un volumen de  $69.43\text{m}^3$ , el cual sería como una caja (con área de  $16.89$  metros cuadrados y una altura de  $4.11$  metros). En un espacio cerrado de estas dimensiones, podría entrar la cabina de un tráiler, por ejemplo. Y a partir de esta forma canónica, se pueden integrar transformaciones geométricas, que le den sentido al aspecto del espacio, ya sea este aleatorio o caótico (en esta caso por encima de los cubos se puso una superficie curvada, haciendo referencia a que los espacios exteriores, a partir de la forma canónica se pueden transformar a formas complejas). Los otros cubos por ejemplo el rojo y amarillo tienen alturas de  $3$  y  $2$  metros en planta baja, respectivamente. Y el cubo verde en un primer nivel tiene una altura de  $2.54$  metros. El volumen que está en el tope de los cubos apilados, es la imagen de un cubo de un metro cúbico, que en términos de espacio lo podemos comparar con un elemento de guarda. Con capacidad de un metro cubico o mil litros de agua, el cubo dos tiene una capacidad de  $1.57^3 \approx 3.87$  metros cúbicos que son unos  $3,870$  litros de agua. Diseñar con volúmenes, permite considerar variables físicas de diferente índole, de entre las cuales están el aire y el agua e incluso la luz natural. Para comprender un poco mejor el manejo de cantidades volumétricas, el uso de magnitudes físicas como la densidad del agua, permiten tener una idea más exacta.

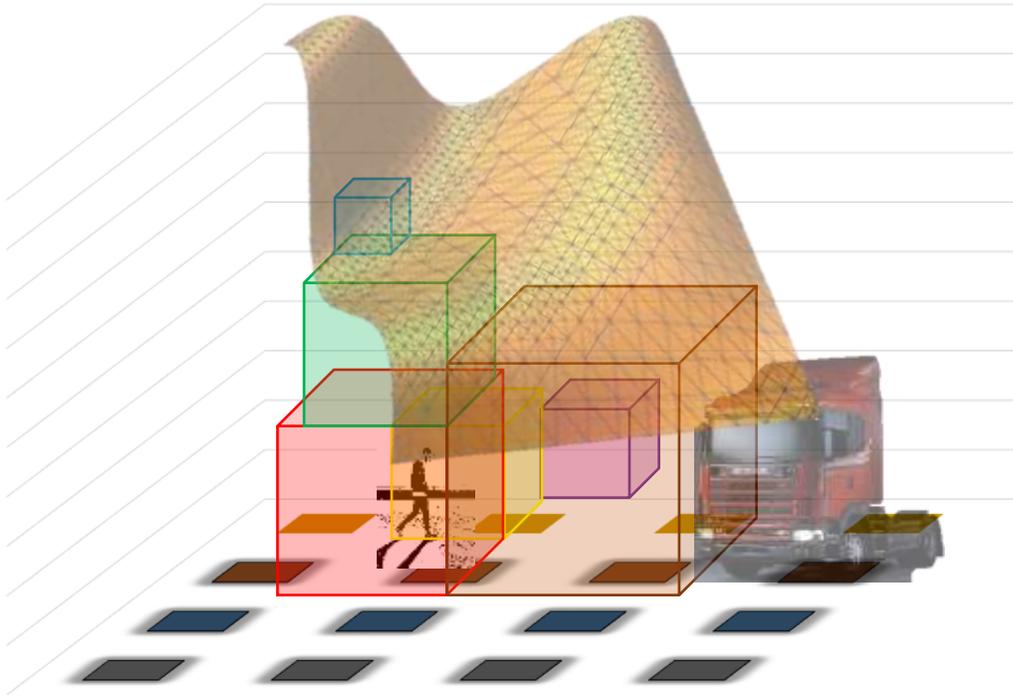


Fig. 37. "Proceso de diseño con formas caóticas". Elaboración propia

El manejo de volúmenes se facilita con la constante: un metro cúbico contiene mil litros de agua, con respecto al peso del agua, incluso se pueden medir otras constantes. La del aire que pesa mil veces menos que el agua.<sup>113</sup> Estos recursos de la naturaleza, el aire y el agua son muy deseables, dentro de un espacio arquitectónico funcional. La ecuación 12.1 de Sears nos da la masa y el peso del volumen de aire y de agua, en este caso se multiplica por los metros cúbicos, asociados a espacios arquitectónicos ortogonales en forma de caja.

$$m_{aire} = \rho_{aire}V = \left(\frac{1.20kg}{m^3}\right) \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \end{matrix}$$

$$w_{aire} = m_{aire}g = \left(\left(m_{aire} \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \end{matrix}\right) \left(\frac{9.81m}{s^2}\right)\right) = Newton = libras$$

$$m_{agua} = \rho_{agua}V = \left(\frac{1000kg}{m^3}\right) \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \end{matrix}$$

$$w_{agua} = m_{agua}g = \left(\left(m_{agua} \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \end{matrix}\right) \left(\frac{9.81m}{s^2}\right)\right) = Newton = libras$$

<sup>113</sup> (Zemanski Vol.1 (374-375))

Por ejemplo en un análisis del volumen de aire, se puede saber que en un espacio como el del cubo  $C_3 = 8m^3$ , se tiene en promedio nueve punto seis kilogramos de aire. El manejo de volúmenes con elementos universales – agua y aire –, se facilita con la relación de la forma canónica de una caja: aún la caja se transforme. La capacidad volumétrica, de una habitación del cubo, es de nueve litros de aire. Y estudios de la ciencia de la salud, dicen que una persona en reposo, consume en promedio de aire, de cinco a seis litros por minuto – en quince respiraciones –.<sup>114</sup> De los cuales se absorben seiscientos mililitros, un deportista absorbe uno y medio litros y un atleta dos punto cuatro litros y la cantidad de aire del cubo da:

$$m_{aire} = \rho_{aire}V = \left(\frac{1.20kg}{m^3}\right) C_3 = 9.6 \text{ litros}$$

**2.2 Arquitectura y el uso de las Matemáticas.** Con el fin de descubrir el uso de las retículas y la geometría en el campo de la arquitectura, se buscan citas donde se hable de su uso, buscando en textos de arquitectura de diferentes épocas.

## Matemáticas existentes en el periodo clásico

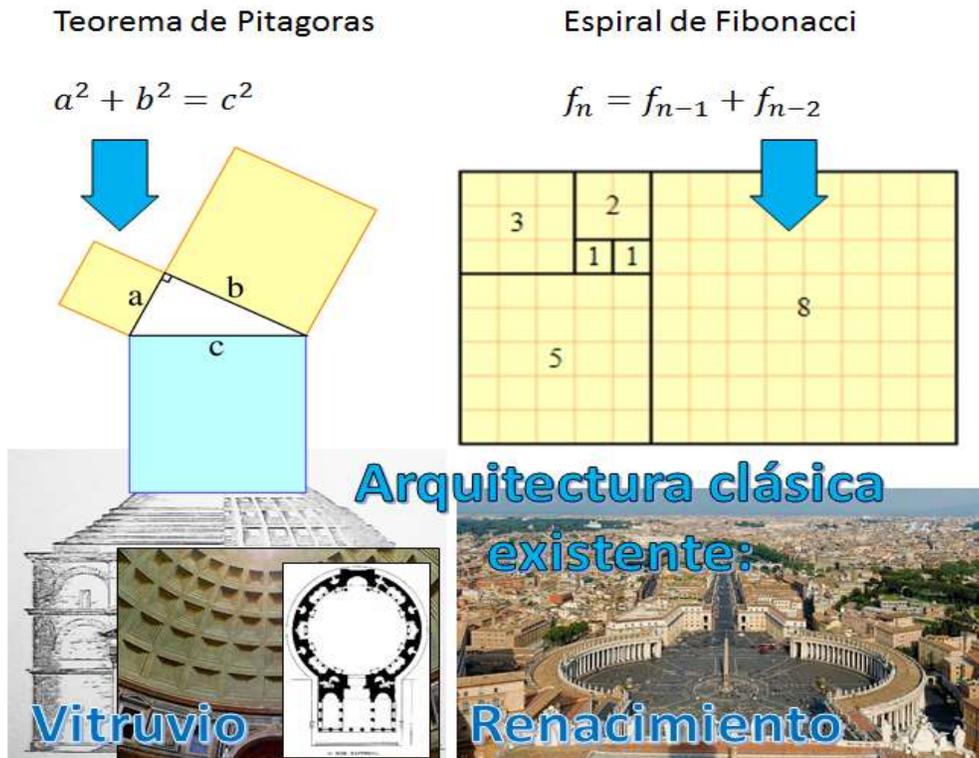


Fig. 38. El teorema de Pitágoras y la serie de Fibonacci. Fuente: Elaboración propia

<sup>114</sup> Muy Interesante. “¿Cuánto aire respiramos al día?”. 2011. [Muy Interesante.es](http://www.muyinteresante.es). 27\_Ago. 2021 <<https://www.muyinteresante.es/curiosidades/preguntas-respuestas/ cuanto-aire-respiramos-al-dia>>

Uno de los ejemplos más conocidos, desde la época de los griegos, es la búsqueda de la proporción aurea. Euclides – matemático y geómetra griego – fue quien imaginó un segmento (A, B) dividido por un punto (C) que dividía el segmento en dos. La relación entre el segmento mayor y la recta, debía ser la misma que la del segmento menor y el mayor,... y la división de ambas longitudes, independientemente del tamaño de la recta inicial daban lugar al número *Phi*.<sup>115</sup>  $\frac{AB}{AC} = \frac{AC}{CB} = \phi = 1.61803$ . El mismo número que después Fibonacci aproximó con mejor exactitud, con el descubrimiento de la serie que da como resultado la ‘proporción aurea = 1.618’, y el trazo de la espiral del mismo nombre. Esto hace ver que desde la época de Vitruvio, conocido por ser el primer teórico de la arquitectura del que se tiene registro.<sup>116</sup> Hasta la época del Renacimiento, era reconocida la proporción aurea, primero con la división de segmentos de Euclides y luego con la serie de Fibonacci.

La búsqueda de la proporción aurea: Euclides

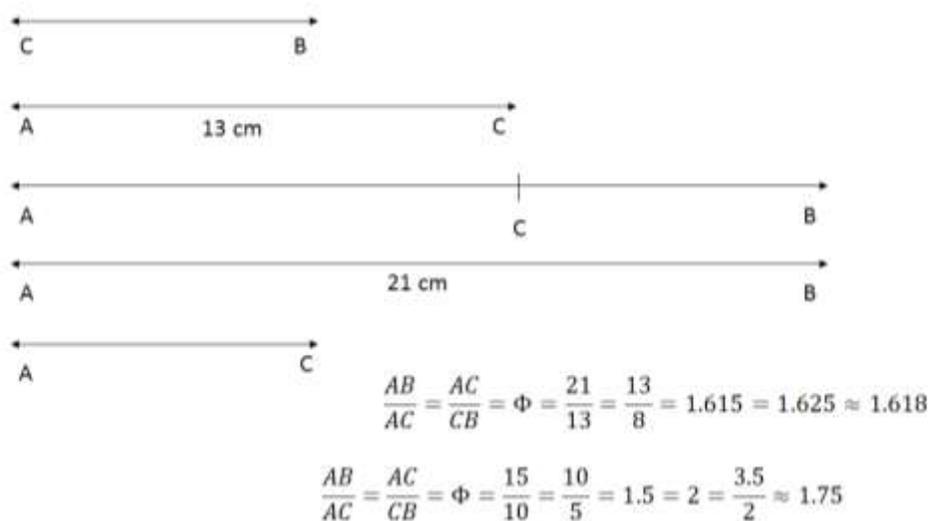


Fig. 39 “La proporción aurea de Euclides, aproximada por medio de segmentos de recta”. Fuente realización propia, información<sup>117</sup>

<sup>115</sup> Smart Planet. “Redes. La Proporción Áurea. Eduard Punset. 1996-2013” 2020. TVE. Redes. Smart Planet. 4 May 2021. < <https://www.rtve.es/play/videos/redes/>>. Soporte: 2021. <[https://youtu.be/d\\_71-uqz\\_ic](https://youtu.be/d_71-uqz_ic)> Min. (3:15- 5:50)

<sup>116</sup> “De architectura, was written in ancient Rome. Composed about 30 B.C.E. by Marcus Vitruvius Pollio (known to the world as Vitruvius), it purports to be the first attempt to write a systematic and comprehensive theory of architecture”. (Hearn 1).

“De architectura fue escrito en la Roma arcaica. Fue compuesto por Vitruvio cerca del 30 a.C. Su objetivo fue el de ser el primer ensayo en el que se escribió una teoría de la arquitectura comprensible y sistemática.” (Trad. Propia)

<sup>117</sup> El uso de la proporción áurea: ABC, Ciencia. “Número áureo: belleza matemática... El número áureo... Fue descubierto en la antigüedad, y puede encontrarse... en diversas obras de arquitectura... Por ejemplo, el Hombre de Vitruvio, dibujado por Leonardo Da Vinci..., esta proporcionado según el número áureo... El primero en hacer un estudio sobre el número áureo fue Euclides y sus segmentos de recta... Alberto Dureró publicó su

Entonces en las construcciones de obras de arquitectura, desde Vitruvio hasta el Renacimiento con Alberti, Palladio, Serlio y otros tratadistas, se habla de la utilización de las proporciones. “Desde Pitágoras y Platón, se aspiraba a que las proporciones arquitectónicas, debían expresar la armonía del universo a través de cocientes matemáticos.”<sup>118</sup> Esto significa que utilizaron las matemáticas, para construir la geometría arquitectónica, de cada elemento de una obra de arquitectura. Así desde el pasado, hasta el presente: se reconocen elementos geométricos y sus proporciones en la arquitectura. Conocer algo acerca de la manera en la que se entendía el trazo en físico, de diferentes figuras geométricas, tenía su técnica particular: “a continuación, debe tomarse la decimosexta parte de la circunferencia...”<sup>119</sup> trazar esto en el espacio físico incluye la medida, la técnica constructiva y las proporciones, pues el dominio del área y la circunferencia del círculo si bien es arcaico. Se logró por medio del método exhaustivo, con polígonos cada vez más truncados, con los que se aproximaba la circunferencia llenando su área. Arquímedes<sup>120</sup> fue quien lo aproximó hasta el valor  $\pi = 3.1416$ , esto se traslada al espacio físico, donde trazar un círculo requiere su técnica.

La geometría en la arquitectura se nota, tanto en el diseño como en la obra, Alberti<sup>121</sup> por ejemplo: cambió el canon de las columnas, por muros continuos utilizando ornamentos en forma de columnas. La utilización de muros, para lograr construir la forma de una obra de arquitectura; sus separaciones; las divisiones de sus espacios. Es una geometría arquitectónica en la que se puede aplicar el “Teorema de Pitágoras”. Que es una de entre

---

*Instrucción sobre la medida con regla y compás de figuras planas y sólidas*, en la que describe como trazar con regla y compás una espiral basada en la sección aurea ‘espiral de Dureró’... El número de Fibonacci también... ver que la a medida que ‘n’ se hace más grande, la razón áurea entre  $F_{n+1}$  y  $F_n$  oscila, siendo alternativamente menor y mayor que la razón áurea.” (Abc.es. “ABC información: El número áureo, belleza matemática”. 10 Oct. 2021. [ABC.es. 10 Oct. 2021 <https://www.abc.es/ciencia/abci-numero-aureo-belleza-matematica-201004150300-14058894848\\_noticia.html>](https://www.abc.es/ciencia/abci-numero-aureo-belleza-matematica-201004150300-14058894848_noticia.html)).

<sup>118</sup> “Geometría y aritmética son la clave de la ideología palladiana. En ellas se basa su teoría matemática, y de las proporciones armónicas que afectan cada espacio individual, el cual se correlaciona secuencialmente con los siguientes tomando como medio compositivo predominante la simetría de los espacios... Desde Pitágoras y Platón... Alberti... eligió usar cocientes enteros”. (Palladio, Los Cuatro Libros de Arquitectura 27)

<sup>119</sup> (Vitruvio 46)

<sup>120</sup> Arquímedes de Siracusa. “físico, ingeniero, inventor, astrónomo y matemático griego”. 287-212 a. C.

<sup>121</sup> “Santa Maria Novella confronted Alberti with a similar set of issues... Again, he relied on the ornamental capacities of pilasters and engaged columns, refusing the idea that the column should have a structural function. He also relied on the idea of a cornice projecting over half columns on pedestals at each side of the entrance. He inserted-- and this is different from the Tempio-- a high attic zone, which separates the lower story from the upper story”. (Erika. “Lecture 2.4 Santa Maria Novella”).

“Santa Maria Novella enfrentó a Alberti con un conjunto similar de problemas... De nuevo, se apoyó en las capacidades ornamentales de pilastras y columnas encajadas, rechazando la idea de que la columna deba tener una función estructural. También se basó en la idea de una cornisa, proyectada sobre medias columnas, encima de pedestales a cada lado de la entrada. Insertó, - y esto es diferente del Tempio -, una zona alta del ático, que separa el piso inferior del piso superior”. (Trad. Propia)

muchas herramientas utilizadas en la arquitectura y la construcción, para lograr ángulos rectos y lograr espacios ortogonales – planos –, para trazar la hipotenusa y los catetos opuesto y adyacente. Pues al conseguir el ángulo de noventa grados, se obtienen las colindancias y las divisiones de muchos edificios. Y en el caso de la arquitectura fractal de formas caóticas o complejas, es por eso que en los programas de computadora de diseño, se utilizan retículas multidimensionales y formas canónicas y a partir de ese punto se da inicio al proceso de diseño de un edificio fractal. Por eso se considera que el cambio de paradigma real, entre la arquitectura y la arquitectura fractal viene de la utilización de las computadoras y softwares de aeronáutica, utilizadas para hacer los planos arquitectónicos y las instrucciones para las construcciones – como en el Guggenheim de Bilbao –.

Antecedentes acerca de la utilización de la geometría, desde Los diez libros de arquitectura de Vitruvio, se cuentan con instrucciones para hacer un trazo: “la línea perpendicular que se trazó...; trácese una circunferencia, con un diámetro a una de las ocho partes..., tírense diámetros en correspondencia con la línea vertical o cateto”.<sup>122</sup> Aunque es un ejemplo donde no hay uso de imágenes, dibujos ni diagramas, la evidencia apunta a que eran técnicas antiguas desde la época de los griegos. Donde había un reconocimiento de la relación que hay entre los números y la belleza, expresados con la idea de canon, pero sobre todo con el uso de las proporciones y la geometría,<sup>123</sup> para lograr detalles arquitectónicos en la obra.

“A continuación debe tomarse la sexta parte de una circunferencia,... Posteriormente, las techumbres,..., fueron sustituidas por techos de doble pendiente... Cuando la cal queda apagada, se mezcla con arena de cantera, en proporción de tres partes de arena por una de cal... Si nos referimos al pie equivale a una sexta parte de la altura del cuerpo... Exceptuando los capiteles, las columnas corintias poseen las mismas proporciones que las columnas jónicas...”  
Vitruvio<sup>124</sup>

Trazar un cuadrado circunscrito, requiere además de unidades de medida, lo cual entre otras cosas: favoreció se fueran dando ciertos avances en diferentes áreas de la construcción de edificios. Uno de estos avances se ha explicado con lo que Alberti hizo en sus obras,<sup>125</sup>

---

<sup>122</sup> (Vitruvio 92)

<sup>123</sup> (Ídem 47, 54, 61, 81)

<sup>124</sup> (Ídem 46)

<sup>125</sup> “This distinction prompts Wittkower to claim that the complete absence of columns in the two churches that you see here - San Sebastiano in Mantua, begun in 1460, and Sant'Andrea, also in Mantua, begun in 1462 - that in these churches where columns are absent signifies a kind of decisive turning point in Alberti's project...” (Erika “Lecture 2.5 San Sebastiano & Sant'Andrea”).

usando una arquitectura de muros y dejando el clásico con sus columnas en un aspecto simbólico. En el edificio del Panteón de Agripa 126 d.C., “es un ejemplo del uso del círculo y la esfera”<sup>126</sup> Se tiene por muestra lo que mencionó Vitruvio, al decir que se trazaban círculos y perpendiculares y se usaban proporciones en la construcción de edificios. La expresión geométrica del círculo y la esfera, puede ser su perímetro  $\pi \times r$  o su área  $\pi \times r^2$ . En el caso de la esfera su área sería su sólido de revolución  $4 \times \pi \times r^2$ . Y el espacio interior su volumen  $4/3 \times \pi \times r^3$ . Sobre la importancia del dibujo, los tratadistas del Renacimiento ilustraron este libro los *Diez Libros de Arquitectura* de Vitruvio.<sup>127</sup>

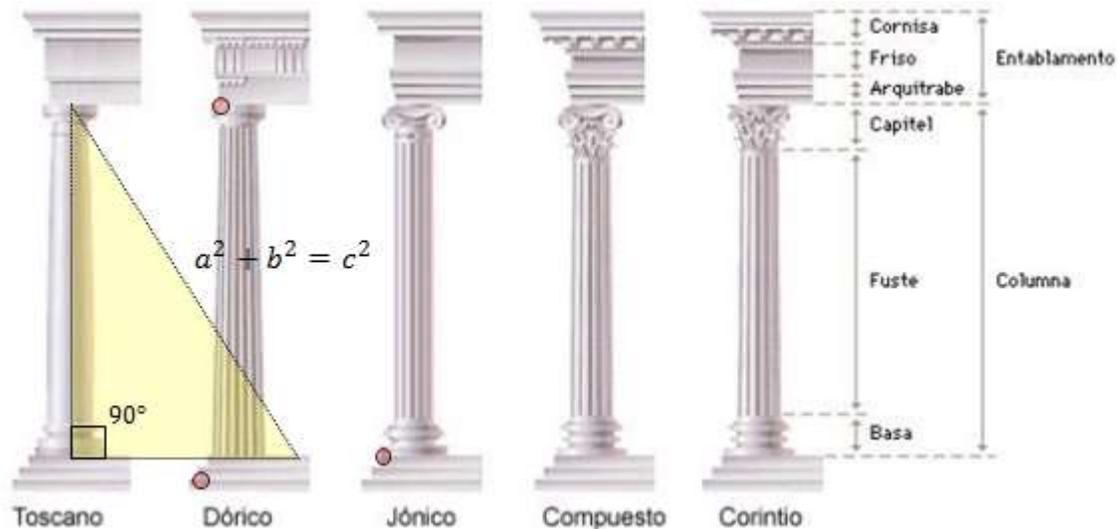


Fig. 40. Las proporciones y el “Teorema de Pitágoras”, la armonía y los cánones de Los cinco órdenes clásicos de la arquitectura. Fuente imagen<sup>128</sup>

En la disposición de las columnas, es una regla el uso de los ángulos rectos, utilizados para nivelar ensambles entre elementos – piso, columna, entablamento –. También en el trazado de las escaleras, incluso al nivelar un edificio, tomar medidas y hacer divisiones. El teorema

“Esta distinción lleva a Wittkower a afirmar, que la completa ausencia de columnas, en las dos iglesias que ven aquí - San Sebastiano in Mantua, iniciado en 1460, y Sant' Andrea, también en Mantua, iniciado en 1462 -. Que en estas iglesias, donde faltan las columnas, supone una especie de punto de inflexión decisivo en el proyecto de Alberti...”. Trad.

<sup>126</sup> “From ancient times to the period of the Renaissance, the circle, the square and the cross were the basic elements of the design process. The Pantheon in Rome is an impressive example for the use of the circle and the sphere”. (K. M. Williams, *Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future: Vol. II Vol. 1*. Pp. 82-84).

“Desde tiempos antiguos hasta el periodo del Renacimiento, el círculo, el cuadrado y la cruz fueron los elementos básicos en el proceso de diseño. El panteón en Roma es un ejemplo impresionante del uso del círculo y la esfera”. (Trad. Propia).

<sup>127</sup> (Vitruvius)

<sup>128</sup>Wikipedia. “Órdenes clásicos”. 2021. [Es.wikipedia.org](https://es.wikipedia.org/wiki/Órdenes_clásicos). 7. May. 2021 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Órdenes\\_clásicos](https://es.wikipedia.org/wiki/Órdenes_clásicos)>

de Pitágoras y en general la forma en la que se traza un ángulo recto, también es una regla de proporciones, en este caso vinculadas a los triángulos rectángulos y al conocimiento de la hipotenusa.

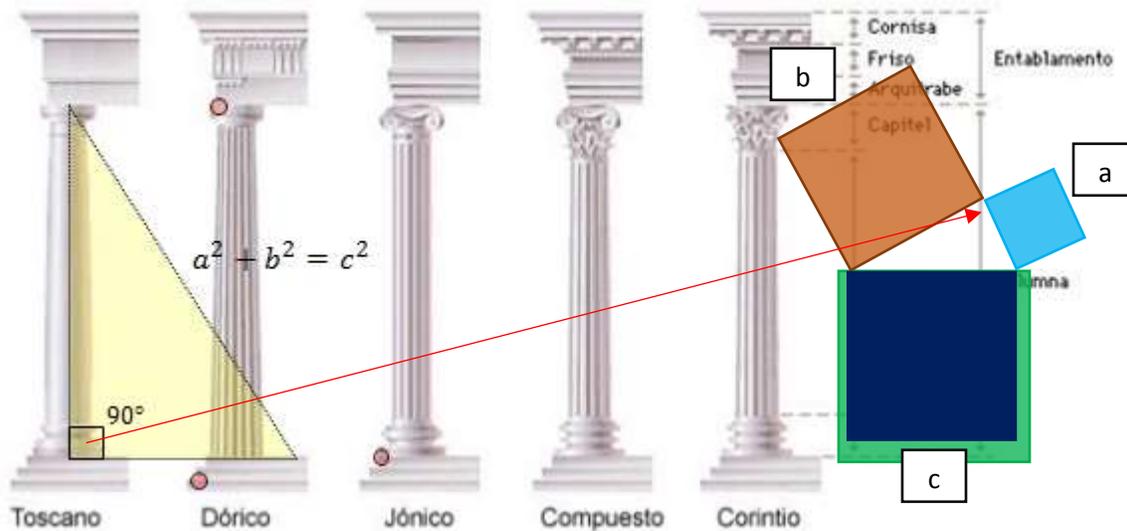


Fig. 41. Paneles de Fibonacci para formar el “Teorema de Pitágoras”

En el aspecto de análisis visual, se puede ver el detalle de orden, simetría y dimensión. El uso de tres cuadrados de diferentes dimensiones, para sacar las proporciones del teorema de Pitágoras, es una construcción con detalles fractales. En la demostración se utilizan los *paneles de Fibonacci*: *panel 1 azul*, *panel 3 naranja*, *panel 4 verde*, *panel auxiliar azul marino* – insertado en el panel verde – con la longitud de uno de sus lados equivalente a la expresión  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$  que en este caso da por resultado:

$$c = \sqrt{1^2 + 2^2} = 2.236$$

Entonces el *panel auxiliar azul marino* mide  $2.23\text{cm}$  por lado, revisando se usaron las medidas  $1\text{cm}$ ,  $2\text{cm}$ ,  $2.23\text{cm}$ ,  $2.54\text{cm}$ , según los paneles utilizados. Luego la aproximación más importante, de la proporción aurea, fue realizada por Fibonacci a principios del siglo XIII, quien se valió de generar la serie de números, caracterizada por; la suma del cero, como número inicial, más el siguiente; y el resultado sumado por el número siguiente; y después de los dos primeros unos. El resultado, que es dos, se suma con el número anterior. A partir de este punto, cada nuevo resultado se suma con el número anterior y se repite el mismo proceso, hasta el infinito:

$$0 + 1 + 1 + 2 + 3 + 5 + 8 + 13 + 21 + 34 + 55 + \dots$$

El número *phi* se encuentra dividiendo cada nuevo número entre el anterior:

{ $1 \div 0 = 0$ }, { $1 \div 1 = 1$ }, { $2 \div 1 = 2$ }, { $3 \div 2 = 1.5$ }, { $5 \div 3 = 1.66$ }, { $8 \div 5 = 1.60$ },  
{ $13 \div 8 = 1.625$ }, { $21 \div 13 = 1.6153$ }, { $34 \div 21 = 1.6190$ }, { $55 \div 34 = 1.6176$ },...

Es decir que a medida que la serie va creciendo y se realiza esta operación la serie tiende al número  $\Phi$  (*phi*) = 1.618033 ..., con infinitos decimales.

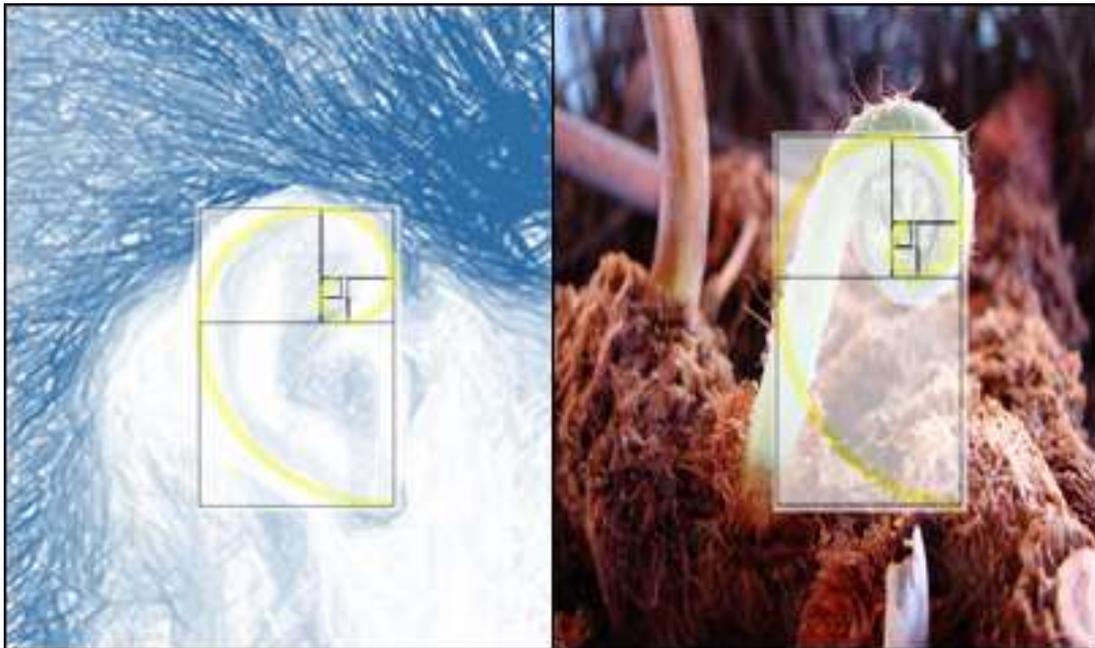


Fig. 42. La proporción aurea. Fuente: Elaboración propia

Lo que en realidad dice esta proporción 1: 1.618, ahora aproximada con la serie descubierta por Fibonacci, es como se pasó de utilizar un segmento dividido, a una serie de segmentos divididos. Con los que incluso, se puede trazar la espiral logarítmica, siguiendo la serie numérica. Se ha descubierto que la espiral de Fibonacci, se encuentra presente, en un ilimitado número de cosas de la naturaleza. Y su uso ha sido muy recurrente en la arquitectura, Le Corbusier la utilizó y habla de ella: “el trazado de la sección dorada”.<sup>129</sup> La espiral se forma con la serie de números de Fibonacci y su trazo, permite aprovechar el espacio horizontal de forma más eficiente. Lo cual se puede percibir mejor en diagrama, por eso – Alberti – ve en el diagrama una herramienta eficaz.<sup>130</sup>

<sup>129</sup> “The tracing out of the Golden Section”. (Le, Towards a New Architecture 72)

<sup>130</sup> “However, to think about Wittkower's reading of Alberti is also to understand an approach that fundamentally looks at the diagram as the revelatory tool for understanding architecture and its development. In this sense, by using the diagram, he's actually turning to a mode of interpretation that relies on the schema, and here we can recognize, actually, an approach inspired by the philosopher Immanuel Kant, who looks at the architectural imagination as the very thing that schematizes the complexity of the world and transforms it into

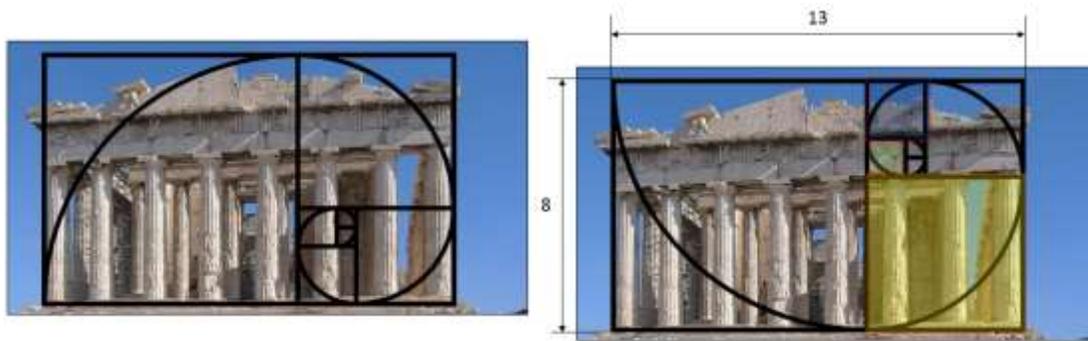


Fig. 43. Los griegos y la proporción aurea aplicada en la arquitectura. Fuente: Elaboración propia. Con imagen<sup>131</sup>

En el caso del Partenón en la imagen derecha las medidas corresponden a las alturas de la columna, el capitel y el techo. Pero también se puede ver presente, la utilización de la sección dorada, lo cual se puede demostrar fácilmente con la espiral de Fibonacci. La técnica de construcción de estos órdenes, se escribió entre otros por Vitruvio, quien describe como construir los órdenes clásicos.<sup>132</sup> Sin embargo, tuvieron que pasar mil años hasta que se encontró una regla de proporciones: en la obra de Iacomo Barozzi Da Vignola,<sup>133</sup> quien escribió la “Regla de los cinco órdenes arquitectónicos”. Gracias a esta aportación científica, se pueden construir columnas, que se aproximan en tamaño a las columnas construidas en la arquitectura clásica. Se pone como ejemplo el orden Dórico, las figuras expuestas se utilizan solo con fines geométricos. Palladio dijo al respecto del estudio de los libros de arquitectura y de los edificios construidos, alabando el estudio de las obras del pasado:

“Y porque desde mi juventud me han deleitado grandemente las cosas de arquitectura, no solamente he manejado con fatigoso estudio los libros... que han enriquecido esta ciencia...

---

an ideal that is presented as an objective principle or axiom to the understanding”. (Erika “Lecture 2.5 San Sebastiano & Sant’Andrea”).

“No obstante, pensar en la lectura de Wittkower sobre Alberti, es también para entender un aprovechamiento. Que fundamentalmente, mira el diagrama, como una herramienta reveladora. Para comprender la arquitectura y su desarrollo. En este sentido, al usar el diagrama, en realidad se está recurriendo a un modo de interpretación que se basa en el esquema. Y aquí podemos reconocer, en efecto, un aprovechamiento inspirado en el filósofo Immanuel Kant. Quien ve a la imaginación arquitectónica, como lo mismo que esquematiza la complejidad del mundo, y lo transforma en un ideal. Que se presenta como un principio objetivo o axioma del entendimiento”. (Trad. Propia).

<sup>131</sup> Wikipedia. “Partenón”. 2021. Commons. 2 Feb. 2021 <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ce/2006\\_01\\_21\\_Ath%C3%A8nes\\_Parth%C3%A9non.JPG/1200px-2006\\_01\\_21\\_Ath%C3%A8nes\\_Parth%C3%A9non.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ce/2006_01_21_Ath%C3%A8nes_Parth%C3%A9non.JPG/1200px-2006_01_21_Ath%C3%A8nes_Parth%C3%A9non.JPG)>

<sup>132</sup> “... se colocarán las basas de las columnas respetando la simetría...” se lee en la segunda línea del libro tres capítulo quinto de Vitruvio, donde habla del orden jónico, y más adelante en el libro cuatro capítulo uno, habla del capitel corintio y en el capítulo tres del orden dórico (Vitruvio 90-105).

<sup>133</sup> Barozzi da Vignola, Iacomo. Regla de los cinco órdenes arquitectónicos. Trad. C. M. Delagardette. México: Imprenta de Andrade y Escalante, 1858.

sino que me he trasladado... a otros lugares... donde con mis propios ojos he visto y con mis propias manos he medido los restos de muchos edificios antiguos...”<sup>134</sup>

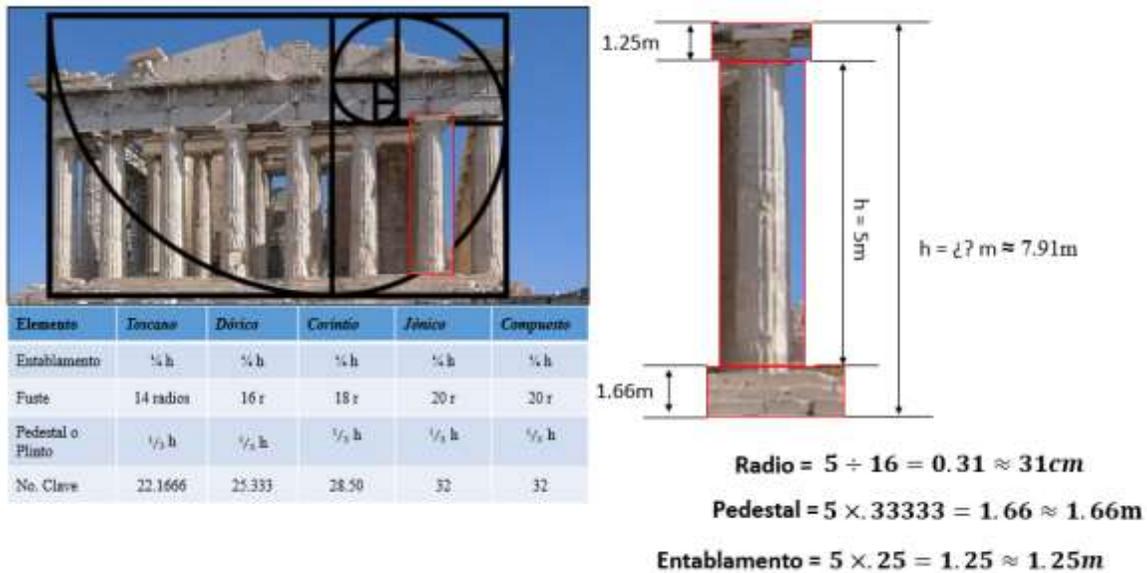


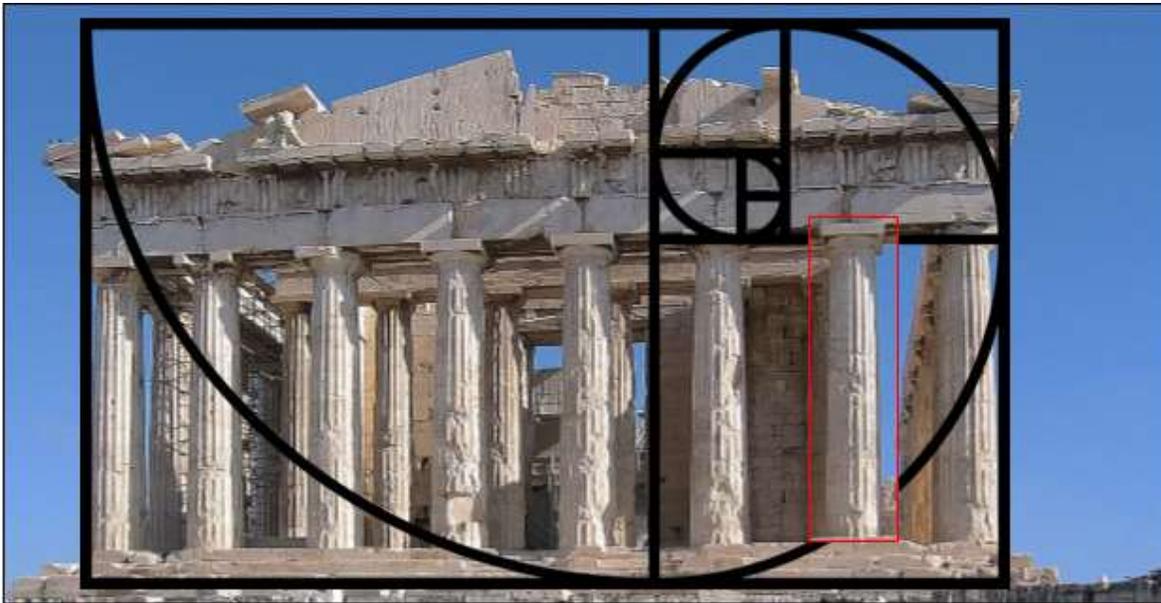
Fig. 44. Las proporciones de Vignola. Fuente: Elaboración propia

En este ejercicio, debido a que en la imagen del Partenón, no se notan los elementos. Se divide la imagen de la columna dándole una sección a las escaleras, al cuerpo y al entablamento y frontispicio. Para el ejercicio se le da una altura de 5m a la columna; para conocer el radio dividimos entre 16, pues el radio es una 1/16 dieciseisava parte de la altura, por eso se tiene que dividir; luego el pedestal tiene un tamaño de 1/3 – un tercio – de la altura, se saca la proporción como 5/3, mide la tercera parte de la altura; y finalmente, el entablamento mide 1/4 – un cuarto – de la altura, es decir 5/4 la cuarta parte. Todos estos conceptos referentes a la técnica constructiva y al canon de medidas, abordan incluso ideas arcaicas: “es una regla de las proporciones de la figura humana, conforme al tipo ideal aceptado por los escultores egipcios y griegos.”<sup>135</sup> Y no hay que olvidar, desde la época antigua, se piensa las esculturas de humanos se utilizaban de columnas<sup>136</sup>. Ese es el motivo por el cual en los edificios y en su construcción y diseño, las proporciones del ser humano, están implícitas de manera funcional. En la actualidad la configuración de la arquitectura, incluso sigue estos cánones, siguiendo los parámetros: según para quien será hecha.

<sup>134</sup> (Palladio, Los Cuatro Libros de Arquitectura 43)

<sup>135</sup> (Bautista 18, 151-157, 199)

<sup>136</sup> “Treinta o cuarenta años más tarde encontramos otro tipo de mujer, la Hera descubierta en Samos,... El aspecto general de esta es aún el de una columna.” (Reinach 43).



Elemento	<i>Toscano</i>	<i>Dórico</i>	<i>Corintio</i>	<i>Jónico</i>	<i>Compuesto</i>
Entablamento	$\frac{1}{4} h$				
Fuste	14 radios	16 r	18 r	20 r	20 r
Pedestal o Plinto	$\frac{1}{3} h$				
No. Clave	22.1666	25.333	28.50	32	32

Fig. 45. Tabla de valores de la Regla de los cinco órdenes arquitectónicos. Fuente: Elaboración propia con datos de (Vignola)

Por tal motivo el modelo del hombre de Vitruvio, se considera la búsqueda de la representación de la figura humana normal y bella, y vista como bien proporcionada según lo escribe:

“Es imposible que un templo posea una correcta disposición si carece de simetría y de proporción, como sucede con los miembros del cuerpo humano lo formó la naturaleza de tal manera que el rostro, desde la barbilla hasta la parte más alta de la frente, donde están las raíces del pelo, mida una décima parte de su altura total.” (Vitruvio 81).

Esto después fue interpretado y dibujado por Leonardo Da Vinci, quien lo asoció a la “sección dorada”. Respecto a la proporción aurea, esta fue asociada durante mucho tiempo con un canon de belleza, aunque en la construcción: se distingue como dice Hegel<sup>137</sup>, entre

<sup>137</sup> We owe the conceptualization and the model for a philosophy of art history to the German idealist philosopher Hegel. In aesthetic experience, we have to distinguish between aesthetic pleasure, let's say, and truth. (Hays. “Lecture 3.1 Hegel’s History”). “La conceptualización y el modelo para una filosofía de la historia

la verdad y el placer por la estética. Aunque se hable de las simbologías, vistas en los portones de las catedrales<sup>138</sup>, hechas para el altísimo. De hecho la arquitectura a través de su historia, tiene ejemplos de edificios religiosos inmensos en tamaño, esto compagina con la idea del espíritu.<sup>139</sup> Hegel lo aclamó, de alguna manera en su filosofía del arte. De que lo elevado aun con sus dimensiones extraordinarias, se construía pensando primero en el espíritu. Debido a que estas dimensiones, se consideran están hechas con las manos del hombre, pero pensando en lo elevado del espíritu. Bajo este contexto se pone de ejemplo:

1.- Si se piensa en el efecto que provoca un elemento arquitectónico en las personas

*Columnas* → *media* =  $\mu$  = 2.30metros

*Población* → *longitud, área, volumen*

	2m	2.05m	2.1m
<i>Muestra</i> →	2.15m	2.2m	2.25m
	2.3m	2.35m	2.4m

Multiplicada por una proporción, para configurar el radio del ancho de una columna:

	2m	2.05m	2.1m
<i>Muestra</i> × 1/16 → (1/16) ×	2.15m	2.2m	2.25m
	2.3m	2.35m	2.4m

Al multiplicar punto a punto se tiene por resultado una matriz de radios para conocer el ancho de las columnas

	0.125m	0.128m	0.131m
<i>Muestra radios</i> →	0.134m	0.137m	0.140m
	0.143m	0.146m	0.15m

El uso de la proporción aurea evolucionó y ha ido cambiando con la época, muy adelante en el tiempo, en la arquitectura moderna Le Corbusier utilizó el número *Phi* de la serie de Fibonacci para diseñar su Modulor, diseño en el que la proporción de alturas se basó en la proporción aurea.

---

del arte, es la debemos al filósofo idealista alemán Hegel. En la experiencia estética, tenemos que distinguir entre el placer estético, digámoslo así, y la verdad. (Trad. Propia).

<sup>138</sup> “At the other end of history, architecture will find its primary form in the interior. So we move away from the object that marks and toward the interior. This is the romantic stage of architecture, and its paradigm is the Gothic cathedral. Hegel conceptualized the Gothic cathedral as an enormous interior landscape.”(Hays “Lecture 3.4 Romantic Architecture”).

“En el otro extremo de la historia, la arquitectura encontrará su forma primaria en el interior. Entonces nos movimos lejos del objeto que marca y va hacia el interior. Esta es la etapa romántica de la arquitectura, y su paradigma es la catedral gótica. Hegel conceptualizó la catedral gótica como un enorme paisaje interior”. (Trad. Propia).

<sup>139</sup> “The central claims of Hegel's philosophy of art are constructed in his famously opaque terminology, primarily the idea of the Spirit”. (Hays “Lecture 3.2 Hegel's Spirit”). “El reclamo central de la filosofía del arte de Hegel se construía en su famosa terminología opaca, primeramente la idea del Espíritu...” (Trad. Propia).

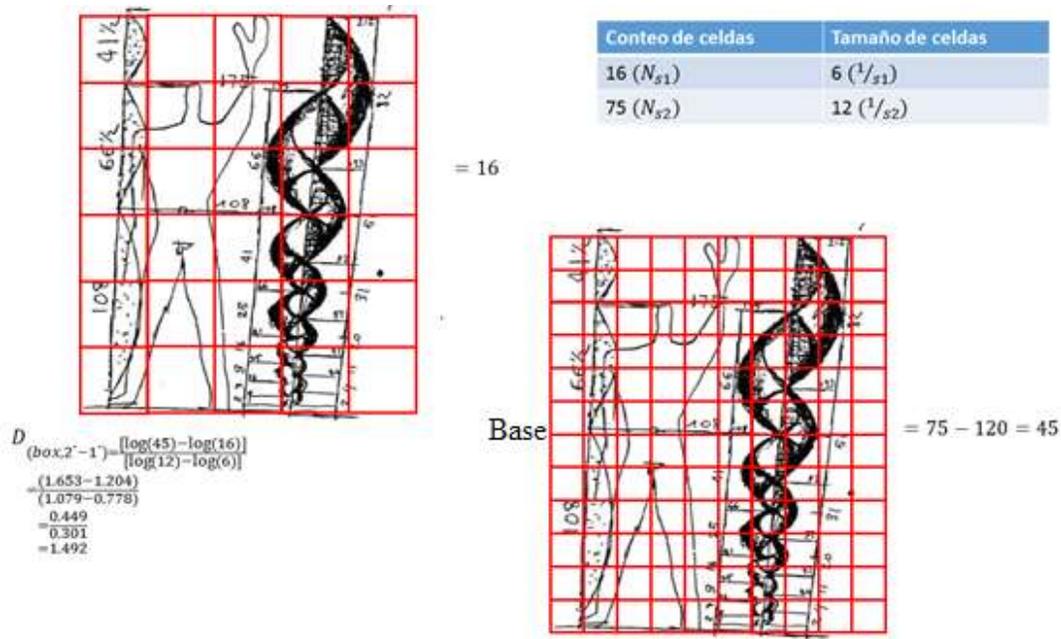


Fig. 46. Cálculo de la dimensión fractal en el hombre de Le Corbusier. Elaboración propia <sup>140</sup>

$$Diferencia = \Phi - D_5 = 1.618 - 1.492 = 0.126$$

Las medidas del ‘Modulor’ parten desde la medida del hombre con la mano levantada (226 cm) y de su mitad, la altura del ombligo (113 cm). Desde la primera medida multiplicando sucesivamente y dividiendo de igual manera por el número de oro, se obtiene la llamada serie azul, e igual del mismo modo la roja. Siendo cada una sucesión de Fibonacci y permitiendo miles de combinaciones armónicas.

Serie azul, en metros, sería: ..., 9,57; 5,92; 3,66; **2,26**; 1,40; 0,86; 0,53; 0,33; 0,20

Serie roja, en metros, sería: ..., 4,79; 2,96; 1,83; **1,13**; 0,70; 0,43; 0,26; 0,16; 0,10<sup>141</sup>

Y Finalmente, con esto se puede estimar el volumen de cemento, que se necesitaría para hacer las columnas. Si estas tuvieran la forma de un cilindro regular, simplemente hay que multiplicar  $\pi \times radio \times altura$ . En la imagen del hombre y la mujer de Durero, se percibe este aspecto del cambio de proporciones entre el hombre y la mujer. Note que: estos cambios

<sup>140</sup> (Le, Le Modulor 49)

<sup>141</sup> (Le, Le Modulor 63) “1. El enrejado da tres medidas: 113, 70, 43 (en centímetros) que están en la razón  $\Phi$  (sección aurea) y serie de Fibonacci  $43 + 70 = 113 \dots 113 + 70 = 183 \dots, 113 + 70 + 43 = 226 \dots$  2. Estas tres medidas (113, 183, 226) son las que caracterizan la ocupación del espacio por un hombre de seis pies.”  
¿Pero cómo constatamos que de verdad estos números se aproximen a la proporción aurea? Simplemente al dividir  $70/43 = 1.627, 113/70 = 1.614, 183/113 = 1.619, 226/183 = 1.234$

cuando se diseña un espacio, son universales. Y aunque ya Vitruvio al hablar del ornamento, hizo hincapié en que los templos según a quien iban dirigidos, podrían llevar columnas de un estilo u otro. Las columnas entre estilos, también reflejan la diferencia de proporciones, que se puede ver entre seres humanos – en el caso de comparar a la mujer y el hombre –.

La geometría ortogonal del cuerpo

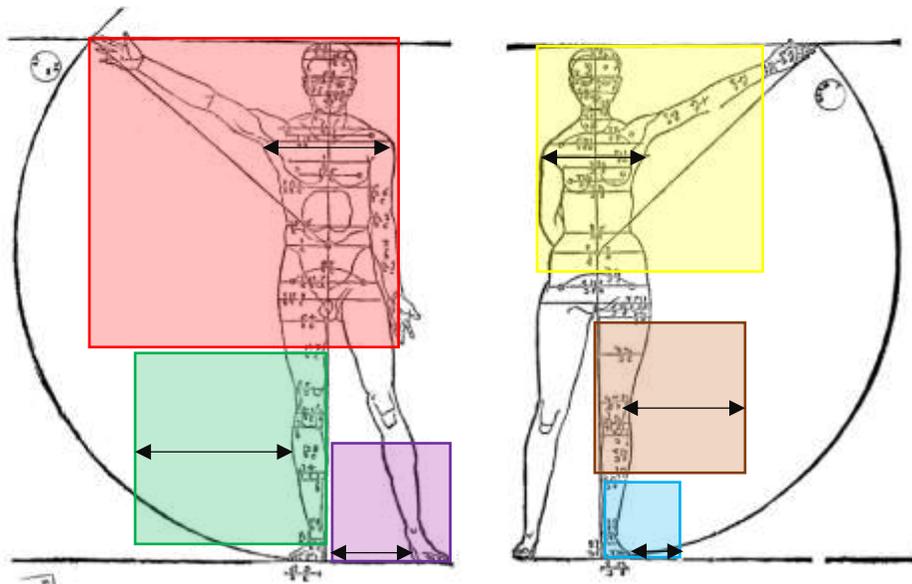


Fig. 47. ‘Movimientos ortogonales’. Fuente realización propia con imagen de Alberto Durero<sup>142</sup>

Se concluye que las formas ortogonales del cuerpo, exigen una proyección ortogonal de los espacios arquitectónicos funcionales. Logrando así una correlación entre el espacio para uso humano y las funciones motrices naturales y saludables de su cuerpo. Contribuyendo a su salud anatomía, fisiología e higiene, por eso desde los primeros ensayos, con los que se experimentó utilizar las formas complejas en la arquitectura. Se consideró que presentan aspectos dimensionales, que no son de la escala humana. Lo cual es debido al reto que significó construir estos edificios, porque cambiaron la forma en la que se venían construyendo los edificios. Uno es de arquitectura moderna diseñado a mano y tiene la forma de una espiral y el otro es de arquitectura contemporánea diseñado por computadora. Son el Guggenheim de New York y el Guggenheim de Bilbao respectivamente, observando su forma en el edificio y relacionándola con los movimientos ortogonales naturales del ser humano.

<sup>142</sup> (Durero)

Tomando en cuenta las relaciones espaciales: 1. El plano horizontal, y 2. El plano vertical. La mayor parte de la población de seres humanos e incluso de animales terrestres, tienen la misma condición anatómica. De vivir sobre el plano horizontal, por ejemplo, las aves también se posan mayormente sobre el plano horizontal. La excepción son algunos reptiles pequeños y los insectos, que rompen las leyes de la gravedad y se posan en planos inclinados e incluso hasta verticales y de cabeza. Con esta idea en mente, observando la condición física del Guggenheim de New York, sus planos inclinados: son una experiencia nueva para muchas personas e incluso pueden percibirse difíciles de vivir, para muchas otras personas. Al echar una vista al interior y ver las rampas, estas pueden significar obstáculos para el movimiento del cuerpo.



Fig. 48 'Variaciones dimensionales en los espacios: los planos inclinados y los muros contorsionados'

Luego si se observan los muros contorsionados e inclinados y la estructura aparente en los espacios interiores del Guggenheim de Bilbao, son tan intrincados, que no se pueden asimilar a primera vista y por su forma son difíciles de vivir. Entonces aunque ambos edificios, representan el reto, de construir una forma arquitectónica compleja. En el entendido de que construir las no es nada fácil, pues es un trabajo, el cual involucra muchas ciencias y tecnologías en su construcción. A pesar de esto, la forma es más una especie de ícono arquitectónico, donde parece que se dio más importancia al elemento estético, que al funcional. En la antigüedad, las formas se asociaban a la influencia de las artes en la

arquitectura.<sup>143</sup> Sin embargo los análisis geométricos, dan como resultado la relación significativa entre la geometría y el espacio construido respecto a la salud, anatomía fisiología e higiene del cuerpo humano.

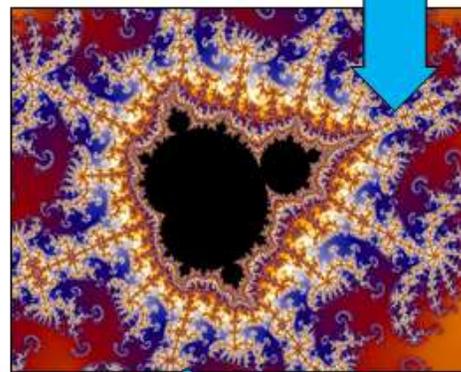
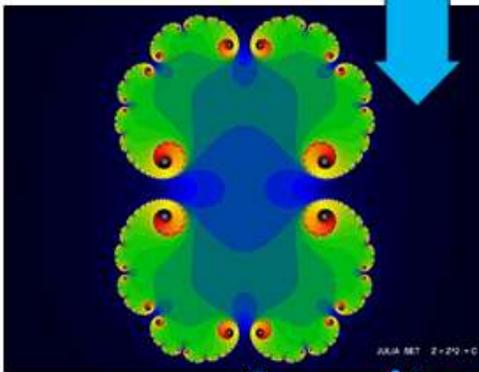
## Matemáticas existentes en el periodo moderno y contemporáneo:

conjunto de Julia

conjunto de Mandelbrot

$$Z(n + 1) = Z(n)^2 + C$$

$$\{Z_{n+1} = Z_n^2 + C\}$$



Arquitectura existente:



Fig. 49. “Nuevas geometrías, su época y la arquitectura que se estaba haciendo” Fuente: Collage elaboración propia

<sup>143</sup> “The idea of Spirit appearing, of, sort of, shining forth in objects of art is important, and Hegel defends a kind of two-fold thesis about this... Interestingly, the other part of his model is that as he moves from symbolic to classical to romantic, even though each of those epochs have all of the art medium represented in them, the paradigm of the symbolic is architecture, The real paradigm of the classical is sculpture,... The real paradigm of the romantic is painting and music...” (Hays “Lecture 3.6 The end of Art”).

“La idea del espíritu aparente, de una suerte de, brillo delante en los objetos de arte es importante. Y Hegel defiende un tipo de tesis de dos lados... Curiosamente, la otra parte de su modelo, es que a medida que pasa de lo simbólico a lo clásico y a lo romántico. Incluso aunque cada una de esas épocas, tiene todo el medio del arte, representado en ellas. El paradigma de lo simbólico es la arquitectura. El verdadero paradigma de lo clásico es la escultura,.. El verdadero paradigma del romanticismo es la pintura y la música...” (Trad. Propia).

Entre la época de la arquitectura moderna y la contemporánea, las geometrías de estas épocas, incluyen cambios multidimensionales y además la utilización de geometrías no euclidianas. Debido a la búsqueda de la innovación en ciencia, tecnología y materiales, es que el uso de la geometría fractal se dio muy fácilmente. Ya se ha comprobado, desde la antigüedad se han utilizado técnicas geométricas, asociadas al uso del espacio multidimensional. La construcción del “Crystal Palace”<sup>144</sup> de Joseph Paxton, del año 1851, de hierro y cristal. Es una obra, vinculada con la utilización de nuevas formas geométricas fractales provenientes de la imitación de la naturaleza. Este acercamiento a las formas de la naturaleza buscado por los arquitectos, Alvar Aalto lo explico de alguna forma al decir: “el ejemplo de la Biblioteca de Viipuri, que surgió de un dibujo de unas montañas con diversas laderas, iluminadas por varios soles de distintas inclinaciones”<sup>145</sup>. Haciendo alusión, a que su edificio fue diseñado y construido inspirado en los detalles fractales, provenientes de la naturaleza.

Wright tenía su propia idea de la arquitectura orgánica, con formas provenientes de la naturaleza, que dan por resultado la construcción de edificios con cualidad fractal. En la “Palmer House”<sup>146</sup>, se mencionó la utilización de un triángulo inicial, el cual se desliza en diferentes planos para crear los espacios. Sin embargo lo que hace Eisenman, ya cuando utiliza la técnica de *auto similitud* de la geometría fractal, en la casa 11<sup>a</sup>.<sup>147</sup> Se encontró que con Eisenman<sup>148</sup> se tuvo al arquitecto quien “introdujo en el año de 1978 las características fractales en la arquitectura”<sup>149</sup>. A partir de entonces hubo muestras de más de doscientos diseños arquitectónicos fractales, algunos de los arquitectos y firmas vinculadas con el uso de la geometría fractal en sus diseños se mencionan en la siguiente cita:

“En julio de 1978, menos de doce meses después de la publicación en inglés de Mandelbrot's Fractals: Form, Chance, and Dimension, Peter Eisenman exhibió su Casa 11a por primera vez. Eisenman describió este diseño, como la adopción de varias lecciones de la teoría de la complejidad y la geometría fractal, incluida la autosimilitud y la escala. En las tres décadas

---

<sup>144</sup> Wikiarquitectura. “Crystal Palace | Joseph Paxton. 1851”. 2021. [Es.wikiarquitectura.com](https://es.wikiarquitectura.com/edificio/Crystal-Palace/). 18 Ago. 2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/Crystal-Palace/>>

<sup>145</sup> (Capitel 7).

<sup>146</sup> Wright, Lloyd, Frank. “The Palmer House. 1950”. 2021. [Frank Lloyd Wright Foundation](https://franklloydwright.org/site/palmer-house/). 18 Ago. 2021 <<https://franklloydwright.org/site/palmer-house/>>

<sup>147</sup> Cca.qc.ca. “House 11<sup>a</sup> | Peter Eisenman. Palo Alto, California. 1978”. 2021. [Cca.qc.ca](https://www.cca.qc.ca/en/search?digigroup=391314). 25 Ago. 2021. <<https://www.cca.qc.ca/en/search?digigroup=391314>>

<sup>148</sup> (J. M. Ostwald 30).

<sup>149</sup> “Characteristics of Fractal were introduced by Peter Eisenman in 1978. House 11a was Eisenmans appropriation of the concept of fractal scaling”. (Sherif. Ezzeldin 42). “Las características de lo fractal fueron introducidas por Eisenman en 1978. La casa 11<sup>a</sup> fue la apropiación de Eisenman del concepto de escala fractal.” (Trad. Propia).

siguientes se han publicado más de 200 diseños arquitectónicos u obras de teoría arquitectónica que han reivindicado, de alguna manera, aspectos de la teoría del caos, la dinámica no lineal o la geometría fractal. Algunos de los arquitectos y firmas que han hecho referencia explícita a la ciencia de la complejidad o que se han relacionado con los fractales incluyen: Asymptote, Bolles Wilson, Charles Correa, Carlos Ferrater, Zaha Hadid, Coop Himmelblau, Steven Holl, Arata Isozaki, Kulka and Königs, Fumihiko Maki, Morphosis, Eric Owen Moss, Jean Nouvel, Philippe Samyn, Kazuo Shinohara, Ushida Findlay, Aldo and Hannie van Eyck, and Ben van Berkel and Caroline Bos (UNStudio).<sup>150</sup> Se dice que tras el contacto de Eisenman con la geometría fractal de Mandelbrot, el arquitecto “apropió el concepto de escala fractal en su arquitectura.”<sup>151</sup>

A continuación se muestran dos edificios contemporáneos, que se consideran son un ejemplo de la manera en que luce la arquitectura clásica (restaurada con elementos contemporáneos), comparada contra la arquitectura fractal. Se observa en uno de estos ejemplos, la obra de restauración del “Reichstag Parlamento Alemán”. Del arquitecto Norman Foster, terminada en 1999, donde el edificio de arquitectura clásica, incluye elementos restaurados y elementos fractales, como la cúpula de vidrio.<sup>152</sup> Para Foster el edificio: “fue un problema de transformación de lo viejo...”<sup>153</sup> Y por otro lado, el edificio del “Aronoff Center for Design and Art”, del año de 1996 construido por el arquitecto Eisenman. Son dos edificios de la misma época, pero dejan ver de algún modo, el cambio en el uso de la geometría arquitectónica. Que simboliza el cambio del uso de columnas a muros y finalmente a muros con formas fractales (lo cual incluye formas retorcidas, recortadas, transformadas, etc.) y el cambio de los métodos constructivos y la forma en la que se construyen los edificios, la cual

---

<sup>150</sup> (J. M. Ostwald 30). “In July of 1978, less than twelve months after the English language publication of Mandelbrot’s *Fractals: Form, Chance, and Dimension*, Peter Eisenman exhibited his House 11a for the first time. Eisenman described this design as adopting several lessons from complexity theory and fractal geometry including self-similarity and scaling. In the three decades which followed, more than 200 architectural designs or works of architectural theory have been published which have laid claim, in some way, to aspects of chaos theory, nonlinear dynamics or fractal geometry. Some of the architects and firms that have either made explicit reference to complexity science, or have been linked to fractals include: Asymptote, Bolles Wilson, Charles Correa, Carlos Ferrater, Zaha Hadid, Coop Himmelblau, Steven Holl, Arata Isozaki, Kulka and Königs, Fumihiko Maki, Morphosis, Eric Owen Moss, Jean Nouvel, Philippe Samyn, Kazuo Shinohara, Ushida Findlay, Aldo and Hannie van Eyck, and Ben van Berkel and Caroline Bos (UNStudio).”

<sup>151</sup> Ostwald, J. Michael. “Fractal Architecture: Late Twentieth Century Connections between Architecture and Fractal Geometry”. *NEXUS NETWORK JOURNAL – VOL. 3, No. 1*, 2001.

<sup>152</sup> “No building is more symbolically charged than Reichstag in Berlin”. (Sudjic 456). “No hay edificio que este mas cargado simbólicamente que el Reichstag en Berlin”. (Trad. Propia).

<sup>153</sup> (Quantrill 62).

es física<sup>154</sup> y se puede ver; tocar y estar dentro,<sup>155</sup> gracias a la ordenación de los elementos arquitectónicos que hacen la disposición de espacio dentro de la obra.



Fig. 50. Reproducción de un orden clásico en un edificio contemporáneo y un diseño de arquitectura fractal. Fuente<sup>156</sup>

**2.3 Elementos arquitectónicos y sus dimensiones.** Debido a que la toma de medidas de la altura del cuerpo humano es variable, es que se toman los promedios como una medida aceptable, ya que existen múltiples variaciones dimensionales. Este es el motivo por el que se contempla, el diseño arquitectónico y la construcción de espacios, como una importante filosofía de buena vida. Nota: la versión contemporánea de este concepto, se tomó del libro *Ética para Amador* de Fernando Savater.<sup>157</sup> Sobre todo se toman algunos preceptos básicos, que se consideran por toda la comunidad humana, los propios para subsistir.

“...ciertas cosas uno puede aprenderlas o no, a voluntad... Se puede vivir sin saber astrofísica,..., incluso sin saber leer ni escribir... Ahora bien, otras cosas hay que saberlas

---

<sup>154</sup> “Unlike language, which is understandable through the gaze alone, in architecture there is no such thing as the sign of a column or a window without the actual presence of a column or a window. Both the gaze and the body are implicated by the interiority of architecture. This interiority, this necessity to enclose, is not found in language or even in painting or sculpture”. (Eisenman “A Reply to Jacques Derrida” 16-17).

“A diferencia del lenguaje, que es comprensible solo a través de la mirada, en arquitectura no hay tal cosa como el signo de una columna o un ventana sin la presencia real de una columna o una ventana. Tanto la mirada como el cuerpo se implican con la interioridad de la arquitectura. Esta interioridad, esta necesidad de guardar, no se encuentra en el lenguaje o incluso ni en la pintura o escultura”. (Trad. Propia).

<sup>155</sup> “La ordenación se regula por la cantidad. La cantidad se define como la toma de unos módulos a partir de la misma obra, para cada uno de sus elementos y lograr así un resultado apropiado o armónico de la obra en su conjunto”. (Vitruvio 32).

<sup>156</sup> Foster, Norman. “Projects Reichstag: New German Parliament”. 1999. [Foster and Partners.com](https://www.fosterandpartners.com/projects/reichstag-new-german-parliament/#gallery). 17 Feb. 2021 <<https://www.fosterandpartners.com/projects/reichstag-new-german-parliament/#gallery>>. Y: Eisenman, Peter. “ARONOFF CENTER FOR DESIGN AND ART. Cincinnati, Ohio 1988-1996” 1996. [Eisenman Architects.com](https://www.eisenmanarchitects.com) 17 Feb. 2021 <<https://www.eisenmanarchitects.com/Aronoff-Center-for-Design-and-Art-1996>>

<sup>157</sup> (Savater)

porque en ello, como suele decirse, nos va la vida. Es preciso estar enterado, por ejemplo, de que saltar desde el balcón de un sexto piso no es cosa buena para la salud...<sup>158</sup>

Existen así mismo elementos arquitectónicos, que están diseñados en otra dimensión que no es la del ser humano. ¿Pero, qué es esto de la dimensión humana? A partir del entendimiento multidimensional, que arroja el cálculo de la dimensión fractal, se acepta que cada objeto de la naturaleza tiene una forma única. Bajo esta premisa, se considera que la dimensión humana, es aquella que favorece la conservación de la salud, anatomía, fisiología e higiene humanas de una amplia población. Un diagrama: del picaporte esférico, comparado contra el que tiene palanca, muestra estas diferencias dimensionales. Sin utilizar medidas, estas diferencias se refieren al apalancamiento y a la falta de este; el esférico está diseñado para ser un obstáculo y el de palanca es más maniobrable. Si un edificio está hecho para un amplio sector de la población, al usar este picaporte por estética, se sesga la población hacia solo las personas que pueden usar el elemento. Para cambiar esto se puede adaptar la estética:

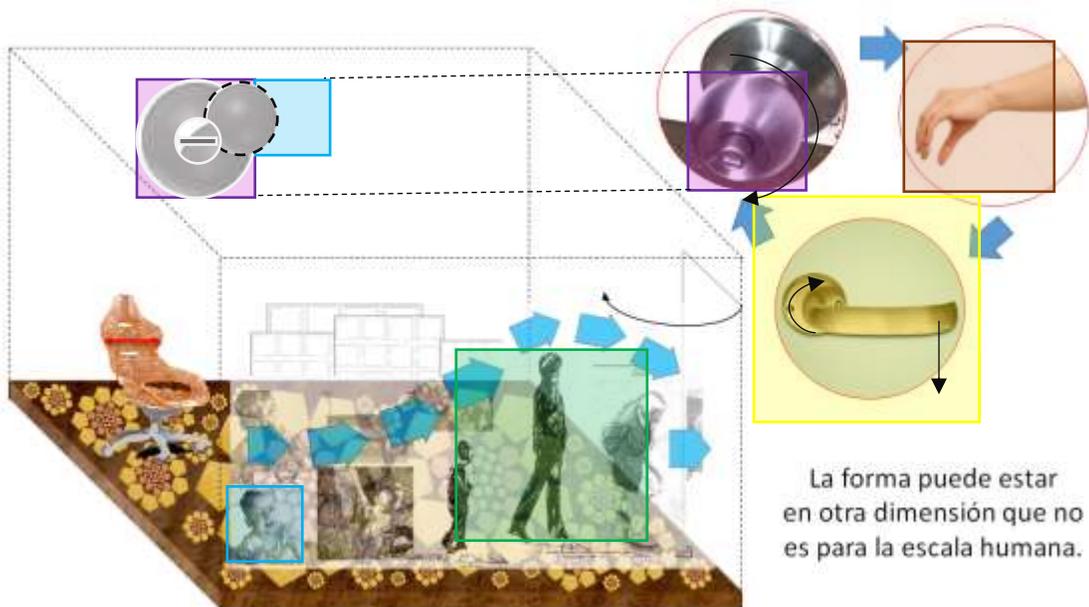


Fig. 51. Elementos de difícil uso para ciertas condiciones físicas. Elaboración propia

Si se utiliza la regla de auto similitud, y se suma al diagrama del picaporte esférico, dos esferas auto similares. Una para servir de palanca y la otra para ponerle seguro a la puerta. Las tres esferas, se ordenan de tal forma, que el picaporte sería la esfera grande con diámetro de 1.57 cm., una esfera de 0.97 cm de diámetro que sirve de apalancamiento y movimiento del mecanismo, y un botón de 0.60 cm., para el seguro del picaporte. En este caso la

<sup>158</sup> (Savater 5-11)

proporción del diagrama, se aproxima a la siguiente serie de Fibonacci, calculada siguiendo la medida de longitud pulgada:

$$\text{Esfera 1} = \frac{2.54}{1.618} \approx 1.57\text{cm}$$

$$\text{Esfera 2} = \frac{1.57}{1.618} \approx 0.97\text{cm}$$

$$\text{Esfera 3} = \frac{0.97}{1.618} \approx 0.60\text{cm}$$

En conclusión, se propone que el diseño de elementos arquitectónicos, es preferible que no sufra afectaciones significativas debidas a la estética. En el entendido de conservar la dimensión humana en las obras, pues la arquitectura tiene como elemento central, el cuerpo humano. Incluso aplicar una imposición de ideas, de cómo el arquitecto aconseja sería mejor vivir el edificio (como sucedió con el Guggenheim de New York, donde Wright argumentó que la mejor manera de vivir el paseo del museo, es subiendo por el elevador y bajando por los pisos, que son rampas), es imposible se cumpla. Porque la arquitectura es algo que se construye: “El montículo no es en realidad una pirámide. La pirámide es algo que tenemos que construir”.<sup>159</sup> Y que se vive, por lo es imposible disponer la manera en la que las personas, van a realizar sus actividades. En todo caso Wright pudo haber puesto de entrada el elevador, o crear las rampas alternadas entre planos ortogonales e inclinados, para que después de un descanso sobre lo plano las personas caminen sobre el plano inclinado.

Se ha observado, que la forma con la que se construyen los espacios arquitectónicos, infieren directamente en la anatomía del cuerpo. Los pies posados en un piso plano están alineados y acomodados según la anatomía del cuerpo, sin embargo en pendiente, los pies están desalineados respecto a la anatomía natural del cuerpo humano. Para poner un ejemplo, se revisa la construcción de unas escaleras icónicas de la arquitectura mexicana, sobre todo desde el punto de vista geométrico y no de su proyección arquitectónica, pues el aspecto estético es dominante incluso por encima de la dimensión humana. Pues la escalera debido a su forma, no puede ser utilizada por una parte de la comunidad humana, donde hay

---

<sup>159</sup> “We come upon a mound in the forest. But immediately, we see that the mound has been shaped. Someone has constructed it, and someone has constructed it into the shape of a pyramid. The mound is not actually a pyramid. The pyramid is something that we have to construct in the architectural imagination.”(Hays “Lecture 4.1 That is Architecture”).

“Llegamos hacia un montículo en el bosque. Pero inmediatamente, vemos que el montículo ha sido moldeado. Alguien lo ha construido, y alguien lo ha construido. en forma de pirámide. El montículo, en realidad no es una pirámide, la pirámide es algo que tenemos que construir arquitectónicamente en la imaginación”. (Trad. Propia)

presentes edades con capacidades limitadas. Se puede decir, que para niños y personas de la tercera edad – por citar algunas –, el uso de este elemento arquitectónico: supone una barrera al no tener elementos de seguridad. Para que cualquier persona, llegue a un segundo nivel de un edificio, se consideran estos aspectos de seguridad. Pues los cuerpos a una altura, se encuentran sujetos a las leyes de la gravedad y una caída a cualquier altura, puede resultar en daños graves a la salud e integridad física.

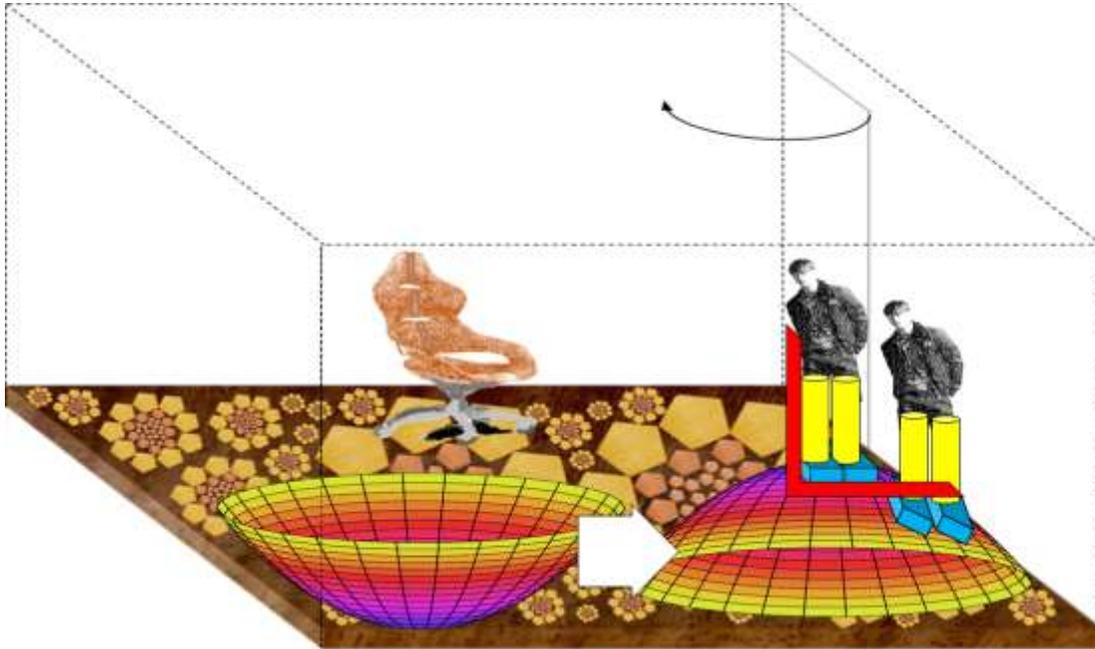


Fig. 52. 'Espacio: piso, muros, techo, objetos y el cuerpo'. Fuente elaboración propia.

Por eso antes se mencionan datos respecto a la altura, Sears señala que “la aceleración debida a la gravedad disminuye con la altura; sin embargo, si esta variación a lo largo de la dimensión vertical del cuerpo es despreciable, el centro de gravedad es idéntico al centro de masa”. Los puntos de equilibrio del ser humano, fácilmente se pueden ver afectados por variables propias de la naturaleza, como la gravedad y la altura. En este sentido es que se analizan las escaleras, porque en ellas actúan múltiples variables las cuales afectan al ser humano. Las escaleras son un elemento arquitectónico funcional, sirven para ayudar a ascender de un piso bajo a un siguiente nivel más alto o viceversa – para descender –, estas han tenido una serie interpretaciones estéticas excepcionales. Hay de muchas formas y estilos, así como también de varias dimensiones, pero siempre son para lo mismo. A continuación, se analiza una escalera controversial, la cuestión es considerar que la variable de la altura afecta al ser humano.

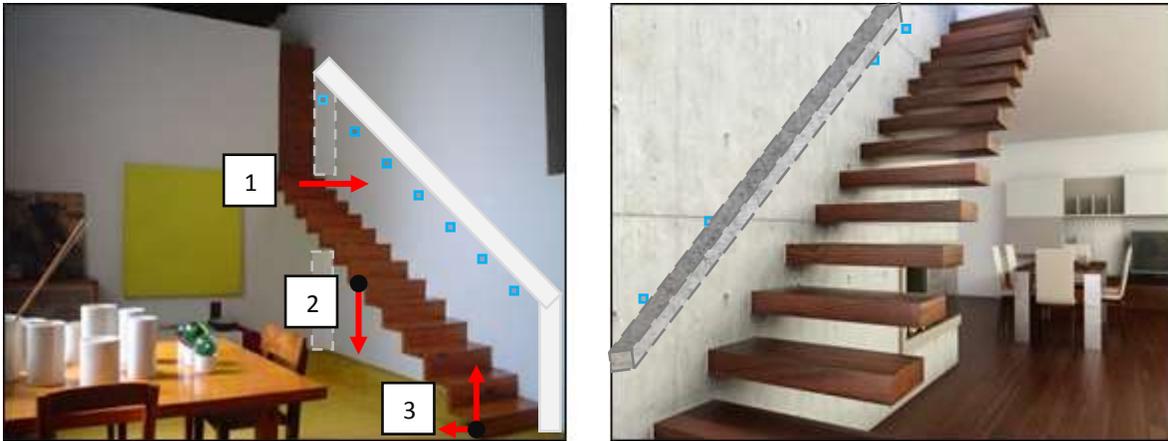


Fig. 53. Escalera “escultura” de Luis Barragán. El Epicentro, hallazgos visibles. Fuente<sup>160</sup>

En el caso de una escalera las fuerzas que actúan son:

- 1.- La fuerza normal ejercida por la loza o el piso del nivel de planta alta, donde se ancla la escalera
- 2.- El peso de todo el elemento arquitectónico (escalera)
- 3.- Las fuerzas de la base son la fuerza normal hacia arriba y la fuerza de fricción estática – fuerza opuesta del piso contra la escalera –

Esta controvertida escalera de la Casa de Tacubaya del Arq. Ing. Luis Barragán, en una conversación entre Carlos Mijares, Fernández, Kalach y Alcántara. Mijares dijo: “Pero... cuidado si intentas usarla como escalera. Kalach: Es quizás más bien una escultura”.<sup>161</sup> Por eso se reconoce que tiene una forma escultural, lo cual le da un sentido multidimensional al espacio de la escalera, que se considera se aleja de la dimensión humana para muchas personas que tendrían límites para usarla.

<sup>160</sup> 1.- Pinterest. “Escalera de la casa de Tacubaya de Barragán”. 24 Feb. 2021. [Pinterest.com](https://www.pinterest.com.mx/pin/487373990919934371/), 24 Feb. 2021 <https://www.pinterest.com.mx/pin/487373990919934371/>. 2.- Escalera similar de arquitectura contemporánea. Decorative Treppe. “Entdecken Sie die extravagantesten Designs”. 2021. [Neue Dekor](https://br.pinterest.com/pin/649010996279930261/) 24 Feb. 2021 <https://br.pinterest.com/pin/649010996279930261/>.

<sup>161</sup> Sobre una escalera de Luis Barragán. Conversan Mijares, Fernández, Kalach y Alcántara. Siglo en la Brisa. Blog del escritor mexicano: Fernández, Fernando. “Sobre una escalera de Luis Barragán”. 9 Oct. 2015. [Blogspot.com](http://oralapluma.blogspot.com/2015/10/sobre-una-escalera-de-luis-barragan.html?m=1). 28 Ago. 2021 <oralapluma.blogspot.com/2015/10/sobre-una-escalera-de-luis-barragan.html?m=1>

### ***C3. Técnicas Fractales: Tres Dimensiones y Auto Similitud***

**3.1 Introducción.** En adelante se utilizarán las cuatro teorías de la arquitectura fractal, para medir detalles de calidad fractal en edificios de arquitectura fractal. En este capítulo se revisan las dos primeras técnicas, la utilización de tres dimensiones diferentes – ya sea en el perímetro del edificio o en sus espacios exteriores –, para crear un conjunto arquitectónico. Y la técnica de auto similitud, distinguida por utilizar; una figura geométrica inicial y sus reproducciones auto semejantes pero en diferentes dimensiones y con la unión de todas, hacer una nueva figura o nueva forma arquitectónica y/o arquitectura. Estas dos primeras técnicas, se distinguen por estar hechas a mano. El primer edificio se analiza considerando la teoría uno. **3.2 Técnica 1. Tres Dimensiones Aplicadas a la Arquitectura.** Ya se dio la introducción y el ejemplo, de a lo que se refiere Mandelbrot, con la característica multidimensional que presentan algunos edificios y otros no. El Museo de Londres, ubicado en el Reino Unido, en Cromwell Road, SW7 2RL. Construido por Libeskind en 1996, tiene una arquitectura basada en una espiral y su planta tiene una forma multidimensional.

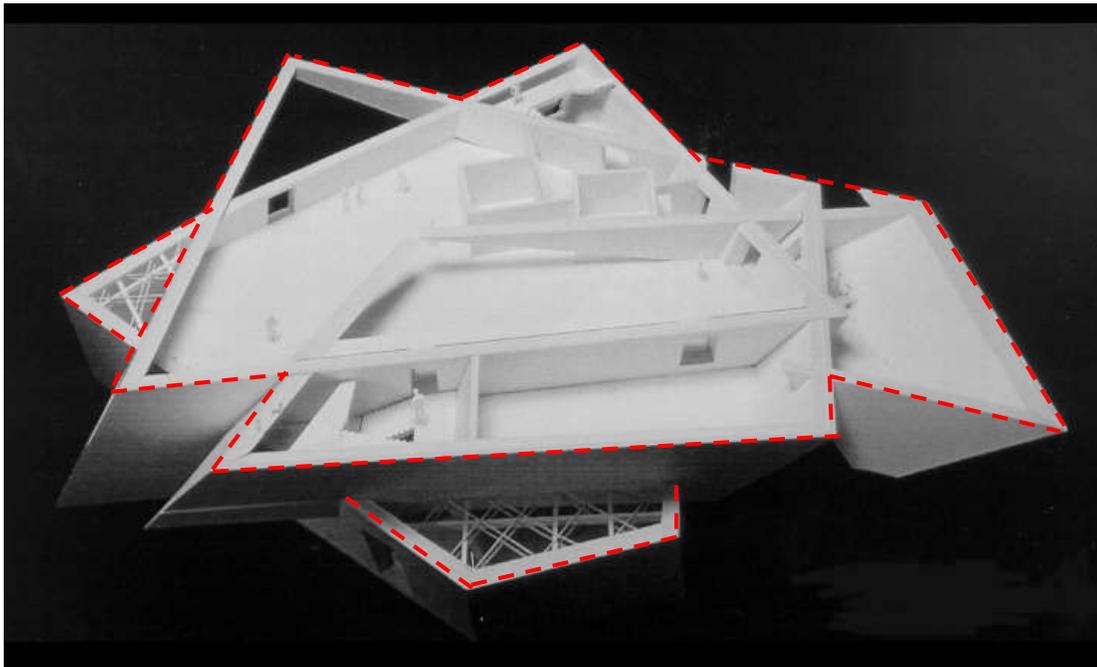


Fig. 54. Maqueta mostrando los posibles cambios múltiples con que se construye la planta. Fuente imagen.<sup>162</sup>

<sup>162</sup> David Langdon. "AD Classics: V&A Spiral Daniel Libeskind Cecil Balmond" 29 Jun 2015. ArchDaily. 18 Ago 2021. <<https://www.archdaily.com/768565/ad-classics-v-and-a-spiral-daniel-libeskind-plus-cecil-balmond>> "The project begins as a single tectonic strip folded into itself in an upward spiral six layers high". "El proyecto comienza como una única franja tectónica plegada sobre sí misma en una espiral ascendente de seis capas de altura". (Trad. Propia)

En la figura anterior se señalan algunos cambios, que en el proceso de diseño –en este caso en la maqueta –, dan la forma que se diseñó para la planta. Luego se señalan con los paneles de Fibonacci, los cambios de dimensión que tiene la plantilla de la figura fractal, utilizada para diseñar los espacios exteriores del Museo de Londres. No hace falta más que constatar que, de inicio el diseño arquitectónico, es bastante pretencioso y no se voltean a ver las obras de arquitectura clásicas. Sin embargo lo materializado en la obra es una forma única, con los acabados de sus espacios exteriores, siguiendo la secuencia de la forma una la espiral.<sup>163</sup>

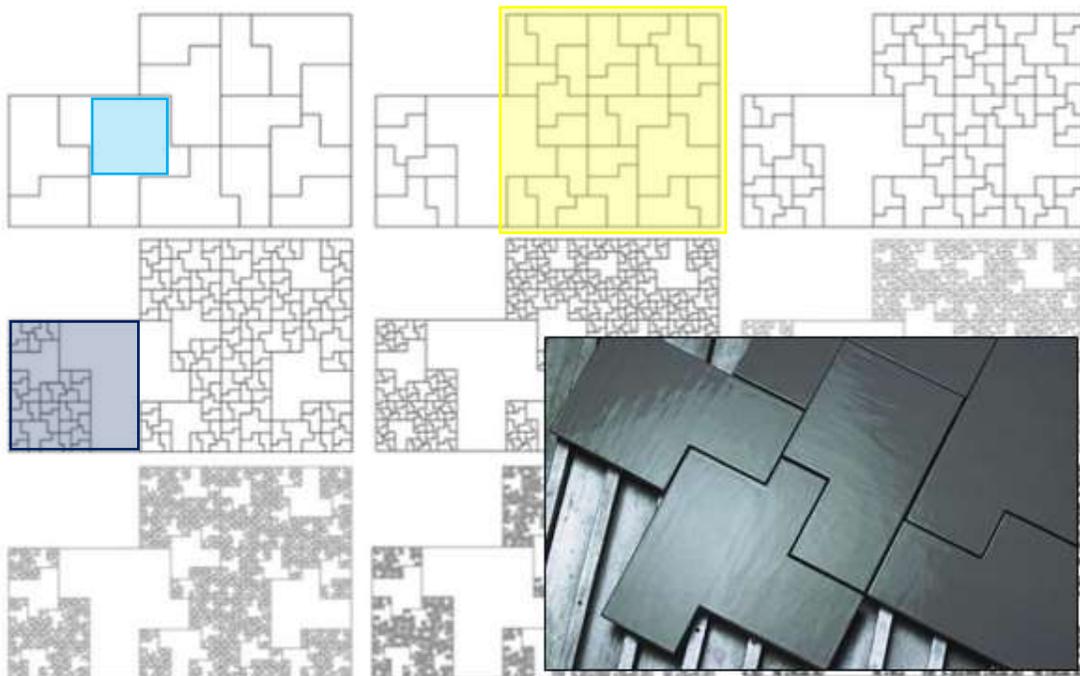


Fig. 55. Patrones geométricos espacios exteriores del museo. Fuente imagen.<sup>164</sup>

En la gráfica se hacen coincidir los paneles, con algunos de los patrones geométricos fractales y sus diferentes iteraciones. Estas nuevas posibilidades en la arquitectura, tienen su fundamento en la arquitectura del pasado, en que conservan incluso elementos ya dichos por

<sup>163</sup> “According to Studio Balmond's [website](#), this ‘mathematical mosaic... illustrates the sequential nature of the building's spiral form.’ Dancing across the folded walls like pixelated static, these tiles are animated by the same dialectic of chaos and control that pervades the project's entirety. Inspired by the geometry of fractals, they attempt to channel an energy that is cosmic and infinite”. (Langdon, David. "AD Classics: V&A Spiral Daniel Libeskind Cecil Balmond").

“De acuerdo con el sitio de internet del estudio Balmond’s, este ‘mosaico matemático... ilustra la secuencia natural de la construcción de una forma espiral’. Bailando a través paredes plegadas como un pixeles estáticos, estos tejidos está animados por la misma dialéctica del caos y el control que se extiende al proyecto en su totalidad. Inspirado en la geometría de los fractales, ellos atentaron en dirigir una energía que es cósmica e infinita...” (Trad. Propia)

<sup>164</sup> (David Langdon. "AD Classics: V&A Spiral Daniel Libeskind Cecil Balmond").

Vitruvio: seguridad (bien cimentadas), utilidad (bien construidas con sus partes bien dispuestas, note que en esta parte, como ya se ha dicho: el experimentar con nuevas formas arquitectónicas se produjeron edificios difíciles de vivir) y belleza (son de aspecto agradable y esmerado). Además se puede ver que la arquitectura de muros que utilizó Alberti, transformada en un edificio, que parece una pieza única de arquitectura fractal. Por eso bien se dice que “los teóricos más importantes, se sienten atraídos por la arquitectura del pasado, en orden de conceder autoridad en sus escritos” (Hearn). Y esta autoridad se busca en la construcción, la planta del panteón<sup>165</sup> por ejemplo, brinda al arquitecto una perspectiva exterior e interior del edificio de lo que es un círculo y una semiesfera en un edificio. Y de este modo se fueron creando nuevas formas y elementos en la arquitectura, según la época; siempre bajo el estándar de estar hechas para el humano promedio, y buscando resolver las nuevas necesidades arquitectónicas de las nuevas generaciones. Sean estas morfológicas, estéticas, geométricas; o cualquiera de otras variables de interés científico; el objetivo central es que comunique de manera significativa que el espacio construido es para uso humano.



Fig. 56. 'Un edificio de formas caóticas en un contexto arquitectónico clásico'. Fuente imagen.<sup>166</sup>

Ahora en el caso de la arquitectura contemporánea del museo, el recurso utilizado, es una estructura de arquitectura fractal. Que se logró a partir de la forma de una espiral, sus

---

<sup>165</sup> (Hearn 79)

<sup>166</sup> (David Langdon. "AD Classics: V&A Spiral Daniel Libeskind Cecil Balmond").

volúmenes intersecados, siguen de alguna forma la estructura de la espiral; al ver el edificio se ven los volúmenes arquitectónicos intersecados; sin columnas debido a que su forma estructural es de una arquitectura de muros; y la estructura misma es el soporte del edificio y la totalidad del edificio. Esta arquitectura de muro que se originó con Alberti y que los arquitectos contemporáneos, la entienden como una estructura habitable (por ejemplo el arquitecto de la torre Reforma Arup en México, Benjamín Romano, habla del edificio como una estructura habitable. “Se construyó soportada por muros en forma de ‘L’”...<sup>167</sup>), aunque en este caso la estructura es una envoltura fractal. Hecha a base de muros, que siguen la forma fractal y sirven para darle sentido al espacio del museo. Se puede ver en el edificio la base técnica del pasado, respaldada en la arquitectura de muro clásica. Donde toda la estructura es el soporte, base y espacios libres del edificio.

Haciendo conclusiones, respecto a la geometría fractal, aplicada en la arquitectura. Actualmente y desde principios del siglo veintiuno, en España se celebran congresos internacionales, sobre los fundamentos fractales para el diseño arquitectónico y medioambiental del siglo XXI.<sup>168</sup> Entonces se concluye que: al observar lo que de inicio fueron los tres cambios dimensionales en la planta, según la relación de la teoría uno, construido en un lote de forma rectangular. El edificio fractal, incluso desafía el contexto urbano de la forma del terreno y desde el diseño incorpora en planta, múltiples cambios dimensionales. Respecto al alzado y la estructura estos cambios si son perceptibles en la imagen de la obra de arquitectura. Es imprescindible decir que estos cambios también son estructurales, pues según se vio los edificios fractales son estructuras compuestas por una arquitectura de muro, donde estos se ordenan dándole forma fractal al edificio.<sup>169</sup>

---

<sup>167</sup> Hablando de la torre Reforma Arup: “En planta es este esquema muy limpio de dos muros en “L”... Que dejan el espacio de atrás, un espacio servidor, piensen en Louis Khan...”. (SMIE ESIA Tecamachalco. “Estructuración Arquitectónica | Arq. Benjamín Romano”. Min. (18:30-19:00)). SMIE ESIA Tecamachalco. “Estructuración Arquitectónica | Arq. Benjamín Romano”. 9 Sep. 2020. [FaceBook Watch](https://fb.watch/e7ak-184er/). 10 Sep. 2020 <<https://fb.watch/e7ak-184er/>>

<sup>168</sup> Jiménez, Gómez, José Manuel. “Arquitectura Fractal para la Universidad Politécnica de Madrid (upm)”. 2019. UPM. 10 Ene. 2020 <[https://innovacioneducativa.upm.es/sandbox/pensamiento/chip\\_geometrico/arquitectura\\_fractal.pdf](https://innovacioneducativa.upm.es/sandbox/pensamiento/chip_geometrico/arquitectura_fractal.pdf)>

<sup>169</sup> “The building is derived from an extruded section of a fractal pattern: a geometric pattern relating to the Golden Section. The extruded line was then wrapped upon itself to create the unique shape of the non-axial spiral. The system of continuous, interlocking wall elements required no supporting beams, thus creating unencumbered, free flowing interior spaces that mirror the movement in the façade...” (Libeskind, Daniel. “V&A Museum Extension, London, England”. 2002. [libeskind.com](https://libeskind.com). 16 Oct. 2022 <<https://libeskind.com/work/va-museum-extension-competition/>>).

“El edificio se deriva de una sección extraída de un patrón fractal: un patrón geométrico relacionado con la Sección Dorada. Luego, la línea extraída se envolvió sobre sí misma, para crear la forma única de la espiral

**3.3 Técnica 2. Auto similitud ‘Self Similarity’.** Para analizar la siguiente obra fractal de arquitectura, se recuerda que la regla de auto similitud, está basada en utilizar una figura geométrica de origen y reproducirla idéntica pero en diferentes dimensiones. La construcción de una figura, con la figura inicial y sus reproducciones, es a lo que se refiere la técnica dos. En arquitectura la propuesta de Eisenman; fue realizar un diseño arquitectónico, construido con elementos arquitectónicos que crean espacios con formas de “L”, presentes desde; un elemento arquitectónico individual; hasta toda la casa o arquitectura. Para comprobar si hay auto similitud o no, hay que medir los elementos arquitectónicos analizados y comprobar si todas las formas son iguales, aunque de diferente dimensión. La facilidad que ofrece utilizar el rectángulo áureo, es que se amplía el entendimiento de la regla de auto similitud. Pues todos los rectángulos paralelogramos, aunque cambien de dimensiones, son rectángulos.

Al hablar de proporciones, el rectángulo áureo, es aquel formado por cuadrados que siguen una serie. Y entre cambios dimensionales, según se ha venido explicando, los rectángulos áureos conservan la regla de auto similitud.

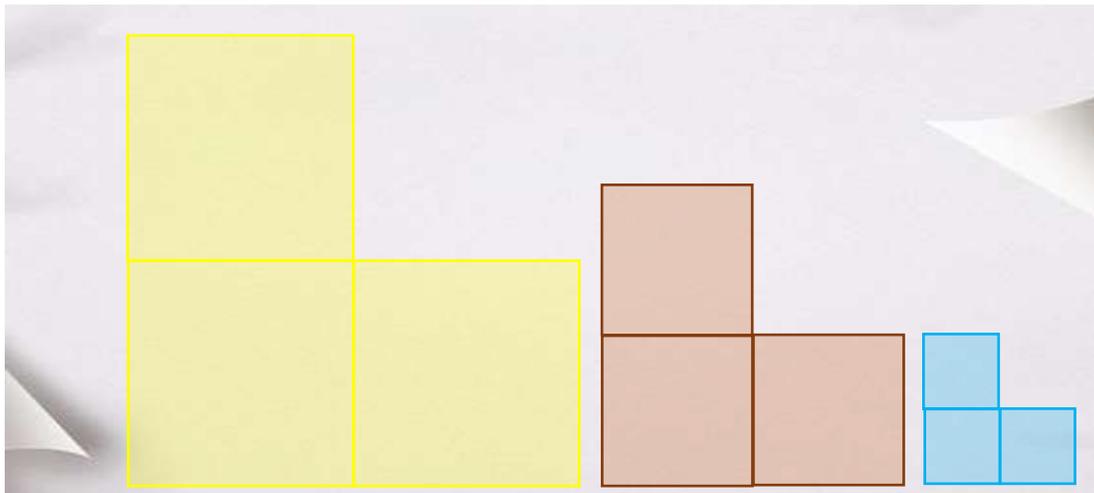


Fig. 57. ‘Los conjuntos de bloques que siguen la regla de *auto similitud*’. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior, con los paneles de Fibonacci se demuestra cómo sería una figura compuesta, escalada de dimensión tres veces y siguiendo la regla de auto similitud: comprobada con la construcción de cuadrados, que son la figura geométrica de los paneles. Pero como menciona Fil Hearn,<sup>170</sup> para integrar con autoridad algún diseño a la arquitectura,

---

no axial. El sistema de muros continuos y entrelazados no requirió vigas de soporte, esto crea espacios interiores libres de obstáculos que fluyen libremente reflejando el movimiento de la fachada...” (Trad. Propia).

<sup>170</sup> (Hearn 51) “Most important theorists have appealed to the architecture of the past in order to confer authority, upon their dicta” “Los teóricos más importantes han apelado a la arquitectura del pasado, en orden de conferir autoridad a sus dictados”. (Trad. Propia)

es importante comprender el pasado. Y la naturaleza ha jugado un papel muy importante, en la figura siguiente, se muestra algunos usos de formas de la naturaleza para el diseño.



Fig. 58. “De la naturaleza a las estructuras fractales”

Ya se revisó que Praxton, inspirado en una flor acuática, hizo el diseño arquitectónico para el crystal Palace. Al observar la ordenación y disposición de los lirios acuáticos y ver más adelante en el tiempo la disposición de la arquitectura que Wright utilizó en las oficinas del edificio administrativo de SC Johnson<sup>171</sup> de 1937-1939 en Wisconsin. Básicamente en la investigación se interpreta visualmente como la vista desde debajo del agua hacia el exterior, de una población de lirios acuáticos gigantes. De ahí a lo que hizo el arquitecto Arne Jacobsen, en el diseño de su gasolinera en Copenhage, Dinamarca y lo que años después se vino a ver en la Ciudad de México con las gasolineras de Felix Candela. Todas son ejemplos de estructuras, que están dispuestas geoméricamente, de una manera muy similar a las que se ven en las formas de la naturaleza. Y son ejemplos de ‘auto similitud’.

***El Memorial Judio de Berlín.*** Situado cerca de la puerta de Brandeburgo Alemania, el arquitecto Peter Eisenman y el ingeniero Buro Happold, construyeron 2711 estelas – bloques

<sup>171</sup> Vox. “What it’s like to work in the world’s greatest office”. 2022. youtube.com. 10 Sep. 2022 <<https://youtu.be/yb-kYt1lplnI>>, Imágenes figura 98.1 - Min. (1:06- 1:15), (13:30).

de concreto – con dimensiones de  $2.38m$  de largo  $0.95m$  de ancho y con alturas variables entre  $0.2m$  y  $4.8m$ , que Eisenman describió como un proceso aleatorio.



Fig. 59. ‘Los bloques de concreto de altura aleatoria’. Fuente: Elaboración propia. Con imagen de<sup>172</sup>

En el memorial al Holocausto de Eisenman,<sup>173</sup> se puede ver la cualidad fractal, sin buscarla con mucho detalle. Estudiando la arquitectónica, se hacen notar los límites del perímetro y se tiene presente su variación en la forma, observando los límites en donde se encuentran los bloques. Los volúmenes que tienen son variables en dimensiones, solo cambian en dimensiones respecto a la altura, pues la cara que ve al cielo en cada bloque: sigue la regla de *auto similitud*. Las dimensiones constantes son el largo y el ancho y no corresponden a un rectángulo áureo, pues si su largo es de  $2.38m$  el ancho debería tener aproximadamente:

$$\text{Ancho bloque} = 2.38m \div [\varphi = 1.618] = 1.47m$$

<sup>172</sup> Txalapartari. “Holocaust Memorial Berlin”. 7 Feb. 2008. [Commons](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Holocaust_Memorial_Berlin.JPG). 01 Ene. 2021 < [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Holocaust\\_Memorial\\_Berlin.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Holocaust_Memorial_Berlin.JPG) >

<sup>173</sup> “So I’m looking for those conditions in architecture which are like the music in film, which are secondary... You know, environments have an effect, like this room: we look at the room and maybe it says nothing. We can use it, it still functions, we can sit, we can talk, we can see out.” (Corbo 94).

“Entonces estoy buscando esas condiciones en la arquitectura las cuales son como la música de un filme, la cual es secundaria... Como sabes los ambientes tienen un efecto, como este cuarto: vemos hacia él y tal vez no te dice nada...” (Trad. Propia).

Eisenman desde sus inicios en la arquitectura tuvo la idea de transformar la forma,<sup>174</sup> en una discusión acerca de la “Maison Dom-ino” dice que el diseño trasciende incluso los sistemas como el técnico. Este tipo de ejemplos de obras de arquitectura, que surgen de diseños complejos: por su constitución única en elementos como el orden; la simetría y asimetría; la disposición y otras. Pueden mostrar en sí muchas técnicas de la arquitectura contemporánea, como el diseño arquitectónico deconstructivo,<sup>175</sup> que es otro ejemplo de uso de la geometría fractal. Se mencionó que este estilo, Derrida mencionó que no es simplemente la técnica de un arquitecto, sino que incluso es un recurso que transforma la técnica. Como se ha visto, es la consecuencia del uso de la geometría fractal de Mandelbrot, integrada en el proceso de producción de la arquitectura. Aunque las variaciones multidimensionales siempre han existido, en la arquitectura hecha con geometría clásica, se definían dentro de la búsqueda de las formas de la naturaleza.

Con el cambio que suma la utilización de la geometría fractal para la producción de arquitectura, se tiene una técnica geométrica más estandarizada, para trabajar con las variaciones del espacio multidimensional. Buscando una semiosis arquitectónica con un discurso estético fractal y espacios que promuevan la salud de la anatomía, fisiología e higiene humanas. Eisenman comenta:<sup>176</sup> que ‘esta cualidad de la arquitectura de ser real, bien plantada y firme, no se debe perder’. El memorial Judío de Berlín, permite ver de diferente manera la arquitectura fractal, las estelas construidas con la técnica de *auto similitud*. Cada bloque modulado de manera aleatoria, en conjunto dan una forma fractal, donde se notan variaciones multidimensionales. A su vez con las mismas estelas, Eisenman formó elementos arquitectónicos: en este caso los pasillos para caminar entre el monumento.

---

<sup>174</sup> (Ídem 17) “Robert Somol and Sarah Whiting wrote of Eisenman’s discussion of the Maison Dom-ino: “It’s the design process itself that is being registered, rather than the material productive and technical system, or specific context.” “Robert y Sara escribieron la discusión de Eisenman sobre la Maison Dom-ino. ‘Es el proceso de diseño por sí mismo lo que se puede registrar, en lugar del material de producción – construcción – y el sistema técnico o el contexto específico” Trad. Propia

<sup>175</sup> (Ídem 53) Deconstruction itself resembles an architectural metaphor...It is not simply the technique of an architect who knows how to de-construct what has been constructed, but a probing that touches upon the technique itself, upon the authority of the architectural metaphor and thereby constitutes its own architectural rhetoric...One could say that there is nothing more architectural than deconstruction, but also nothing less architectural. (Jacques Derrida). “La deconstrucción por si misma se asemeja a una metáfora arquitectónica... No es simple la técnica de un arquitecto que conoce como de-construir lo que ha sido construido... Uno puede decir que no hay nada más arquitectónico que la deconstrucción, pero también nada menos arquitectónico.” Trad. Propia

<sup>176</sup> (Ídem 62) “He wants architecture to stand still and be what he assumes it appropriately should be in order that philosophy can be free to move and speculate. In other words, he wants architecture to be real, to be grounded, to be solid, not to move around – that is what Jacques wants.” “El quiere que la arquitectura sea real, que sea fundamentada, que sea sólida, que no se mueva – eso es lo que Jacques quiere.” Trad. Propia

#### ***C4. Técnicas Fractales: Espacios y uso de Materiales.***

**4.1 Introducción.** En el presente capítulo se continúa la práctica, ahora con la utilización de las técnicas tres y cuatro. Ya se mencionó que las medidas y proporciones, se toman con un interés dirigido a estudiar cuestiones arquitectónicas, con fines de ordenación. Pues en sí se recurre más a las demostraciones visuales con las imágenes, figuras geométricas ‘el cuadrado’ y medidas estándar. Las ecuaciones presentadas solo se utilizan para darle noción de orden a la práctica, con ellas se obtienen datos de las operaciones entre unidades de medida. La técnica tres, se refiere al análisis de dimensión fractal y la utilización del espacio multidimensional, respaldado con las retículas de dimensión fractal, lo cual se explicó con detalle en el capítulo uno. Logrando que en cada iteración, las nuevas retículas, estén multiplicadas respecto a la retícula de inicio. En este caso los cambios de dimensión se simulan con los *paneles de Fibonacci*.

La práctica no es de análisis de edificios, lo cual ya se hizo, sino con la utilización de la técnica tres del cálculo de la dimensión fractal y la utilización de los *paneles de Fibonacci* se construye un diagrama fractal. Al final de esto, se analiza algo de la arquitectura fractal de formas caóticas, recordando que aquí los volúmenes son muy importantes. Se utilizan como medidas estándar:

*Altura, ancho y profundidad → Volumen*

A partir del manejo de volúmenes es que se crean formas y estructuras que se aproximan a la forma caótica o compleja pero sin dejar de tener estructuras ortogonales: puede ser una estructura sobre la que se instalan los materiales o una estructura de muro con forma fractal. Esto define a las formas caóticas en la arquitectura, el caso de interés al estudiar esta técnica, es la relación entre la geometría fractal y la arquitectura, que se dio a partir de la aparición del edificio del Guggenheim de Bilbao. Del cual el verdadero cambio de paradigma además de la utilización de formas fractales caóticas; es la utilización de un nuevo material – el titanio – nunca antes utilizado; también el aspecto de diseño arquitectónico, logrado con un software utilizado para diseñar aviones. Logrando una precisión más exacta en la construcción, aunque se sabe, que en las medidas,<sup>177</sup> siempre hay variaciones pues las medidas y proporciones reales se encuentran en el edificio físico. Con la práctica de la técnica, incluso se quieren

---

<sup>177</sup> Se citó anteriormente, respecto a las imágenes, que se reconoce en la obra de Palladio que “Los dibujos que aparecen en el tratado en algunas ocasiones no coinciden con las obras realizadas por el arquitecto, no sólo por lo que se refiere a medidas, sino incluso a amplios detalles de composición, articulación, y proporciones, tanto en la planta como en el alzado”. (Palladio, *The four Books of Architecture* 25).

distinguir aspectos geométricos en los análisis, que igualmente sirven para mejorar la técnica de dibujo.<sup>178</sup> Para esto se da una breve revisión de la técnica de la perspectiva lineal:

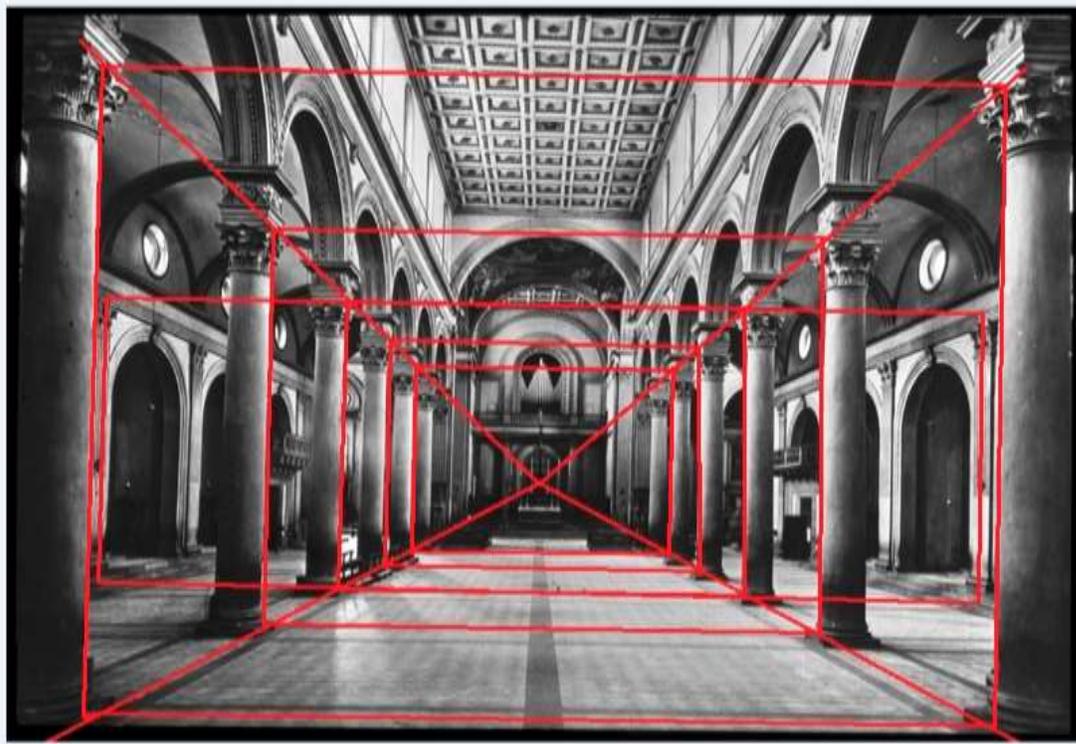


Fig. 60. Trazo de Perspectiva. Elaboración propia. Fuente: imagen<sup>179</sup>

Es necesario comprender que la perspectiva, con el uso y comprensión de la geometría fractal, también se facilita tanto en su análisis como en el dibujo y la asimilación y comprensión del espacio. Como se puede ver en la imagen anterior, la perspectiva también se construye, pero en este caso con varios marcos de referencia. Por ejemplo, uno es el rectángulo mayor utilizado de margen, a partir del cual se proyectan puntos hacia el infinito. Esto se logra dibujando líneas, que vayan desde cada uno de los cuatro vértices del rectángulo inicial, hacia un punto de fuga. Simulando un corrimiento hacia un espacio lejano, donde la vista solo percibe un punto, el cuál es el punto de fuga. Sobre de estas líneas, se van trazando rectángulos cada vez más pequeños, hasta el punto de fuga. Las líneas, siempre van a tocar los vértices de cada nuevo rectángulo menor y cada rectángulo se puede dividir en cuadrados

<sup>178</sup> “Al comienzo de los años cincuenta Palladio... Ha configurado una metodología y un sistema de trabajo absolutamente novedosos. Se ha convertido en el primer profesional estricto en la arquitectura con dos técnicas bien definidas y a la vez paralelas, pero no independientes: la proyectual y la constructiva.” (Ídem 12).

<sup>179</sup> Harvard Fine Arts. “Interior, view of nave looking towards the altar; San Lorenzo. Interior, Florence, Tuscany, Italy”. 2020. by Unknown. Harvard Fine Arts Library, Special Collection. 24 Oct. 2020 <<http://id.lib.harvard.edu/via/olvsite38552/urn-3:FHCL:579249/catalog>>

formando una retícula. Los rectángulos siguen la regla de auto similitud, y se desvanecen hacia el punto de fuga, formando la visión de profundidad, sombras y volúmenes.

La técnica fue desarrollada entre otros<sup>180</sup>, por el arquitecto renacentista italiano Filippo Brunelleschi, es construida con “geometría, el uso de planos, puntos, ángulos y formas para una perfecta arquitectura y pinturas balanceadas. Este mismo método se usa en las gráficas por computadora...”<sup>181</sup>. “Brunelleschi pintaba una réplica exacta del edificio que él quería hacer y luego taladraba un orificio en un pequeño espejo y lo bloqueaba con otro espejo. Esto reflejaba su versión pintada en el espejo original y se podía ver donde debía de estar ubicado el edificio.”<sup>182</sup> En la imagen, se muestra la utilización de líneas, en la construcción de la retícula o malla. Con la cual se construye la ilusión óptica de la perspectiva, en el plano horizontal y vertical, se forman rectángulos. Mientras que esto, contando el plano de profundidad, da la perspectiva de una malla formada con prismas rectangulares. La sensación en el espacio multidimensional, es que la suma de retículas que simulan un corrimiento hacia el punto de fuga, forman una pirámide de cuatro lados.

Eso que sucede con la perspectiva cónica<sup>183</sup> – y/o lineal – documentada con los grabados de Brunelleschi. Recordando lo que se vio, con la perspectiva interior de San Lorenzo, Brunelleschi lo hacía – como artesano de la plata –, en grabados de la perspectiva de un edificio: utilizando láminas de plata pulidas como espejo. Donde se demuestra que el aspecto

---

<sup>180</sup> “La perspectiva es el bosquejo de la fachada y de los lados alejándose y confluyendo en un punto central de todas las líneas.”(Vitruvio 33).

<sup>181</sup> “What is the math that is used? Geometry. Brunelleschi uses planes, points, angles and shapes to perfect architecture and balanced paintings. This same math is used in Computer graphics which helps build shapes by plotting points on a grid and connecting them.” (Kahn 5).

“¿Cuáles son las matemáticas que se usan? Geometría. Brunelleschi usa planos, puntos, ángulos y formas para perfeccionar la arquitectura y balancear pinturas. Estas mismas matemáticas se usan en las gráficas por computadora, lo que ayuda a construir formas a partir de marcar puntos en una retícula o malla y conectarlos.” (Trad. Propia).

<sup>182</sup> “Brunelleschi painted an exact replica of the building he wanted to make and the drilled a hole on a small mirror and blocked it with another mirror. This reflected his painted version on the original mirror and you could see where the building will be...” (Ídem 8).

“Brunelleschi pintaba una réplica exacta del edificio que quería, haciendo un agujero en un pequeño espejo y bloqueándolo con otro espejo. Esto reflejaba su versión pintada en el espejo original y entonces podías ver donde iba a quedar el edificio”. (Trad. Propia).

<sup>183</sup> “How did Brunelleschi use linear perspective? Brunelleschi painted an exact replica of the building he wanted to make and then drilled a hole on a small mirror and blocked with another mirror. This reflected his painted version on the original mirror and you could see where the building will be”. Khan, Sal. Linear Perspective: Brunelleschi’s Experiment”. (S. Kahn). Khan Academy. N.p., 1 Aug. 2012. Web. 5 abril 2020.

“¿Cómo usaba Brunelleschi la perspectiva lineal? Pintaba una réplica exacta del edificio que quería pintar, luego hacia un agujero en un espejo pequeño, lo bloqueaba con otro espejo. Esto reflejaba su versión pintada en el espejo original y entonces se podía ver donde iba a estar el futuro edificio”. (Trad. Propia)

multidimensional de la perspectiva, no se limita a crear una imagen de perfil, con detalles de profundidad y volumen, en la imagen de un edificio – dibujada o fotografiada –. Sino que es algo más, es el punto de vista del edificio con el entorno.

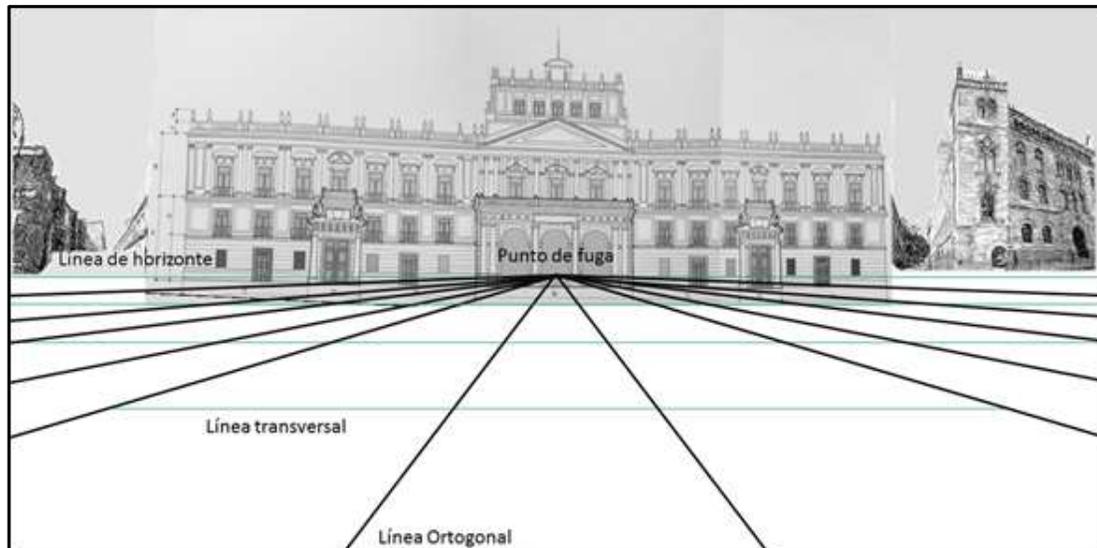


Fig. 61. La perspectiva lineal. Fuente<sup>184</sup>

A continuación con un ejemplo de la Villa Savoye, se explicaran los puntos de transformación que existen en la perspectiva. La cual es una herramienta, que desde la arquitectura clásica, se reconoció es esencial, Vitruvio habló sobre el dibujo, de que es una herramienta poderosa y sobre la perspectiva:<sup>185</sup> “tres son las clases de disposición – en griego, *ideae* –: la planta, el alzado y la perspectiva”. Pero se reconoce que una visión más clara, de lo que se está imaginando hacer con el espacio, solo se logró y se documentó con dibujos y con planos hasta la época del Renacimiento. Con estos recursos gráficos, empezó a tener sentido tanto la división de espacios como la fragmentación, para crear diferentes habitaciones y cambios de dimensión, tipos, temas, géneros – en griego *thematismo* –...<sup>186</sup> En realidad en la época de Vitruvio, no existía el concepto de género de edificio, a pesar de eso si se hace referencia a la naturaleza del lugar. Explicando que el ornamento tenía una

<sup>184</sup> Perspectiva lineal de elaboración propia. [Filipo Brunelleschi. Utilizó las matemáticas y redescubrió este recurso – perspectiva lineal – con geometría, líneas, puntos, ángulos y formas. Para perfeccionar la arquitectura y balancear las pinturas]. La imagen del edificio en el recurso: Wordpress. “espacio arquitectónico en México”. 2021. [Wordpress.com](https://espacioarquitectonicoenmexico.wordpress.com/palacio-de-mineria/). 19 Sep 2021 <<https://espacioarquitectonicoenmexico.wordpress.com/palacio-de-mineria/>>

<sup>185</sup> (Vitruvio 33).

<sup>186</sup> “El ornamento es un correcto aspecto de la obra o construcción que consta de elementos regulares, ensamblados con belleza. Se logra perfeccionarlo mediante la norma ritual – en griego *thematismo* –, con la práctica, o con la naturaleza del lugar”. (Vitruvio 34).

finalidad y se debía adecuar a darle personalidad al edificio, según para que deidad iba a ser construido – esto en el caso de los templos –. Por ejemplo también existe una arquitectura diseñada para defender e incluso para matar, la arquitectura militar<sup>187</sup> menciona Collins, muy particular del imperio romano.



Fig. 62. “Análisis de perspectivas”. Elaboración propia. Imágenes Google Maps.

En la imagen de frente, no se percibe más que la perspectiva que le da el entorno a la villa. Luego se muestran tres diferentes tipos de perspectiva; en la perspectiva de la esquina superior izquierda, imagen de frente vista desde lo alto, las líneas horizontales no se transforman y las verticales sufren una transformación en grados de inclinación; la perspectiva dos de la parte superior derecha, se tomó la imagen viendo dos caras del edificio desde lo alto, aquí sufren una transformación tanto las líneas horizontales como las verticales;

<sup>187</sup> “Stone-build military installations were erected across the Roman Empire”. (Collins 2). “Instalaciones militares construidas en piedra, fueron levantadas a través del imperio romano”. (Trad. Propia).

y finalmente la perspectiva desde el piso, esquina inferior derecha, viendo dos caras del edificio. Ahí sufren transformación las líneas horizontales. A manera de conclusión se muestra que la perspectiva tiene muchos perfiles, en el caso de una arquitectura fractal como la del museo, hay múltiples perspectivas debido a que la forma del edificio es multidimensional. Y en una sola toma fotográfica en el perfil del edificio se dibujan, múltiples cambios de perspectiva. Lo mismo que sucede con los ornamentos clásicos de la arquitectura, son multidimensionales imitando las formas de la naturaleza.

Con la aplicación de los *paneles de Fibonacci*, se configuran proporciones en la imagen preparándola para el dibujo, señalando la geometría arquitectónica básica de los elementos arquitectónicos de interés. Considerando que el dibujo es un recurso importante en la arquitectura, siempre utilizado de guía<sup>188</sup> para construir figuras geométricas, con formas y significado arquitectónico. Esto se ejemplifica fácilmente en los rascacielos, donde se proyecta con una estructura de acero, el lote o terreno de construcción (que en esa época en la ciudad de New York, se siguió un modelo de retícula con el plan hipodámico; y estos lotes eran rectangulares). Así construyendo nuevas dimensiones pisos arriba, se seguía la forma inicial del lote, con losas en forma de planos horizontales. Rem Koolhaas,<sup>189</sup> describe de alguna forma este proceso al decir: “a slender steel structure supports 84 horizontal planes...” “una estructura delgada de acero que soporta 84 planos horizontales”. Esta construcción, se entiende geoméricamente, independientemente de algún método constructivo. Pues al hablar de planos horizontales, se sabe es posible aproximar sus formas geométricas arquitectónicas, tanto en el dibujo como en el diseño. Por lo tanto se concluye que aunque siempre hay

---

<sup>188</sup> “Our eyes are constructed to enable us to see forms in light. Primary forms are beautiful... A mass is enveloped in its surface... The great problems of modern construction must have a geometrical solution”. (Le, Towards a New Architecture 2).

“Nuestros ojos están contruidos para ser capaces de ver formas en la luz. Las formas primarias son hermosas... Una masa se cubre por su superficie... Los grandes problemas de la construcción moderna deben tener una solución geométrica”. (Trad. Propia).

<sup>189</sup> “THEOREM. By 1909 the promised rebirth of the world, as announcement by the Globe Tower, reaches Manhattan in the form of a cartoon that is actually a theorem that describes the ideal performance of Skyscraper: a slender steel structure supports 84 horizontal planes, all the size of the original plot...” (Koolhaas 82-85).

“Teorema. Por 1909 la promesa del renacimiento del mundo, como un anuncio por la “Globe Tower” realizado en Manhattan con la forma de una caricatura que es en realidad un teorema que describe la forma ideal de la realización de un rascacielos: una estructura delgada de acero que soporta 84 planos horizontales, todos del mismo tamaño que el lote original...” (Trad. Propia).

diferencias entre la imagen y la obra: los análisis de la obra de arquitectura, realizados sobre fotografías, dibujos o imágenes son independientes, de los hechos en físico.<sup>190</sup>

**4.2 Técnica 3. Espacios: Análisis de Dimensión Fractal.** El cambio principal de paradigma, que permite comprender la utilización del espacio multidimensional para diseñar y construir arquitectura, se logró con mayor detalle en la arquitectura moderna. Con lo que fue la utilización del acero, el concreto armado y el vidrio a gran escala. A la par de esto, también se vio que el concepto de tecnología, también se permeó en técnicas como la utilización de las retículas. Ya se vio, el modo en el que el cálculo de la dimensión fractal, se realiza con retículas iteradas. Ahora con la utilización de las retículas iteradas, se integra un diagrama arquitectónico fractal, demostrando un trabajo multidimensional: como el realizado en la toma de medidas.<sup>191</sup> Los paneles que también son cubos, en un modelo tridimensional, se basan en las medidas, confiriendo un alto grado de importancia a este elemento; pues es un elemento heredado de la arquitectura clásica; utilizado en la arquitectura moderna;<sup>192</sup> y en la contemporánea. Además también en las instituciones de la enseñanza de arquitectura, por ejemplo en la Bauhaus:<sup>193</sup> que desde sus inicios plantearon las bases para un futuro diferente, donde en la arquitectura “todo debía tener la altura exacta, el tamaño preciso para que fuera utilizable por el ser humano”.

Los *paneles de Fibonacci*, cuadrados que siguen en sus dimensiones la serie de Fibonacci, también se distinguen con colores, para distinguirlos como sobresalientes por su forma básica, el color y la dimensión. Algunos de estos elementos eran considerados importantes en la escuela de la Bauhaus,<sup>194</sup> aunque los paneles además: también representan

---

<sup>190</sup> En el entendido de que las imágenes – dibujos, diseños, fotografías – de una obra de arquitectura, cada una son una muestra única. La cual es parte de una población, que se aproxima a la forma real física, considerando que las dimensiones reales solo se pueden conocer tomándolas en físico.

<sup>191</sup> “... y me dediqué a la investigación de las reliquias de los viejos edificios..., comencé a medir prolijamente y con mucha diligencia cada parte suya...” (Palladio, Los Cuatro Libros de Arquitectura 47).

<sup>192</sup> “Wright utilizaba la retícula de un modo similar al de Le Corbusier y Mies, ya que le servía como trazado de sus plantas, destacando el espacio interior de forma que fuera amplio, similar a la planta libre... Un ejemplo de esta experimentación wrightiana, comenzando por la utilización del ángulo recto, se trata de la Casa Johnson, donde la planta está diseñada por una superposición de cuadrículas, contando con una trama de cuadrados base sobre la que superpone la misma trama de ángulo recto girada 30° y 60° respecto a la original” (Ortín 39-41).

<sup>193</sup> “Proceso intuitivo de creación, y contraste de materiales, formas y colores, esa era la esencia de la Bauhaus. En 1919 el arquitecto Walter Gropius funda la escuela de artes y oficios” (Min 4:19-4:30) “todo debía tener la altura exacta, el tamaño preciso para que fuera utilizable por el ser humano” (Min 0:50-0:59). DW Documental. “100 años de Bauhaus: El código”. 2019. [Youtube.dwdocumental](https://youtu.be/3TFmr6y8lcM). 2 Oct 2021 <<https://youtu.be/3TFmr6y8lcM>>

<sup>194</sup> “El denominado curso preparatorio..., en el adquirirían las bases... En vez de copiar modelos insta a sus alumnos a experimentar con formas colores y materiales... su principio didáctico es la creación intuitiva Las formas y colores típicos de la Bauhaus... Los colores básicos rojo, amarillo y azul y las formas elementales

retículas iteradas; con ellos se puede demostrar la regla de *auto similitud*; y son un medio para demostrar cuando un rectángulo es áureo – al analizar la arquitectura –. Es así que se realiza la primera prueba de la técnica tres ‘el cálculo de la dimensión fractal’, pero para construir un diagrama, antes hay que definir con palabras: que se entiende por sucesión para crear una curva o espiral de Fibonacci. Para dibujar una espiral de Fibonacci hay diferentes métodos, puede ser con triángulos o con cuadrados de dimensiones que siguen la serie. Sin embargo se va utilizar un método puramente geométrico:

- 1.- Se considera importante revisar la realización del trazo de la espiral con un cuadrado al cual se nombra (A, B, C, D) empezando por la esquina superior izquierda como vértice (A).
- 2.- Luego se dibuja la mediatriz (en la base del cuadrado C, D) con dos arcos de un diámetro cualquiera que se crucen entre sí en el segmento (C, D).
- 3.- Posteriormente la línea que une los puntos en donde los arcos se cruzan, interseca el segmento (C, D) en su punto medio, sea este el punto (E).
- 4.- Ahora hay que unir el punto (E) con el vértice (B); el segmento resultante servirá de radio para trazar una curva – perteneciente al mayor de los círculos negros en la gráfica – que vaya del vértice (B) hasta la altura del segmento (C, D).
- 5.- Una vez dibujado este arco se nombra el extremo del arco como el punto (F).
- 6.- Se une el segmento (C, D) con el punto (F) con una recta horizontal.
- 7.- Luego con la dimensión de este segmento (D, F) se dibuja una extensión del segmento (A, B) paralela a (D, F) y de la misma dimensión, así al nombrar el final de este segmento como (G) tenemos el segmento (B, G),
- 8.- Uniendo (G, F) se forma un rectángulo – áureo – con la curva que va del vértice (B) al vértice (F), dentro del rectángulo áureo. Note que ya se tienen dos rectángulos de proporciones idénticas “por eso se le llaman áureos”, el rectángulo (A, G, C, F, rectángulo mayor) y el rectángulo (B, G, D, F).
- 9.- Ahora utilizando de radio el segmento (D, F) se traza una curva que va del vértice (D) hasta intersecar a la línea (F, G). A esta intersección se le nombra (H), así al trazar

---

cuadrado, triángulo y círculo siguen siendo hoy el código identificador de la Bauhaus”. (Ídem). La cita anterior se dio en el contexto de la escuela de la Bauhaus, de los tiempos de la guerra y la postguerra. Sin embargo se utilizó como referencia, de la utilización de colores y formas básicas, en la época de la arquitectura Moderna.

una línea perpendicular a (F, G) desde el punto (H) intersectamos el segmento (B, D) y nombramos este punto como el punto (I).

10.- Ya se tiene un cuadrado (I, H, D, F) dentro del rectángulo áureo (B, D, F, G) y arriba del cuadrado un nuevo rectángulo áureo (B, G, I, H) de dimensión menor.

Si procedemos a dibujar un cuadrado dentro de cada rectángulo nuevo, esto es una sucesión de formas geométricas de proporciones semejantes, pero de diferentes dimensiones. Esta sucesión se puede continuar de forma indefinida hasta el infinito, pero esto para el ser humano, es imposible sin las computadoras. Al dibujar la espiral, se reproduce una forma geométrica, que tiene un límite visual. Pues la curva logarítmica, se extiende hacia números muy grandes y a números muy pequeños, no visibles para el ojo humano.

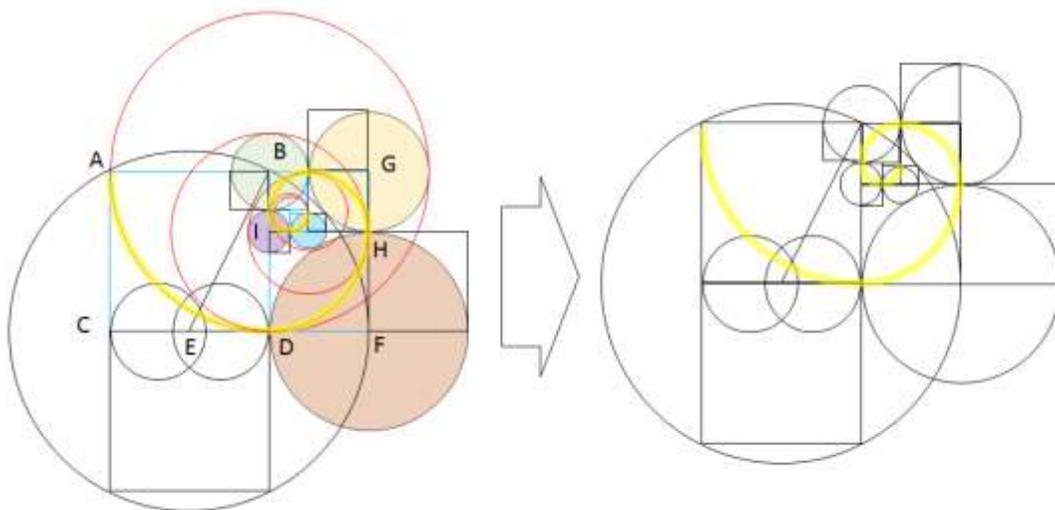


Fig. 63. Trazo geométrico de la espiral de Fibonacci. Elaboración propia

La parte visible de la espiral, se ha encontrado dentro de muchas formas de la naturaleza, las ramas; las hojas (desde las hojas más desarrolladas hasta las que están naciendo)...

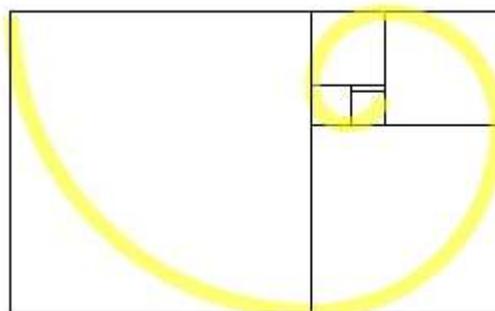


Fig. 64. La espiral de Fibonacci. Fuente<sup>195</sup>

<sup>195</sup> Elaboración propia. Trazo geométrico de la Espiral de Fibonacci.

**Retículas de Dimensión Fractal.** Ya se estudió en qué consisten el cálculo de la dimensión fractal, en donde se utilizan las retículas de dimensión fractal, distinguidas por reproducirse por medio de un proceso iterativo. También se utilizaron diferentes herramientas geométricas, para hacer un análisis de dimensión fractal, por medio de la exhaución geométrica. Los cuadrados que siguen en sus medidas, los números de la serie de Fibonacci, se utilizan para aproximar la forma. Sin embargo en esta práctica, en lugar de analizar la imagen de un edificio construido, se utilizará el proceso del cálculo de la dimensión fractal: para ir integrando elementos y construir un diagrama. Con esto se quiere hacer notar, la manera en la que se le otorga al diagrama arquitectónico, una cualidad multidimensional asociada al uso de la geometría fractal.

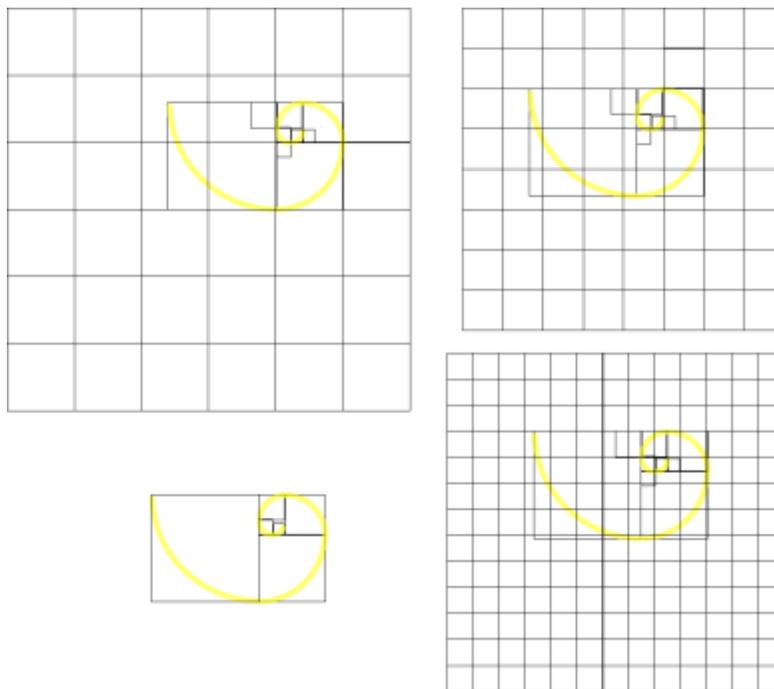


Fig. 65. “Progresión de iteraciones de retículas de diferentes dimensiones”. Fuente<sup>196</sup>:

**Diagrama espacios exteriores.** Se utilizan las retículas y sus iteraciones, para que a partir de la primera retícula, se empiecen a integrar elementos arquitectónicos según la dimensión de la retícula. En la figura del diagrama de inicio se cuenta con la representación arquitectónica de muros, una puerta, una ventana y un tragaluz. El diagrama se construyó, utilizando la técnica fractal uno, integrando en el conjunto tres cambios de dimensión. En la

<sup>196</sup> Elaboración propia. Las redes y sus iteraciones de tamaño o dimensión siguiendo la serie de Fibonacci no son coincidentes entre iteraciones.

figura siguiente hay un rectángulo grande – coordenadas (2, 2) y (2, 3) – y tres elementos que sobresalen de su perímetro, se acomodan según los paneles por dimensión:

*Dimensión 1 → Coordenadas (1,2)*

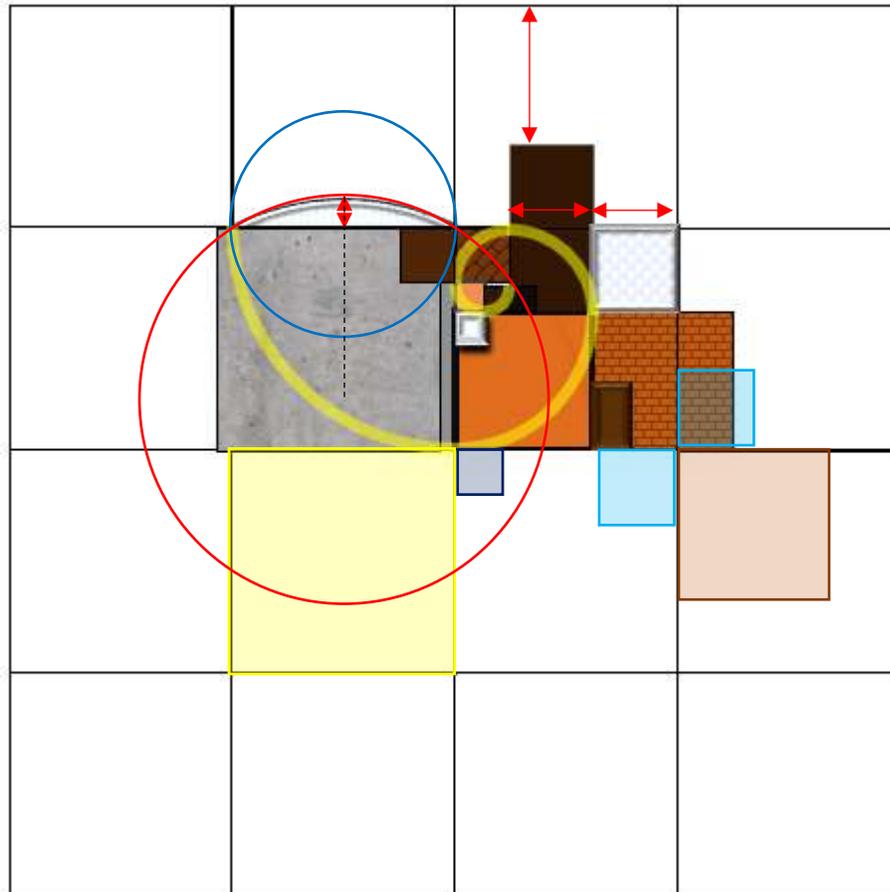


Fig. 66. “Construcción de diagrama arquitectónico con retículas de dimensión fractal”. Fuente<sup>197</sup>

La importancia de esta construcción, reside en que se está mostrando la retícula completa, que se construye con un *panel 5 amarillo* de tres por tres centímetros. Las coordenadas se simplifican, con los *paneles de Fibonacci*, porque se ubican por celda. Regresando al caso de las coordenadas de la figura anterior, la primera fila y la segunda columna, corresponde a la cúpula, su trazo se puede aproximar con la altura. Esta corresponde a la altura de la cúpula respecto al elemento arquitectónico, es el punto elevado marcado con la flecha  $FA_1 = 0.45$  (las flechas, al igual que los paneles, se acomodan y numeran del menor al mayor tamaño),

<sup>197</sup> Elaboración propia. Según la figura la intersección de cuartos de círculo en progresión continua, y dispuestos según un orden forman la espiral de Fibonacci

la cual está ubicada en el punto medio sobre el lado horizontal del panel. Y del punto medio a uno de los lados, en este caso la longitud es la mitad del valor de un panel  $PA_5 = 3cm$ .

$$\begin{aligned} \text{Cúpula} &= A^2 + B^2/A + A = (0.45)^2 + 1.5^2/(0.45 + 0.45) = 0.2025 + 2.25/0.90 \\ &= 2.72cm \end{aligned}$$

Entonces se tiene que un círculo con un radio de  $2.72cm$ ., es una aproximación para poder tener una cúpula de esta curvatura y dimensiones. La curvatura comparada con la curvatura de un círculo circunscrito al elemento, se marca con un círculo de circunferencia azul, cuyo radio es la longitud del punto medio del panel a una de las esquinas. Mientras que el círculo de rojo corresponde al calculado en la ecuación correspondiente a la cúpula. El diagrama inicial integra diferentes dimensiones, la cúpula se considera el primer cambio dimensional respecto al rectángulo que se forma en las coordenadas (2, 2), (2, 3).

#### *Dimensión 2 → Coordenadas (1,3)*

Si se trata de áreas o volúmenes se hace de forma análoga, áreas con áreas y volúmenes con volúmenes. En la dimensión dos, se señala un elemento de distinto tamaño al rectángulo, con coordenadas (2, 2), (2, 3). Pero como no es independiente, sino que es parte del cuerpo, entonces corresponde a un elemento arquitectónico con cambio dimensional.<sup>198</sup>

$$\text{Proporción 1} \rightarrow \text{Diferencia } \{[PA_5 = 3cm] - [FA_2 = 1.1]\} / [FA_2 = 1.1] = 1.72$$

La proporción es una comparación; de como es el segmento resultante; de la diferencia entre la recta horizontal del *panel 5 amarillo*; menos el segmento de recta de la flecha dos, respecto a la longitud de la misma flecha.

#### *Dimensión 3 → Coordenadas (2,4)*

Como se puede ver, a manera de conclusión sobre la construcción del diagrama, se tienen tres cambios de dimensión que sobresalen del rectángulo principal: con coordenadas (2, 2), (2, 3). La retícula total tiene un perímetro cuadrado y está construida con el *panel 5 amarillo* de  $3 \times 3cm$ ., la cúpula (1, 2) se relaciona con este panel. Esta se toma como uno de los cambios de dimensión, después un cuadrado (1, 3) representado con un *panel 1 azul* de  $1 \times$

---

<sup>198</sup> Este mismo hecho, sucede en el caso mencionado por Mandelbrot, del edificio de la Ópera de Paris. El cual cuando se analizó su forma perimetral, efectivamente tenía tres cambios de forma y dimensiones en su perímetro, correspondiente al piso o planta del edificio.

1 cm. Y finalmente un rectángulo relacionado en dimensiones con el *panel 3 naranja* de  $2 \times 2$  cm., pero este rectángulo no sigue la regla de auto similitud respecto al rectángulo del cuerpo principal (2, 2), (2, 3). Esto se demuestra porque no tiene el ancho de un *panel 1 azul*, ya que un rectángulo menor respecto al cuerpo principal, para que fuera a escala o siguiera la regla de auto similitud: por lo menos se tendría que aproximarse a la suma de dos cuadrados o en este caso dos *panel 1 azul*. Por último, los cambios de dimensión menores, se engloban representándolos con un *panel auxiliar azul marino*.

**Paneles que Siguen en su Dimensión la Serie de Fibonacci.** Entonces cada nueva retícula y sus iteraciones, siguen en sus dimensiones a los *paneles de Fibonacci*. Logrando una composición siguiendo proporciones, estandarizadas según el número  $\Phi = \varphi$ , la retícula como matriz numérica: tiene un cero o un uno, según si la celda está ocupada o no.

$$\text{Retícula con paneles } PA_5 = \begin{matrix} & & & & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & & & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Según menciona Carl Bovil:<sup>199</sup> “las dimensiones fractales – en arquitectura – pueden ser utilizadas para generar ritmos complejos para ser utilizados en diseño”.

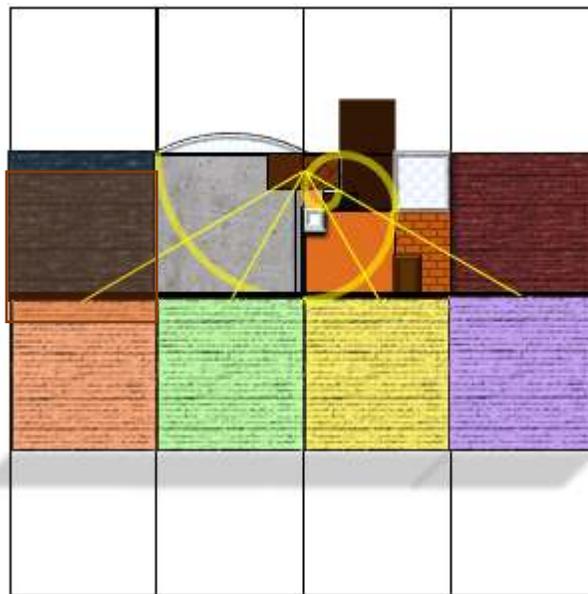


Fig. 67. Retícula de paneles  $PA_5$ . Fuente: elaboración propia.

Entonces se tiene como resultado la construcción de un diagrama arquitectónico canónico, con elementos de diferentes dimensiones, ajustados a una media dimensional. La cual se

<sup>199</sup> (Bovil, Fractal Geometry in Architecture and Design 3-8)

controla con la utilización de los *paneles de Fibonacci*, ajustándolos a los recursos y condiciones físicas dadas. Ya sea un lienzo para un dibujo, un plano para un diseño arquitectónico o un terreno en el espacio físico, donde se utilizan los métodos constructivos. Aun así al final los ajustes son de carácter exhaustivo.

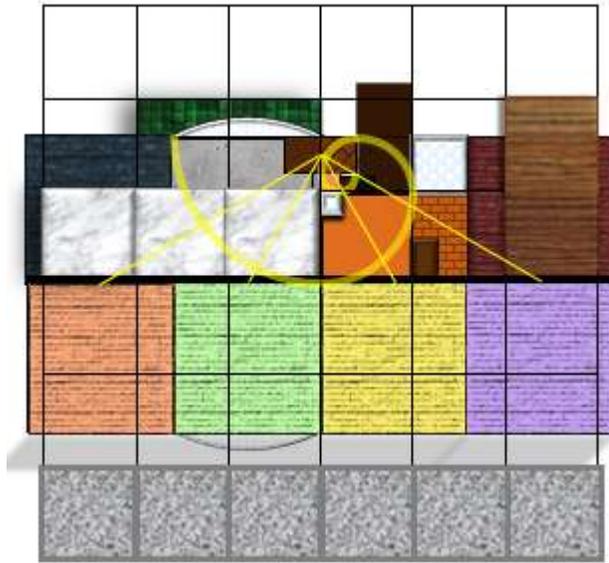


Fig. 68. “La retícula de paneles  $PA_3$  y sus elementos arquitectónicos”. Fuente: elaboración propia

En esta figura, se empiezan a integrar elementos, que corresponde a un panel de dos por dos centímetros  $PA_3 = 2cm$ .

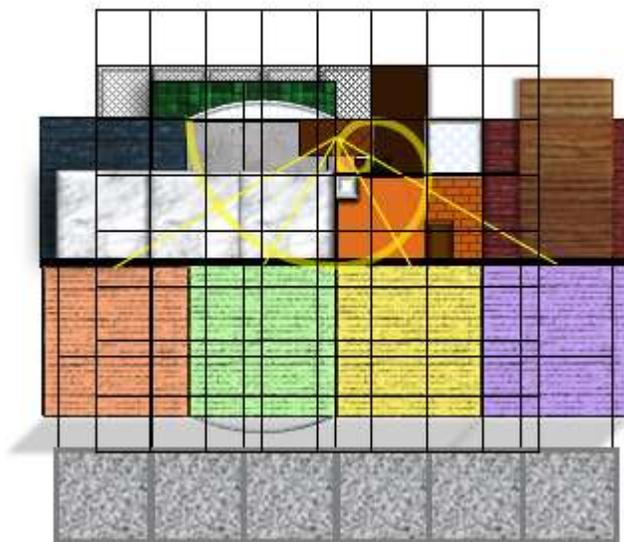


Fig. 69. “La retícula de paneles  $PA_1$  y sus elementos arquitectónicos”. Elaboración propia

En cada una de las retículas de cada nueva iteración se tienen paneles de menor dimensión, que le siguen de tamaño en menor escala a los paneles mayores. Hay que observar como la forma se fracciona con cada nueva iteración, las retículas permiten percibir diferentes elementos, por ejemplo la simetría. Visualmente en esta gráfica, se puede notar como las retículas no se corresponden; ni en sus perímetros; ni en la ubicación; ni en la multiplicación de celdas.

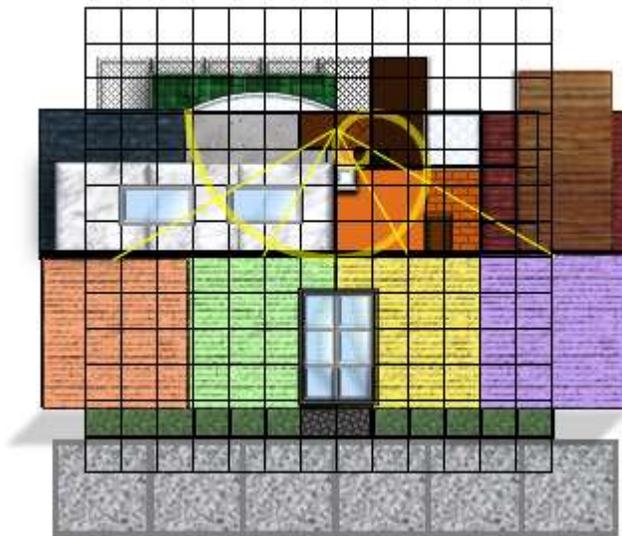


Fig. 70. La retícula de paneles menores a  $PA_1$ . Fuente: elaboración propia

Estos límites mínimos y máximos, representan las dimensiones mínimas y máximas – a escala – que se pueden ver en los elementos arquitectónicos, cada panel está vinculado con una dimensión a escala. Note que un *panel 1 azul* =  $1 \times 1cm$ , en una escala  $1:100$  representa un área de un metro. Se hizo con un proceso iterativo, para que al final todo el conjunto de elementos, diera forma al diagrama. Representando una base ‘canónica’, desde la cual, se desean expresar los espacios exteriores. Y además a partir de esto, existe la opción de poder manejar cambios de dimensión y transformaciones, en los dibujos y en los planos.

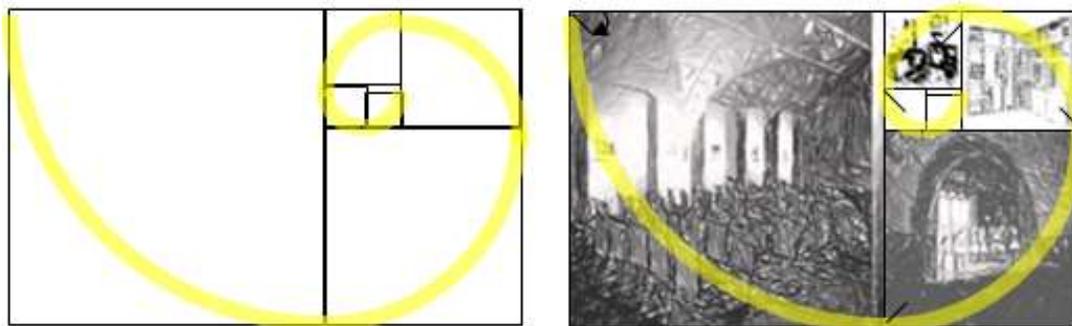


Fig. 71. Los cuadrados de la espiral, para configurar espacios. Fuente: elaboración propia.

**Diagrama espacios interiores.** Para el plano de piso, se utilizará inicialmente un rectángulo, se hace un diagrama de muros entradas y ventanas y se irá fragmentando.

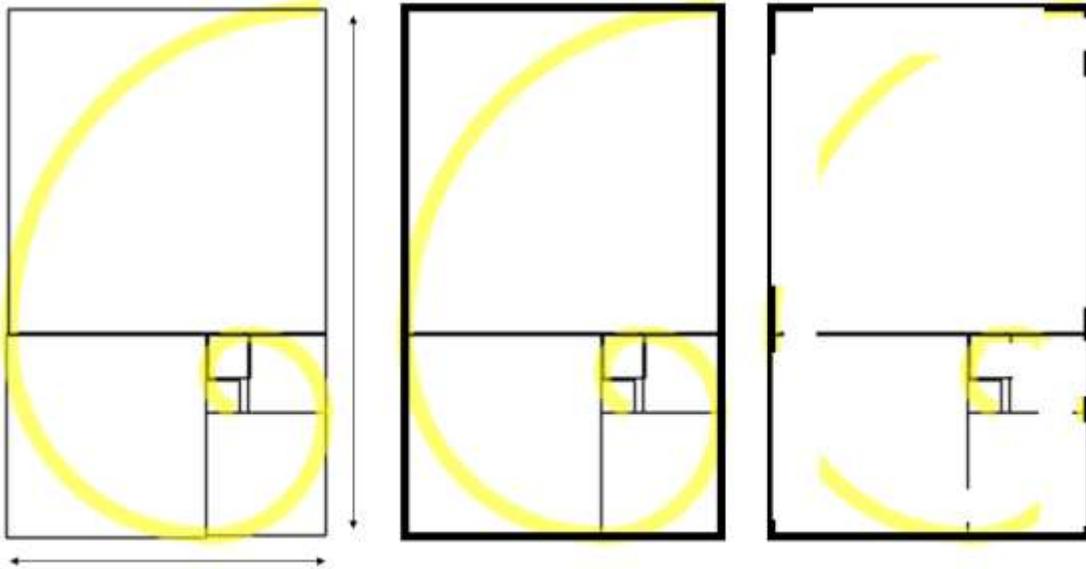


Fig. 72. Los espacios interiores graficados siguiendo la secuencia de cuadrados que sirven para trazar la espiral de Fibonacci. Elaboración propia.

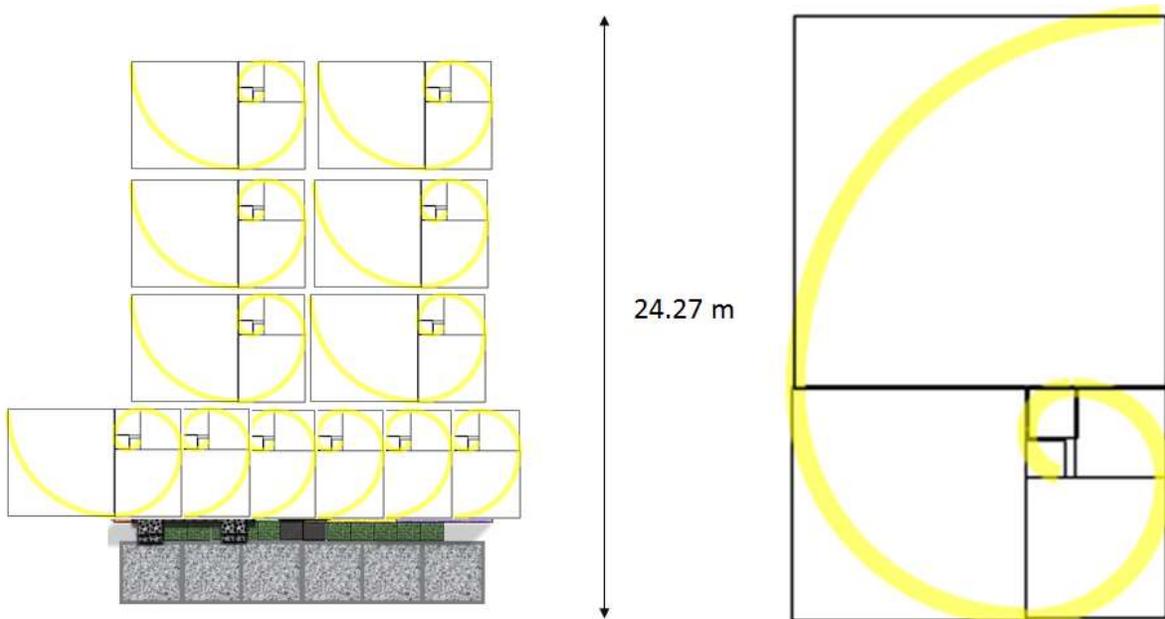


Fig. 73. Dimensionamiento con cuadrados. Fuente: elaboración propia

La práctica consiste en utilizar solo los *paneles Fibonacci* para dividir el espacio y la manera en la que se hace, es simulando el cálculo de la dimensión fractal.

### Proporción áurea y utilización de paneles

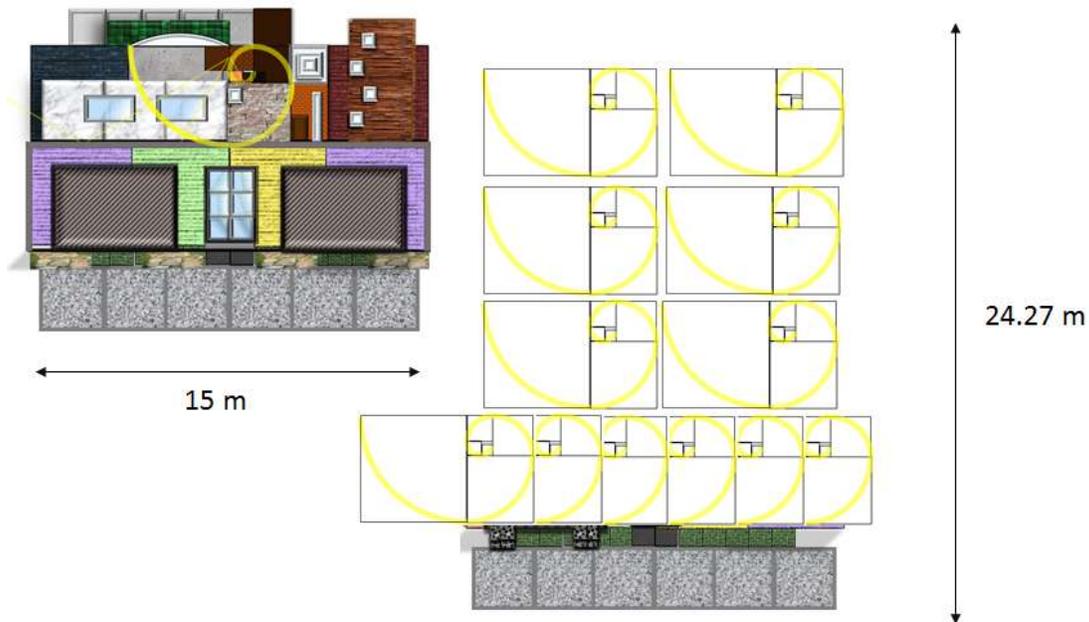


Fig. 74. Cuadrados  $\Phi = \varphi$ . Fuente: elaboración propia

Para esto una forma geométrica arquitectónica canónica tiene infinitas posibilidades, pues debido al proceso iterativo, cada diseñador arquitectónico puede incluso hacer pruebas físicas. Pues el uso de proporciones, permite hacer comparaciones dimensionales, para ofrecer una solución única de la disposición y otros elementos. Una transformación evidente es la de la puerta, un rectángulo áureo mediría de ancho un panel  $PA_1 = 1\text{cm}$  y de largo un panel  $PA_3 = 2\text{cm}$ . Mientras que las dimensiones promedio de muchas puertas de casas, oscilan entre los ochenta centímetros de ancho y hasta los dos metros de largo. Con los *paneles de Fibonacci*, no se afecta el diseño, porque cada panel es independiente dimensionalmente. En el caso de la práctica, se busca que el perímetro de la casa, finalmente esté construido por tres o más dimensiones diferentes. La relación de las proporciones es:

$$\text{Proporción sección 1} \rightarrow [15\text{cm}^2] = 225\text{cm} / [PA_6 = 4.11\text{cm}^2] = 16.89\text{cm} = 13.31$$

Es decir un panel de cuatro por cuatro centímetros, cabe unas trece veces dentro de un panel de quince por quince. En el documento el *panel 6 rojo* es una sección del diagrama, luego el conjunto de izquierda a derecha; *panel 1 azul*, *panel 3 naranja* y *panel 2 rosa o morado*. El último cambio de dimensión es el de la entrada, formada por una intersección del *panel 4 verde* y *panel 5 amarillo*. *Proporción sección 2*  $\rightarrow$  diferencia  $\{15\text{cm} - 24.24\text{cm} \approx 9\text{cm}\} \times 15 = 135\text{cm} / [PA_6 = 4.11\text{cm}^2] = 7.99$

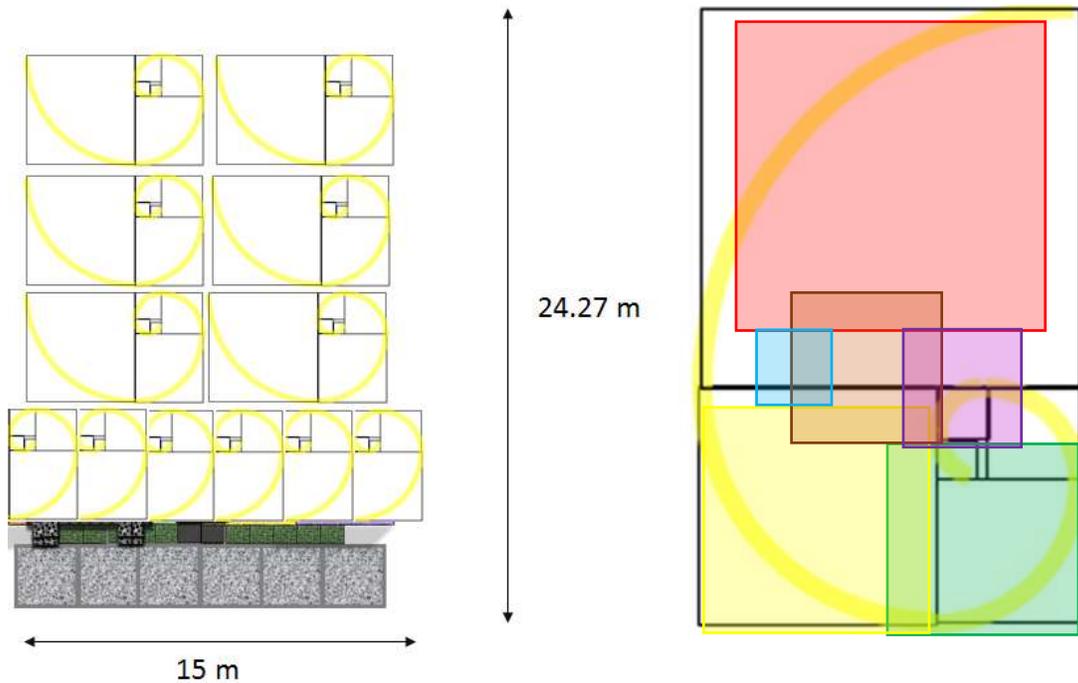


Fig. 75. División de un diagrama con *paneles de Fibonacci*. Fuente: elaboración propia.

Entonces en la sección dos, un *panel 6 rojo*, cabría unas ocho veces aproximadamente. Una vez sabiendo esto, se divide el diagrama, la división se hace sobre el diseño con los *paneles de Fibonacci*.

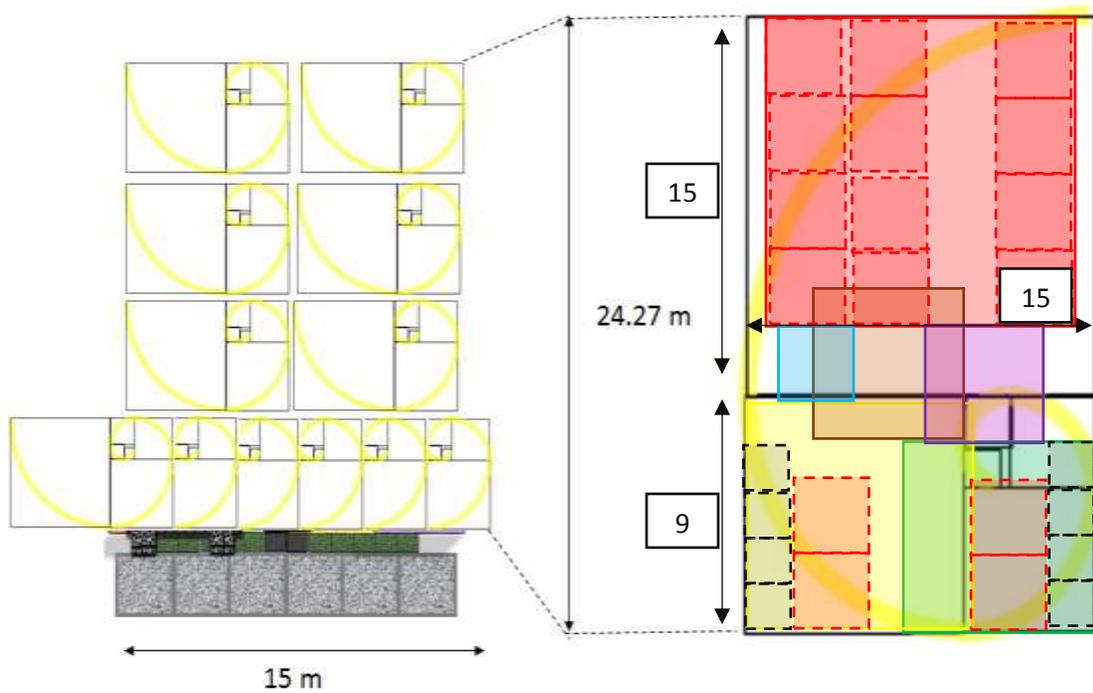


Fig. 76. División de espacios en el diagrama. Fuente: elaboración propia.

Un tratamiento más exacto de las áreas fragmentadas, se puede hacer con el método simplex de la programación lineal, con una herramienta que se denomina programación entera.<sup>200</sup>

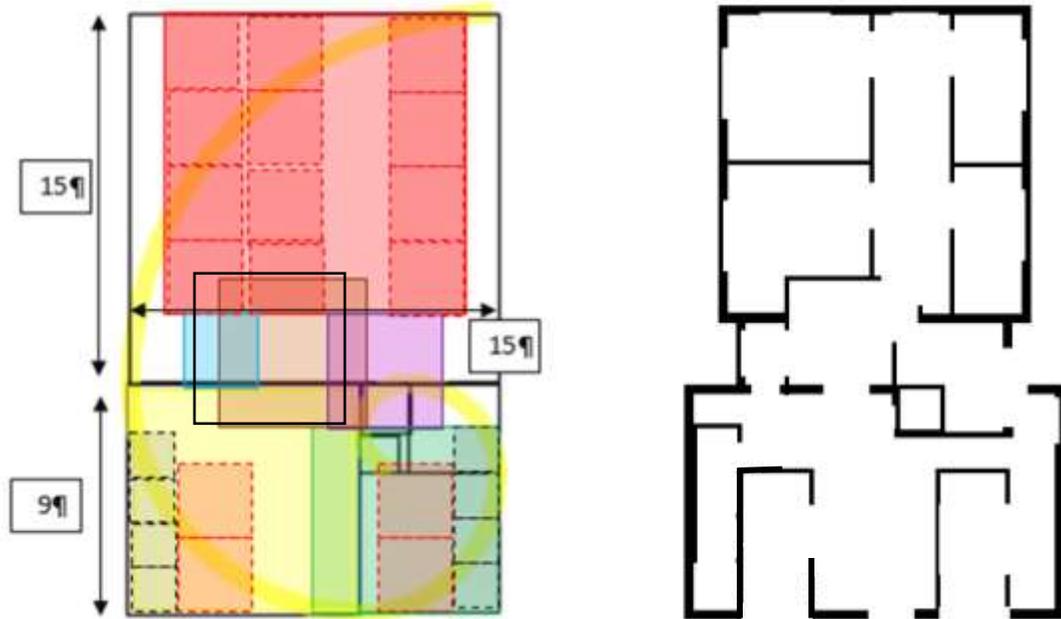


Fig. 77. 'Fracción de espacios y gráfica'. Elaboración propia

**4.3 Técnica 4. Uso de Materiales: Formas Caóticas.** Primero que nada, se recuerda el hecho del cambio que sufrió la arquitectura, con la utilización de formas fractales ya que la relación entre la arquitectura y las formas fractales caóticas o complejas, se tomó a partir de la construcción de Guggenheim de Bilbao. Como la práctica de esta teoría cuatro, se trata de estudiar las formas arquitectónicas caóticas o complejas. Se considera, seguido del acto de la aparición del Guggenheim de Bilbao, la construcción de otros edificios con estas formas: la ópera de Sídney; la casa de música de Oporto;<sup>201</sup> y otros que se caracterizan por la utilización de elementos arquitectónicos, solamente posibles de construir, gracias a las computadoras y sus métodos avanzados en la aproximación de medidas para ensamblar estructuras. Dentro de estos métodos geométricos avanzados, está la geometría fractal y es

<sup>200</sup> "Since its introduction as a tool of applied mathematics the outstanding computational problem of linear programming has been that of finding the optimal solution to a linear program in which all or some variables are restricted to integer values... and solving the resultant problems by the simplex algorithm". (Gass 249-303).

"Desde su introducción como herramienta de las matemáticas aplicadas, el problema computacional notable de la programación lineal, ha sido encontrar la solución óptima a un programa lineal en el que todas o algunas variables están restringidas a valores enteros... y los problemas resultantes se resuelven mediante el algoritmo simplex". (Trad. Propia).

<sup>201</sup> Fundación Juan March. "Rem Koolhaas: Luis Fernandez Galiano". 2016. [Youtube.com](https://youtu.be/dsGmG-L5I2E). 12 Mar 2021. <<https://youtu.be/dsGmG-L5I2E>> "Sin embargo llega el Guggenheim, año 1997 y esto cambio la arquitectura y cambia también el trabajo de Koolhaas... Y decide que... va a tomar... al caza F-117 stealth... y su primera obra... la casa de música de Oporto... evidentemente es un icono". Min. (50:00-54:50)

la herramienta con que se diseña y se construye arquitectura fractal. Los precedentes de estas formas, se ven desde la geometría óptima de los arcos en forma de parábola, que construía Gaudí; hasta las estructuras inspiradas en el paraboloides hiperbólico, esta última estructura, que es una estructura de doble curvatura, muy utilizada. La parte compleja, es replicar una doble curvatura en obra, sobre todo seguir un diseño de curvatura específico.

Todas estas formas difíciles de construir, deben ser estudiadas a detalle, ya que fácilmente pueden originar errores delicados en la construcción. Y aquí influyen mucho los métodos constructivos y los materiales, este hecho se refuerza con lo que dice el diseñador Thomas Heatherwick: “para mí y mi equipo, no podemos contemplar el estar distanciados de los materiales, ya que estos te dan ideas...”<sup>202</sup>



Fig. 78. Línea de tiempo “utilización de curvas complejas”. Fuente: Elaboración propia. Imágenes<sup>203</sup>

También es importante mencionar, porque las curvas son de interés fractal. Sucede que, una malla o retícula curva, es la que mejor se ajusta a estas formas. El interés fractal se dirige a que las formas curvas usadas, son de difícil construcción y la suma de curvas para construir el elemento arquitectónico, es un proceso complejo. Entonces sus formas, se aproximan por una serie de métodos exhaustivos, que lleven a la reproducción de la forma caótica o compleja deseada. Dentro de la rama de formas caóticas o complejas hay:

1.- Arquitectura con detalles fractales sin aparente orden ni sentido arquitectónico – debido a su euritmia escultural –. En el caso de la Basílica de la Sagrada Familia en Barcelona, se podría pensar que la arquitectura es un cuerpo escultural.

<sup>202</sup> Heatherwick, Thomas. “Entrevista a Thomas Heatherwick, México: Para el 13° congreso Arquine”. 2012. [YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=zpQRIVRwSBI). 10 Ago. 2021 <<https://www.youtube.com/watch?v=zpQRIVRwSBI>>

<sup>203</sup> Imágenes: 1. Arkiplus. “La Sagrada Familia”. 2022. Arkiplus. com. 12 Jun. 2022 <<https://www.arkiplus.com/la-sagrada-familia/>>. 2. Archdaily. “En perspectiva: Felix Candela | Escrito: Begoña Uribe”. 27 Ene. 2017. Archdaily.mx. 12 Jun 2022 <<https://www.archdaily.mx/mx/626588/feliz-cumpleanos-felix-candela>>. 3. Archdaily. “Clásicos de Arquitectura: Museo Guggenheim Bilbao / Frank Gehry | Escrito por Brian Pagnotta. Traducción: Natalia Yunis”. 25 Mar. 2015. Archdaily.mx. 05 Jun. 2022 <<https://www.archdaily.mx/mx/764294/clasicos-de-arquitectura-museo-guggenheim-bilbao-frank-gehry>>

2.- Las estructuras de doble curvatura. Muy utilizadas por Felix Candela<sup>204</sup> (estructuras laminares de concreto armado, mejor conocidas como cascarones). En la imagen se pone el restaurante Xochimilco<sup>205</sup> del año de 1958, la razón por la que la doble curvatura es un caso de estudio, es por su complejidad constructiva.

3.- Y finalmente las curvas caóticas del Guggenheim de Bilbao a finales del siglo XX. Todas estas obras, incluyen formas que por su complejidad geométrica, muestran una característica asociada al desarrollo de la arquitectura de formas caóticas.

Para reforzar este hecho del cambio de la forma y comprender mejor la teoría de las formas fractales caóticas o complejas. Se analiza algo de la teoría involucrada en la construcción, de un gran edificio industrial, de arquitectura moderna. *La Fábrica de Turbinas AEG*. Ubicada en Berlín Alemania, construida en 1910, el arquitecto Peter Behrens asignado director artístico de todo el proyecto, para diseñar todo lo relacionado con la fábrica de turbinas AEG: “El arquitecto Peter Behrens en 1907 fue nombrado director artístico, responsable de crear un sistema entero de imagen, o paquete de marca, para esta compañía internacional...”<sup>206</sup>

“La teoría a la que – Behrens – volteo primero, fue su propia versión de la teoría de Hegel... Tiene que ver con la forma en la que la arquitectura aparece en la historia... la vocación de la arquitectura, tiene que mover un cambio a través de la historia... Al segundo teórico que Behrens volteo fue el arquitecto e historiador Gottfried Semper... Ejerció como arquitecto, pero también como teórico de la arquitectura,... cuyo interés primario fue el de los primeros principios de la arquitectura”.<sup>207</sup>

Él entendía de forma teológica, el desarrollo de la arquitectura, respaldado en Hegel. Debido a que su teoría, alude a que las formas del pasado, se encuentran presentes en las nuevas expresiones arquitectónicas. El otro teórico a quien volteo fue Gottfried Semper, a

---

<sup>204</sup> “Se agrupan usualmente bajo el nombre de cascarones..., estructuras laminares... La condición necesaria,... para que no existan flexiones es que la superficie que constituye el cascarón sea de doble curvatura...” (Colin 20).

<sup>205</sup> “La estructura de Xochimilco es una bóveda por arista octogonal, compuesta por la intersección de cuatro hypars... Esta es la estructura que Candela considera como su trabajo más significativo... Los bordes libres del cascarón se forman cortando las superficies por planos inclinados hacia afuera...” (Ídem 216 -221).

<sup>206</sup> “The architect Peter Behrens in 1907 was appointed artistic director responsible for creating an entire image system, or branding package, for this international company”. (Hays “Lecture 6.2. Behrens’s Theory”).

<sup>207</sup> “The theory that he – Behrens – turned to first was his own version of Hegel’s theory... It has to do with the way architecture appears in history... vocation of architecture, has to move a change through the time”. “The second theorist that Behrens turned to was the architect and historian Gottfried Semper... Practicing architect, but also an architecture theorist whose primary interest was in the very beginnings of architecture”. (Hays “Lecture 6.2. The AEG Factory”. Min (4:13 – 7:28)).

continuación, se nombran los elementos que Behrens vio de la casa primitiva.<sup>208</sup> En la exposición en el Crystal Palace:

“heart and fire” asociado a la cerámica y el metal – ‘ceramic and metal’ – que representa un corazón o coraza donde se puede posar el fuego; luego está la base o “base” en inglés, la cual se asocia a la piedra – ‘masonry’ – ocupada en los cimientos; además está el techo y soporte o armadura tectónica llamado “roof and support (tectonic frame) asociado a la madera – ‘carpentry’ –. Aquí es donde se hace notar la riqueza fractal, así como sucede con el crystal Palace, al construir la estructura se va de los elementos de mayor dimensión a los de menor. Con la finalidad de brindar soporte y firmeza y finalmente la cubierta ‘enclosure’, relacionada con las formas que toman los tejidos, al hacer una tela. En la cabaña primitiva supone el tejido de fibras – también multidimensional – y con riqueza de cualidad fractal proveniente de las formas de la naturaleza.

Behrens creó todo un sistema de imagen para la compañía, logotipos empaques, etc. El mismo llamó, a este tipo de edificios industriales, “neoclásico industrial”. Además uso materiales nuevos y la forma arquitectónica se logró a consecuencia del uso de estos materiales. Al buscar detalles de cualidad fractal la pregunta a responder es: ¿Dónde están y cómo se localizan y distinguen estos detalles fractales?

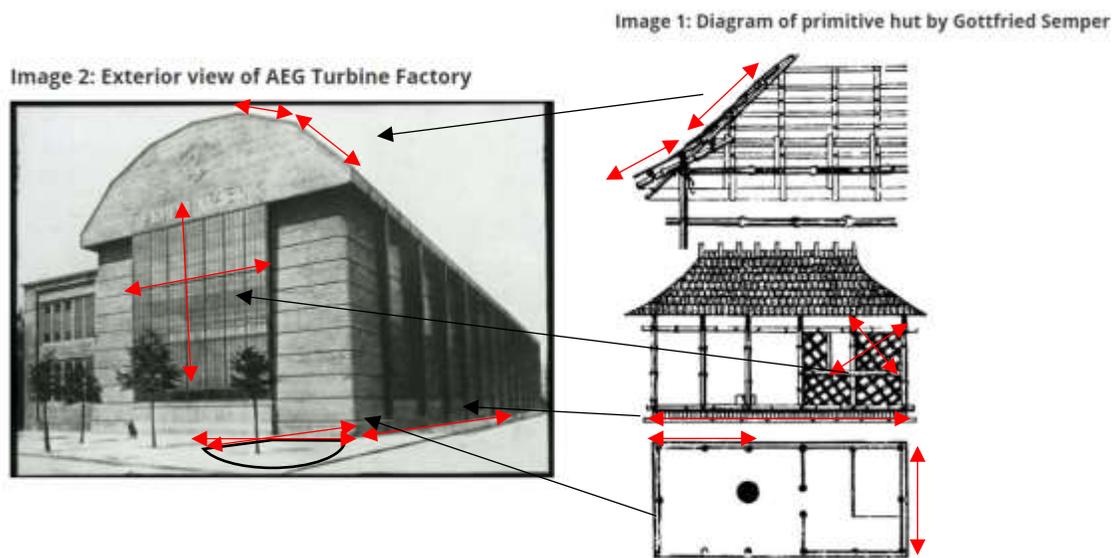


Fig. 79. El diseño arquitectónico de los elementos tectónicos<sup>209</sup>

<sup>208</sup> (Hays “Behren’s Teory. Lecture 6.2”). (Min 8:35 – 14:50)

<sup>209</sup> Harvard Fine Arts. “Exterior, turbine house; AEG Turbine Factory, AEG, Berlin (Tiergarten), Germany”. 2022. By Unknown, Harvard Fine Arts Library, Special Collections. 12 Ene. 2022 <<http://id.lib.harvard.edu/via/olvsite10712/urn-3:FHCL:925511/catalog>. ‘Karaibische Hütte from Der Stil in

La arquitectura de la fábrica, es un caso especial en la utilización de nuevos materiales, nunca antes utilizados en la construcción de un edificio.

“Entonces la arquitectura iniciando alrededor de finales del siglo XIX y avivando en el siglo XX. Comenzó a utilizarse con fines comerciales... Los estudiosos coinciden en gran medida, en que fue la fábrica de turbinas, para el Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft o General Electric Company en Alemania – cuya sede estaba en un sitio urbano prominente en Berlín –. Que es el ejemplo seminal, de la arquitectura entrando en esta representación comercial y al mismo tiempo, querer utilizar estos nuevos materiales de acero y vidrio. Pero insistiendo, en que estos materiales sean traídos en una especie de expresión artística, que sería adecuada para esta corporación”.<sup>210</sup>

El edificio y el trabajo de diseño que realizó en la fábrica de turbinas AEG, lo hizo desarrollando una teoría, a partir de los rastros de la arquitectura del pasado. Tuvo una gran influencia en el tema que hace referencia a una teoría más sofisticada y funcional que habla del elemento tectónico y otros temas de la construcción de formas caóticas o complejas.

“Los primeros trabajos de Behrens para la AEG (ambos en arquitectura y diseño industrial) no tuvieron precedentes en la industria; su dictados ideológicos superaron la ornamentación libre y el funcionalismo ingenuo de la ingeniería al tiempo que socavaban la teoría funcional “tectónica” más sofisticada”.<sup>211</sup>

Con esta teoría más avanzada, para integrar nuevos elementos, en la constitución de un edificio y cada una de sus partes elementales. Es que se dejó un precedente, para lo que luego sería la construcción de los edificios, de formas fractales caóticas y complejas. El caso de estudio: es el ‘Guggenheim de Bilbao’, una vez se observa el elemento ‘tectónico’, viendo las fotos de la construcción de su estructura: se ven formas canónicas ortogonales.

---

den Technischen und Tektonischen Künsten; oder, Praktische Aesthetik, vol. 2, p. 263' by Gottfried Semper. <https://archive.org/stream/derstilindentech02sempuoft#page/262/mode/2up>

<sup>210</sup> “So architecture beginning around the end of the 19th century and intensifying in the 20th century began to be used for commercial purposes... Scholars largely agree that it was the turbine factory for the Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, or General Electric Company, in Germany – whose headquarters were on a prominent urban site in Berlin – that is the seminal example of architecture entering into this commercial representation, and at the same time wanting to use these new materials of steel and glass, but insisting that these materials be brought into a sort of artistic expression that would be adequate for this corporation”. (Hays Ídem).

<sup>211</sup> “Behren’s first works for the AEG (both in architecture and industrial design) were unprecedented in industry; his ideological dictates overcame gratuitous ornamentation and naive engineering functionalism while also undermining the more sophisticated functional theory of *Tektonik*”. (A Journal, For Ideas and Criticism in Architecture. “Oppositions”. Winter 1981. [Published for the Institute for Architecture and Urban Studies by the MIT Press.](http://web.mit.edu/soa/www/downloads/1980-89/MAeu_Opp23_Wi1981_81.pdf) 28 Ago. 2021. < [http://web.mit.edu/soa/www/downloads/1980-89/MAeu\\_Opp23\\_Wi1981\\_81.pdf](http://web.mit.edu/soa/www/downloads/1980-89/MAeu_Opp23_Wi1981_81.pdf)>. Pp. 57.)

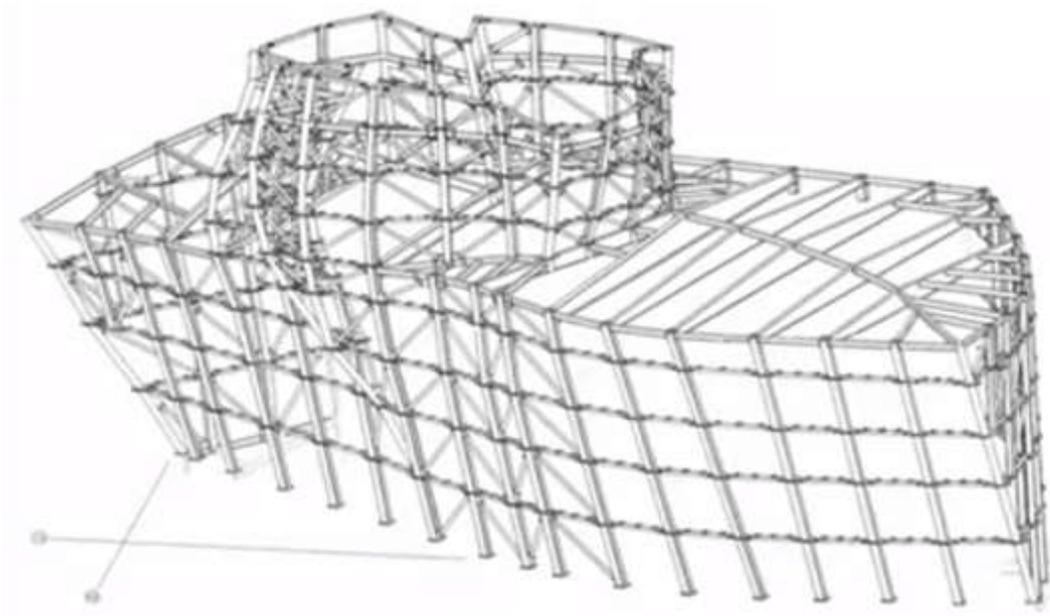


Fig. 80. Diseño de estructura del Guggenheim de Bilbao. Fuente<sup>212</sup>

Entonces los elementos básicos, del elemento tectónico desarrollado en la arquitectura moderna, gracias a la utilización del concreto, el vidrio y el acero. También se pueden ver en los edificios fractales, la estructura del Guggenheim de Bilbao es de acero y sobre de esta se puso el revestimiento de titanio.



Fig. 81. Diseño y estructura. Imagen. Fuente anterior.

Esta manera en la que se adaptan las tecnologías, usándolas como coparticipes de la forma, se puede observar en el siguiente edificio. Donde el principio, es el uso distinto y de doble propósito, que se hace de los paneles solares de energía foto voltaica. Lo cual tuvo una evolución, en lo que el arquitecto Scarpa, ya plantea para el diseño del Ministry of Environment Water Agriculture. Donde los paneles solares, se utilizan para darle forma a todo el techo del edificio.

<sup>212</sup> (Fundación Juan March. “El Guggenheim de Bilbao: arquitectura y espectáculo | Luis Fernández-Galiano”. 8 Jun. 2016. [Youtube](https://www.youtube.com/watch?v=rBLnqlbdWDk&t=1834s). 11 Mar. 2021 <<https://www.youtube.com/watch?v=rBLnqlbdWDk&t=1834s>>). Min (50:40 – 51:30).

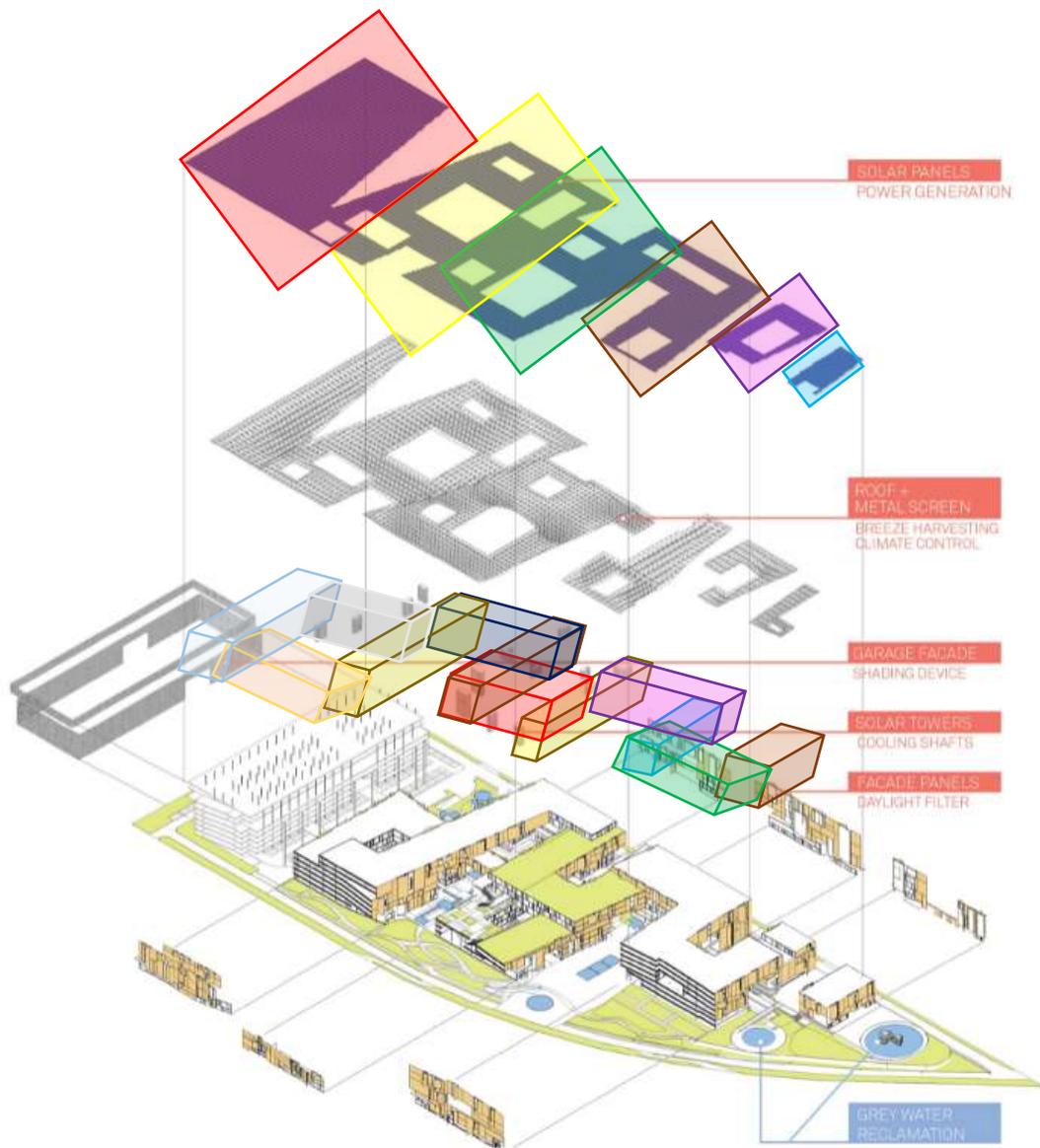


Fig. 82. ‘Áreas y volúmenes’. Fuente<sup>213</sup>

La utilización de los paneles solares, se ajusta a la forma compleja del edificio, en forma de camino: con un tipo de movimiento en zigzag. Aquí el edificio se fragmenta de forma aparentemente aleatoria y sobre el techo, con los paneles solares se diseñó una forma que coincide con el edificio, utilizando cuadrados y rectángulos irregulares. Otro tipo de edificios de formas arquitectónicas que parecen moverse, con una geometría muy similar, a la utilizada en el Aronoff Center de Eisenman. Todas estas especies de formas aleatorias, también se pueden ver en el ejemplo del ‘Museo Judío de Berlín’ del arq. Daniel Libeskind, con un

<sup>213</sup> Scarpa. Brooks. “Ministry of Environment Water Agriculture”. 2010. Brooks + Scarpa. Architecture Landscape Urban Design. 1 Jul 2021 <<https://brooksscarpa.com/ministry-of-environment-water-agriculture>>

edificio que parece en su perímetro un camino aleatorio. Las plantas de estos edificios en conjunto con sus volúmenes, permiten ver sus formas fractales de formas caóticas – sin un orden aparente –.



Fig. 83. La interconexión de volúmenes. Fuente imagen<sup>214</sup>

***Casa Orgánica: Retícula Curva de Dimensión Fractal.*** Otro caso relevante tomado de ejemplo es una casa llamada ‘Casa Orgánica’ de Javier Senosiain en México, analizada por su forma fractal compleja, que surge de una imitación de la naturaleza y sus formas orgánicas. Si bien el elemento clásico de Vitruvio: “la utilidad se logra mediante la correcta disposición, de las partes de un edificio, de modo que no ocasionen ningún obstáculo. Junto con una apropiada distribución, orientadas del modo conveniente”<sup>215</sup>. En este caso se analiza respecto a que la forma del edificio no ocasione ningún obstáculo a las personas – un piso rugoso sería un ejemplo contrario –. En este aspecto se considera el resultado del conjunto, finalmente como una casa contemporánea, para una familia... El ‘alojamiento de personas y sus actividades’, se resuelve integrando los elementos básicos de la casa contemporánea (habitaciones, cocina, baño, estancia...), el recubrimiento es un jardín con pasto y plantas... La forma exterior y de las paredes tienen forma de toroide “esto se llama una superficie

<sup>214</sup> Studio Libeskind. “Museo Judío de Berlín”. 2001. [Libeskind.com](http://Libeskind.com). 12 Sep 2021 <<https://libeskind.com/work/jewish-museum-berlin/>>

<sup>215</sup> (Vitruvio 36)

toral”.<sup>216</sup> Analizando el edificio este tiene una malla estructural curva, para esto se utilizan las retículas con forma de doble curvatura.

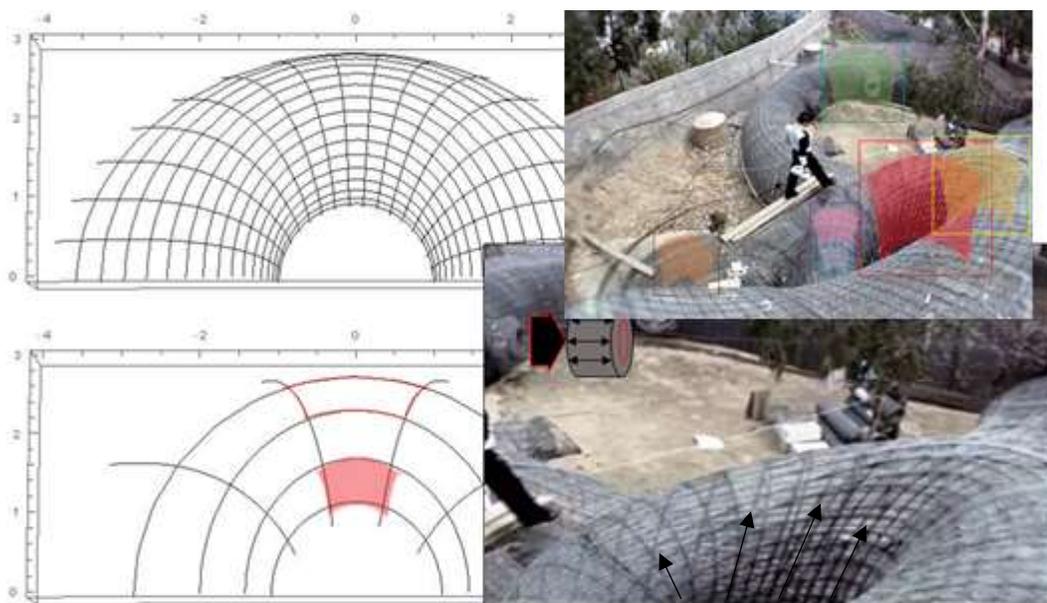


Fig. 84. Retícula de Doble Curvatura.

La idea, es analizar la arquitectura y reconocer la geometría compleja del edificio, su estructura se considera firme. Fue construida con una malla de acero y mortero, utilizados con una técnica constructiva llamada ferro-cemento<sup>217</sup>. Aquí es donde la retícula de dimensión fractal curva, se muestra dentro de las posibilidades de ajuste, de las formas del edificio. Primero se crea una forma canónica en computadora – mostrada en la figura siguiente –, la malla o retícula es el elemento técnico a imitar, primero con la geometría arquitectónica adecuada – en la etapa de diseño arquitectónico –. Y luego con el método constructivo, que mejor se adapte, para reproducir esa forma arquitectónica. Si bien se mencionó que las medidas entre el dibujo y la construcción, siempre difieren, los diagramas son prácticamente la herramienta técnica de diseño arquitectónico.

<sup>216</sup> SMIE, ESIA, Tecamachalco. Q&A. “Platicando con: Arq. Javier Sienosiain ‘Construyendo como la Naturaleza’”. 29 Abr. 2021. [FaceBook.watch](https://fb.watch/7F9bYY48LK/). 29 Abr. 2021 <<https://fb.watch/7F9bYY48LK/>>. Min. (1:02:30 – 1:03:30)

<sup>217</sup> Hennebique, a self-educated French Builder, first used concrete in 1879. He then conducted an extensive programming of private research before patenting his own uniquely comprehensive system in 1892. Before Hennebique the great problem in ferroconcrete had been the provision of monolithic joint”.

“Hennebique fue un constructor francés autodidacta, el utilizó el hormigón por primera vez en 1879. Luego llevó a cabo una programación extensa de investigaciones privadas, antes de patentar su propio sistema único e integral en 1892. Antes de Hennebique el gran problema con el hormigón armado – ferro cemento – estaba relacionado con la provisión de juntas monolíticas”.

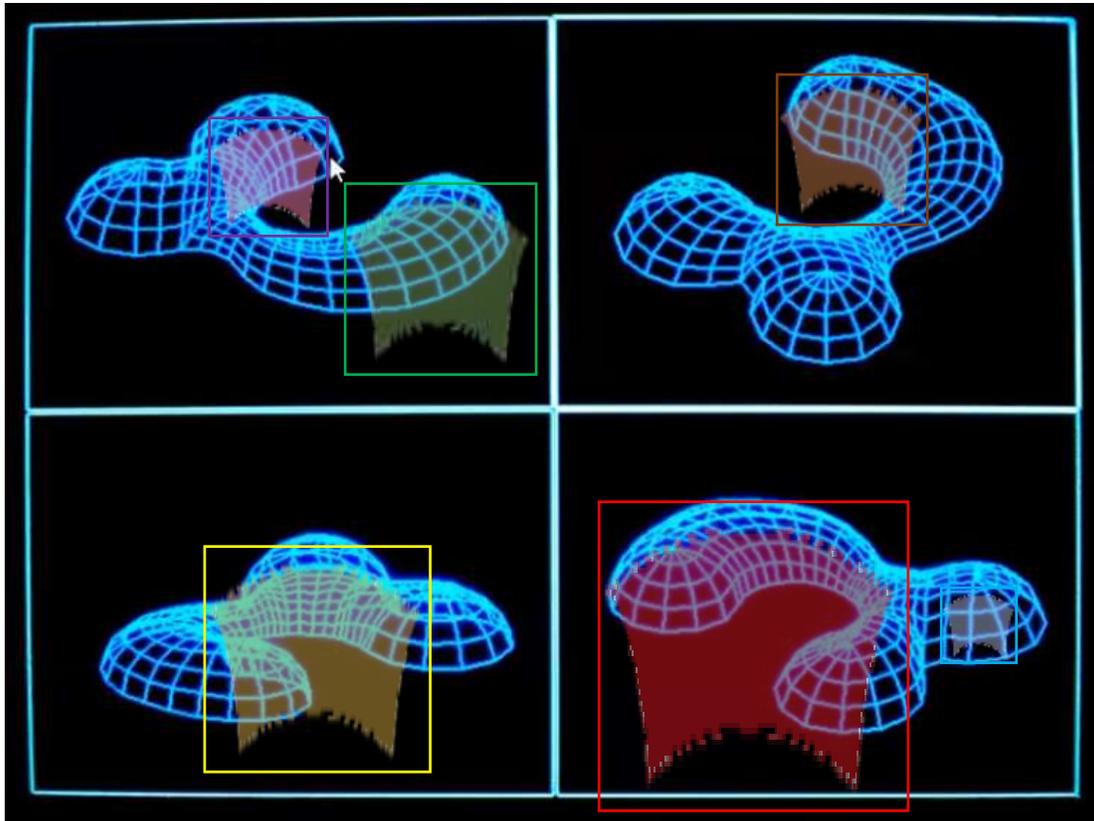


Fig. 85. ‘Una casa con formas complejas’. Fuente: Elaboración propia con imágenes. (SMIE conferencia)<sup>218</sup>

Sus formas toroides, son formas que se construyen con procesos geométricos computacionales, que implican transformaciones, deformaciones, intersecciones. Son algunas de entre muchas variables, aplicadas a una forma geométrica canónica inicial, para moldear una forma geométrica compleja. Con la retícula final, se tiene la estructura de la forma compuesta, y esta retícula final representa la forma canónica de la figura geométrica compuesta. Con esta se tiene una guía para la proyección en el espacio físico; se tiene dominio de: las diferentes escalas en las que se trabaja; los cambios dimensionales en un espacio coordinado; y el diseño de posibles trazos y tejidos para el alzado. La doble curvatura, da también resistencia y firmeza adicional. Note que independientemente de la forma, no se descuida la utilización de elementos clásicos, como la firmeza. Estos elementos son una herencia de los grandes tratadistas del viejo continente. Que llegaron a México en gran parte por la obra de Serlio.<sup>219</sup> De quien se tuvo una gran influencia, a través de muchas de las órdenes religiosas, que llegaron al nuevo continente en la época de la colonia.

<sup>218</sup> SMIE, ESIA, Tecamachalco. Q&A. “Platicando con: Arq. Javier Sienosiain ‘Construyendo como la Naturaleza’”. 29 Abr. 2021. FaceBook.watch. 29 Abr. 2021 <<https://fb.watch/7F9bYY48LK/>>.

<sup>219</sup> (Serlio).

**ICD/ITKE Research Pavilion 2011.** En el siguiente ejemplo se ve el uso que se hace de los softwares para proyectar en el ‘the Institute for Computational Design (ICD) and the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE)’ en el año 2011 el “Bionic Research Pavilion”.<sup>220</sup> En la imagen se puede ver un brazo robótico, con el que cortaron las piezas, para la sección de ensamble. Los paneles individuales, con los que se construye el pabellón, tienen características que lo hacen fractal. Por el cambio de escala y dimensión, presentes en las múltiples variables geométricas, con las que se construye cada forma.



Fig. 86. El pabellón ensamblado como rompecabezas

El software se utiliza, para tener un diagrama, de la forma en la que se van a ir cortando las láminas de madera. El ensamble de estas se hace manualmente, donde cada una de las partes que construyen el pabellón, son similares a módulos hexagonales. Todas estas partes son diferentes, lo cual hace, que cada pieza tenga una forma única. Esto inmediatamente hace pensar, en las formas de la naturaleza que se asemejan a estas construcciones y se hace notar: que la computadora, fue la que hizo posible, construir el rompecabezas. Unido con piezas todas proporcionalmente distintas.

<sup>220</sup> “The project aims at integrating the performative capacity of biological structures into architectural design.” (Knippers, J. A., Menges. “ICD/ITKE Research Pavilion 2011”. 2011. University of Stuttgart: Institute for Computational Design. 16 Mar. 2021 <<https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/#:~:text=ICD%2FITKE%20Research%20Pavilion%202011%20In%20summer%202011%20the,wood%20at%20the%20intersection%20of%20teaching%20and%20research>>). “El Proyecto tiene la meta, de integrar la capacidad de actuación de las estructuras biológicas, en un diseño arquitectónico”.



Fig. 87. Señalización de algunas formas variables, que crean cualidad fractal. Modificación de imagen original.<sup>221</sup>

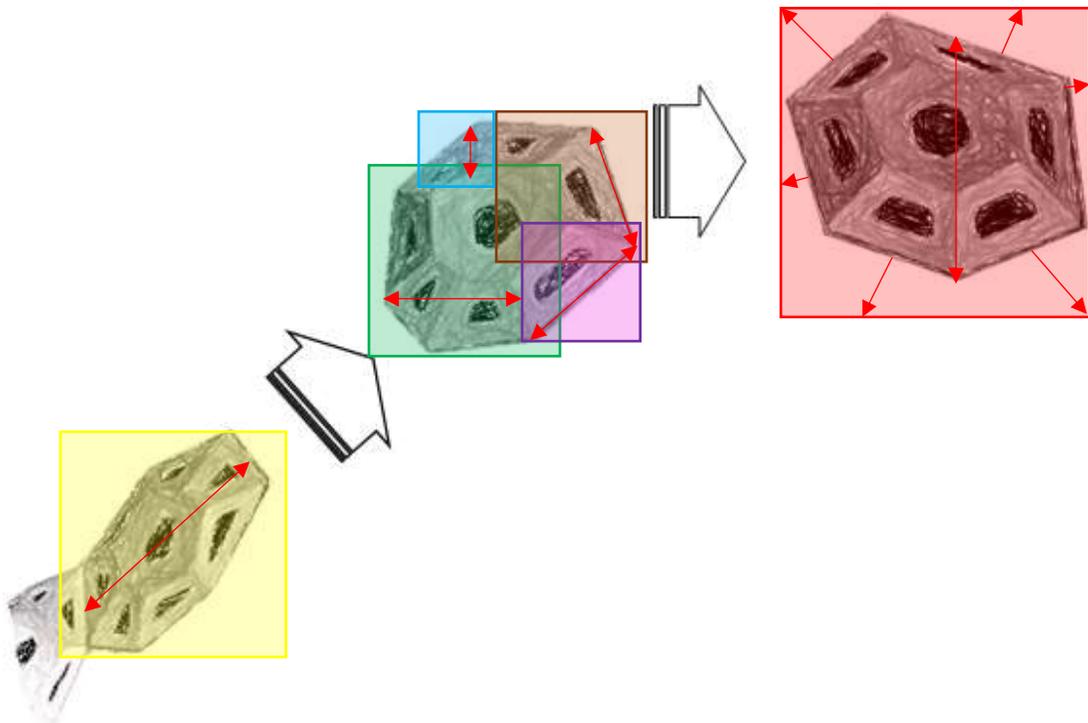


Fig. 88. Formas diferenciales.

$$\text{Proporción 1} \rightarrow PA_1 = 1/[FA = 0.71] = 1.40$$

$$\text{Proporción 2} \rightarrow [FA = \sqrt{1.26^2 + 1.43^2} = 1.90] / PA_2 = 1.57 = 1.21$$

<sup>221</sup> Archdaily. "ICD | ITKE Research Pavilion 2011 / ICD/ITKE University of Stuttgart". 18 Ene. 2012. ArchDaily. 24 Feb 2023 <<https://www.archdaily.com/200685/icditke-research-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart>>

$$\text{Proporción 3} \rightarrow PA_3 = 2/[FA = \sqrt[2]{1.61^2 + 0.58^2} = 1.71] = 1.16$$

$$\text{Proporción 4} \rightarrow PA_4 = 2.54/[FA = 1.85] = 1.37$$

$$\text{Proporción 5} \rightarrow PA_5 = 3/[FA = \sqrt[2]{2^2 + 2.2^2} = 2.97] = 1.01$$

$$\text{Proporción 6} \rightarrow PA_6 = 4.11/[FA = 3.3] = 1.24$$

$$\text{Proporciones } P_1 \rightarrow \begin{array}{ccc} 1.40 & 1.21 & 1.16 \\ 1.37 & 1.01 & 1.24 \end{array}$$

$$\text{Diferencias} \rightarrow \{P_1 - \varphi\} = \begin{array}{ccc} 0.218 & 0.408 & 0.458 \\ 0.248 & 0.608 & 0.378 \end{array}$$

Las generalidades de un análisis geométrico, no dicen que forma tiene cada uno de los elementos arquitectónicos, del edificio de estudio. Entonces cada elemento arquitectónico, tiene una matriz de proporciones única, asociadas a su forma. La conclusión es que se llegó al entendimiento de que hay un tipo de arquitectura, muy escultórica, en donde se usan formas construidas a base de múltiples variables geométricas.

## Conclusiones

**Introducción.** A través de la investigación, se revisa la relación, que se dio entre la geometría fractal y la arquitectura. El cambio en el estado del arte, se logró con la utilización de cuatro momentos significativos, en los que se dio dicha relación. De aquí se tomó en la investigación, el aprovechamiento de cuatro teorías, que significan la manera en la que se utilizó la geometría fractal en la arquitectura. Estas cuatro teorías enlistadas, es a lo que se refiere la *ingeniería arquitectónica para diseños fractales*, a partir de dicho aprovechamiento se proponen dos técnicas adicionales.

1.- La primera es la utilización de cuadrados que siguen la serie de Fibonacci (cada panel representa una casilla de una retícula, que corresponde a las medidas de dicha casilla), para construir retículas de dimensión fractal. Los llamados *paneles de Fibonacci* con fines propios de la investigación, además representan una casilla de una retícula, todo configurado con medidas del Sistema Internacional de Medidas y colores. Quedando así, que un *panel de Fibonacci*, es una celda compuesta por variables dimensionales y visuales – el color –.

2.- La segunda es la construcción con *paneles de Fibonacci*, como se hizo en el capítulo cuatro en la sección de la teoría tres, a base de una simulación.

Esto se piensa significa, una aportación diferente a las investigaciones realizadas, respecto a la arquitectura fractal. Logrando así oportunidades en la ampliación de los métodos de diseño arquitectónico. Si bien se reconoce que en la arquitectura anterior a este descubrimiento geométrico; hay formas fractales debidas a la imitación de las formas de la naturaleza; a partir de la publicación, del descubrimiento de la geometría fractal, de Benoit Mandelbrot: se supo que utilizando su ecuación e iteraciones, las formas vistas en la naturaleza, se podían aproximar con enorme exactitud. Entonces se puede medir cuando la arquitectura es poseedora de detalles fractales y cuando la arquitectura es ausente de los mismos. Luego con la documentación<sup>222</sup> del primer diseño arquitectónico fractal, hecho explícitamente con la técnica de *auto similitud*, en la casa 11<sup>a</sup> de Eisenman.<sup>223</sup> Entonces se acepta que los nuevos

---

<sup>222</sup> The Canadian Centre for Architecture. “Digitized Items: casa 11a”. 2020. [CCA.QC.CA](https://www.cca.qc.ca/en/search?digigroup=391314). 28 Ene. 2020 <<https://www.cca.qc.ca/en/search?digigroup=391314>>

<sup>223</sup> Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. “Peter Eisenman casa XI”. Revista de Arquitectura. 218 (1979): 34-36. Encontrada en el recurso (<<https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1977-1980/docs/revista-articles/revista-arquitectura-1979-n218-pag34-36.pdf>>).

En esta revista se dan cita algunas de las ideas que giraban en torno a la casa 11<sup>a</sup> de Eisenman: “La geometría euclidiana no puede seguir expresando, actualmente, las incertidumbres y las relatividades del mundo moderno; por el contrario, la topología las abarca mejor gracias a sus distancias relativas y a sus superficies continuas e infinitas. Esto es lo que escribe P. Eisenman a propósito de esta casa que parece más una reflexión

avances en geometría; las nuevas figuras geométricas; y las nuevas formas que se pueden construir incluyendo a la geometría fractal, son parte de la evolución de la arquitectura.

En la investigación se consideró, por su detalle de diseño, que la casa 11<sup>a</sup>, fue la apropiación y aprovechamiento significativo de la geometría fractal en la arquitectura. A partir de aquí hay una correlación directa en el hecho de que la arquitectura fractal solo existe si y solo si el arquitecto utiliza esta técnica en sus diseños. No toda la arquitectura es fractal, aun cuando en la arquitectura de todos los tiempos, hay construcciones que muestran estos detalles. Por lo tanto se reconoce que la arquitectura, siempre ha sido poseedora de técnicas de diseño y construcción, que le han permitido materializar obras con detalles de calidad fractal. Se observó que con las herramientas de diseño por computadora de la actualidad, el arquitecto puede estar haciendo uso de la geometría fractal, sin embargo esto no significa que su diseño sea fractal. Se considera un significativo tener las cuatro teorías enlistadas, pues constituyen la *ingeniería arquitectónica para diseños fractales*, con la que se puede concluir una obra de arquitectura fractal. A manera de conclusión: la arquitectura contemporánea se distingue, por una utilización de cambios dimensionales variados: a consecuencia de la relación que se dio, a través del tiempo, entre la geometría sus avances científicos y tecnológicos y la arquitectura y sus procesos de trabajo.

Sin embargo el cambio más significativo en la utilización de geometrías diferentes a la clásica, es el que trajo consigo la utilización de la geometría fractal y sus procesos computacionales, en la arquitectura. Dado a que las geometrías son un tratamiento técnico, para encontrar la forma en el espacio, con el diseño arquitectónico y la arquitectura.

“Arquitectura como espacio. Los arquitectos han sido hechizados por un simple elemento del paisaje italiano: la plaza. Su espacio tradicional e intrincadamente cerrado a escala de los peatones, es más fácil de agradar que la especial expansión de la Ruta 66 (< <https://www.legendsofamerica.com/ca-urbansprawl/>>) y Los Ángeles. La educación que han tenido los arquitectos es sobre el espacio, y el espacio cerrado es el más fácil de manejar.

---

sobre el hombre y el espacio contemporáneo que un proyecto de albergue. La reflexión de Eisenman viene de la botella de Klein, un objeto de superficie continua que no tiene ni interior ni exterior, sino lo uno y lo otro. Como el objeto topológico, esta casa es a la vez introvertida y extrovertida, dentro y fuera, habitada y visitada, tomada globalmente o vivida parcialmente. La casa debe albergar a una familia que, según las horas, los días o las épocas, está dispersa o reunida. Una situación que incita al arquitecto a reflexionar sobre un interior parcelado en múltiples piezas funcionales y un exterior de fachadas homogéneas que expresan la unidad aparente del edificio. Eisenman piensa que estas dos nociones de interior y exterior son, hoy día, subjetivas, ya que las piezas de una habitación carecen de otras relaciones comunes que no sean las funciones, y que la fachada apenas puede expresar las contradicciones que implica el canon de la arquitectura moderna”.

Durante los últimos 40 años, los teóricos de la arquitectura moderna (a veces con la excepción de Wright y Le Corbusier) han tenido un enfoque centrado en el espacio como el ingrediente esencial que separa la arquitectura de la pintura, la escultura y la literatura... Arquitectura como símbolo.”<sup>224</sup>

El uso de la geometría fractal, supone cambios: la comprensión del uso de la geometría clásica, con técnicas que le dan cualidad fractal (en la búsqueda de las formas de la naturaleza). Y la integración de su uso en la arquitectura, *a posteriori*.

“El símbolo en el espacio antes que la forma en el espacio: Las Vegas como sistema de comunicación. El letrero del Motel Monticello, una silueta de una enorme cómoda alta ‘Chip-pendale’, es visible en la carretera antes que el mismo motel. Esta arquitectura de estilos y signos es anti-espacial; es una arquitectura de la comunicación sobre el espacio; la comunicación domina el espacio como elemento en la arquitectura y en el paisaje... La arquitectura de la persuasión. La hoja de trébol y el aeropuerto comunican eficiencia y seguridad para el movimiento de las multitudes en automóviles o a pie. Pero para la persuasión comercial las palabras y los símbolos se pueden usar en el espacio... Amplio espacio en la tradición histórica y en la A&P. El estacionamiento de A&P (hace referencia a una cadena de tiendas de súper mercados, Venturi está comparando el estacionamiento de una tienda de comestibles con el Foro Romano de la antigüedad.) es una fase presente en la evolución del espacio vasto desde Versalles... El letrero es más importante que la arquitectura... La arquitectura es lo que es barato. A veces el edificio es el signo: la tienda de patos en forma de pato, llamada ‘The Long Island Duckling’, es un símbolo escultórico y un refugio arquitectónico”.<sup>225</sup>

---

<sup>224</sup> “Architecture as Space. Architects have been bewitched by a single element of the Italian landscape: the piazza. Its traditional, pedestrian-scaled, and intricately enclosed space is easier to like than the special sprawl of Route 66 and Los Angeles. Architects have been brought up on space, and enclosed space is the easiest to handle. During the last 40 years, theorist of Modern architecture (Wright and Le Corbusier sometimes excepted) have focused on space as the essential ingredient that separates architecture from painting, sculpture, and literature... Architecture as Symbol. Critics and historians, who documented the ‘decline of popular symbols’ in art, supported orthodox Modern architects, who shunned symbolism of form as an expression of reinforcement of content: meaning was to be communicated, not through allusion to previously known forms, but through the inherent, physiognomic characteristics of form”. (Venturi 6-7).

<sup>225</sup> “Symbol in space before form in space: Las Vegas as communication system. The sign for the Motel Monticello, a silhouette of an enormous Chip-pendale highboy, is visible of the highway before the motel itself. This architecture of styles and signs is antispatial; it is an architecture of communication over space; communication dominates space as an element in architecture and in the landscape... The architecture of persuasion. The cloverleaf and airport communicate with moving crowds in cars or on foot for efficiency and safety. But words and symbols may be used in space for commercial persuasion... Vast space in the historical tradition and at the A&P. The A&P parking lot is a current phase in the evolution of vast space since Versailles... The sign is more important than the architecture... The architecture is what is cheap. Sometimes the building is the sign: The duck store in the shape of duck, called ‘The Long Island Duckling,’ is sculptural symbol and architectural shelter”. (idem 8-13).

Los cambios se pueden ver en una línea de tiempo; a partir de la transformación que significó, pasar de las estructuras pesadas e inmensas, con poca disposición en sus espacios interiores, de formas persistentemente construidas con geométricas clásicas; a cambios que se reflejan en lo que más adelante fue una arquitectura más esbelta y con formas de todo tipo, desde las formas más cercanas a las vistas en la naturaleza, hasta la forma de un pato. Venturi en *Learning From las Vegas*, observa la manera en la que se experimentó el conocimiento de nuevas formas, símbolos, íconos e índices en la arquitectura:

“Las formas de la arquitectura moderna han sido creadas por arquitectos... Aunque los arquitectos modernos las han olvidado en gran medida, existe un precedente histórico para el simbolismo en la arquitectura, y las complejidades de la iconografía han seguido siendo una parte importante de la disciplina de la historia del arte... Las formas iconográficas y los atavíos de la arquitectura medieval y renacentista se redujeron a una textura policromada al servicio del espacio... La arquitectura neoclásica gustó, no por su uso romántico de la asociación, sino por su simplicidad formal... En los años 1950s y 1960s, estos ‘expresionistas abstractos’ de la arquitectura moderna, reconocieron una dimensión del complejo de villas y plazas, su ‘escala peatonal’ y la ‘vida urbana’ engendrada por su arquitectura... En términos iconográficos, la catedral es un cobertizo decorado y un pato. La tardía Catedral Bizantina Metropolitana en Atenas, es absurda como pieza arquitectónica. Está ‘fuera de escala’: su pequeño tamaño no se corresponde con su forma compleja... Así como la evolución arquitectónica de la catedral gótica típica, se puede trazar a lo largo de las décadas a través de cambios estilísticos y simbólicos, una evolución similar – rara en la arquitectura contemporánea –, incluso podría seguirse en la arquitectura comercial de Las Vegas”.<sup>226</sup>

En donde se exalto una realidad, la imposibilidad en el pasado de construir muchas formas, las cuales solo se pudieron experimentar: con la existencia de los avances tecnológicos, constructivos y de diseño (consecuencia de la utilización de la geometría fractal y la

---

<sup>226</sup> “The forms of Modern architecture have been created by architects... Although largely forgotten by Modern architects, the historical precedent for symbolism in architecture exist, and the complexities of iconography have continued to be a major part of the discipline of art history... The iconographic forms and trappings of medieval and Renaissance architecture were reduce to polychromatic texture at the service of space... Neoclassical architecture was liked, not for its Romantic use of association, but for its formal simplicity... In the 1950s and 1960s, these “Abstract Expressionists” of Modern architecture acknowledged one dimension of the hill town-piazza complex: its ‘pedestrian scale’ and the ‘urban life’ engendered by its architecture... In iconographic terms, the cathedral is a decorated shed and a duck. The late Byzantine Metropole Cathedral in Athens is absurd as a piece of architecture. It is ‘out of scale’: Its small size does not correspond to its complex form... Just as the architectural evolution of typical Gothic cathedral may be traced over the decades through stylistic and symbolic changes, a similar evolution – rare in contemporary architecture – may also be followed in the commercial architecture of las Vegas” (Venturi 104-106).

computación). En la actualidad los softwares de diseño arquitectónico, son el medio más importante de diseño, aunque se recuerda que el primer diseño arquitectónico fractal fue un dibujo. Donde el espacio es puramente arquitectónico y no depende de las matemáticas explícitas, sino solo de su forma y de la utilización de las técnicas fractales: tres dimensiones diferentes; la regla de auto similitud; la retículas fractales; y las formas fractales caóticas y complejas (prácticamente esta última etapa, es la consecuencia del diseño arquitectónico virtual y animado, el año 2022 dejó ver que bajo estos principios de diseño la 'IA' inteligencia artificial, con algunos parámetros: puede interpretar un diseño arquitectónico fractal súper caótico y/o complejo). Este diseño, fue el parte aguas para una nueva escuela, que giró en torno a varios arquitectos contemporáneos célebres – mencionados en las referencias –. Que fueron descubriendo las posibilidades de las técnicas constructivas, fueron utilizando los nuevos recursos geométricos – en este caso fractales – para crear nuevas formas y construir arquitectura fractal. En la actualidad sería difícil pensar que una obra de arquitectura, con forma explícita fractal, sea una arquitectura construida con un recurso geométrico propio. Sin embargo la arquitectura contemporánea, sin más que esa descripción, engloba toda una época y ahí entra la arquitectura hecha con geometría fractal.

Note que: puede haber otra arquitectura, hecha con otro tipo de geometrías, como la geometría booleana de la computación gráfica. En la presente investigación, se distinguió el caso de la creación de la geometría arquitectónica fractal, diferenciable por el proceso de diseño arquitectónico fractal. El cual se puede distinguir porque además de utilizar la geometría clásica, se utiliza la geometría fractal, que por su naturaleza misma tiene los límites siguientes:

- 1.- Cuando el arquitecto expresa su arquitectura es fractal o hecha con geometría fractal.
- 2.- Cuando aún sin una descripción por parte del arquitecto, la arquitectura misma es una muestra de formas fractales explícitas.

En este último punto es el que se ha repetido desde la época arcaica, el caso de la pirámide es una arquitectura con detalles que se aproximan a una forma fractal, por eso después del descubrimiento de esta geometría, se relaciona que este tipo de construcciones geométricas: son fácilmente construidas con la geometría fractal. Siendo que en el pasado por exhaustión geométrica, se buscaban composiciones de nuevas formas geométricas, construyéndolas con geometría clásica y era un trabajo arduo. De estas obras solo se puede decir si gozan o no de detalles fractales, mientras que una obra de arquitectura fractal, muestra composiciones que

rebasan los límites de la geometría clásica. Al responder la hipótesis, que se planteó en la investigación, de la siguiente manera:

*Hipótesis: 'Si el uso de la geometría fractal en la arquitectura y en el diseño arquitectónico, implica un cambio, entonces puede ser significativo'.*

La conclusión es que el uso de la geometría fractal en la arquitectura, introduce un cambio significativo, en el uso que se daba de la geometría en la producción de arquitectura. Al grado de que tanto en el diseño como en la construcción, se creó la existencia, de un discurso arquitectónico fractal. La contribución va encaminada a:

A). Que el discurso de la arquitectura hecha con geometría fractal; tanto en sus espacios exteriores; como en sus espacios interiores, den un mensaje. Distinguiendo cuando solo hay detalles de cualidad fractal y cuando la arquitectura es fractal.

B). Y a que las consecuencias estéticas, visuales e incluso cognitivas (pues la forma influye por sí misma, de forma visual y cognitiva, sin ningún tipo de antecedentes: ya sean matemáticos, geométricos o arquitectónicos), ayuden a mejorar su semiosis arquitectónica.

La investigación arrojó el resultado, de que al conocer la relación entre la geometría fractal y la arquitectura, se conocieron las técnicas de arquitectura fractal. El aprovechamiento de estas técnicas, brinda la posibilidad de poder hacer arquitectura fractal, siguiendo los pasos de estas cuatro teorías. Por lo tanto se postula la premisa: 'la arquitectura fractal es útil'. Esto se responde también de forma inductiva, al ver que la construcción de obras de arquitectura fractal, construidas con la utilización de: tres dimensiones diferentes; la regla de "auto similitud"; las retículas de dimensión fractal; y la regla de formas fractales caóticas y complejas (la construcción es por computadora, se utilizan las retículas de dimensión fractal en un espacio tridimensional, con volúmenes regulares y ortogonales – cajas – transformados con parámetros del espacio multidimensional). Es usada en la producción de arquitectura, con una influencia marcada, que se distingue por sus formas de arquitectura fractal. Esto desde que una persona ve su forma arquitectónica y esta influye visualmente en ella.

Una forma le puede gustar o no al espectador, pero cuando la ve; se queda la visión de la imagen; esta influencia visual se guarda en la memoria de las personas ya sean o no arquitectos (sea buena o mala, la cuestión es que la forma ya produjo su efecto visual, prendiéndose del proceso cognitivo). Y con esto se demuestra porque, acaso que lo olvide la memoria, una vez que se observa una forma arquitectónica fractal se aprehende como objeto

del conocimiento. La diferencia entre la forma arquitectónica fractal y una forma arquitectónica clásica, promueve esa acción de aprehensión. A tal grado que las personas y el arquitecto, con una sola vez que vean una arquitectura fractal, pueden decir si conocen o no, tal o cual forma arquitectónica después de haberla visto. Es decir la arquitectura fractal, utiliza como ícono distintivo, una construcción que no existía hasta antes de la geometría fractal y que generó nuevas formas nunca antes vistas en la arquitectura. Y esto último, es el sello distintivo, del porque la arquitectura fractal influyó a primera vista.

Es decir el conocimiento de una forma arquitectónica fractal, es un peso significativo en la memoria, porque se guarda la imagen, es como se diría ‘un golpe de ojo’. No importa si la impresión es negativa o positiva, la idea aquí es que la forma, se concentra en el punto de interés de las personas por medio del recurso visual. Así en arquitectura lo que una vez se hizo por mimesis y por exhaución geométrica, se facilitó con la geometría fractal. Lo cual va de la mano con la computación, en la figura siguiente se pone el ejemplo de un software que ofrece múltiples utilidades, en el manejo de millones de variables para realizar un proyecto fractal. “How to Control 9,298,091,736 Design Options in Project Fractal - Dynamo BIM”.<sup>227</sup> Conviene subrayar, que esto solo hace referencia a que es posible manejar múltiples variables, asociadas con la forma multidimensional de un proyecto arquitectónico fractal.

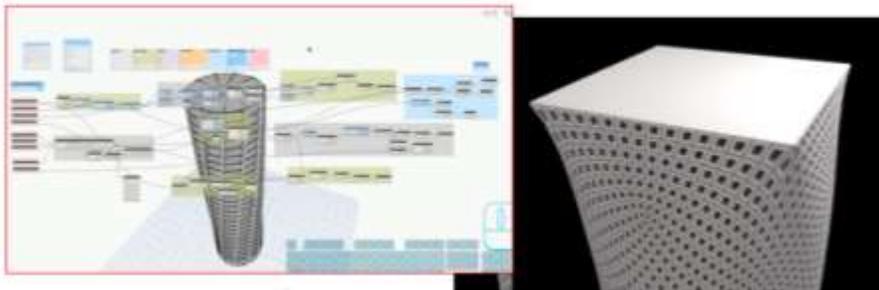


Fig. 89. Software Computacional.

**Repercusiones en la Arquitectura Contemporánea.** Debido a la complejidad que la arquitectura contemporánea ha desarrollado, en esta época de las tecnologías digitales, se observó que la utilización de la geometría fractal: ha sido digerida en el campo de la arquitectura. En la cual el diseño arquitectónico, ha expandido sus fronteras hacia nuevas posibilidades en la construcción de nuevas formas, esto más la facilidad compositiva. La cual se observa en el manejo de volúmenes, fragmentos y fracciones, utilizadas para diseñar y/o construir el espacio. Por ejemplo en el caso de los análisis geométricos realizados con el

---

<sup>227</sup> Dynamo. “New Dynamo”. 2021. [Autodesk, Inc.](https://dynamobim.org/) 15 Mar. 2021 <<https://dynamobim.org/>>

cálculo de la dimensión fractal, se hacen observaciones geométricas arquitectónicas, como que: las columnas clásicas, los pisos planos y los niveles hacia arriba con el mismo patrón, es parte de la utilización de espacios ortogonales. Que se consideran son una proyección del hombre erguido, con una posición vertical normal a noventa grados, sobre un piso plano – orientado según la línea horizontal –. La utilización de la serie de Fibonacci y la espiral, para la creación de los *paneles de Fibonacci*. Obedece a la utilización en la investigación, de una herramienta geométrica muy utilizada en la arquitectura – la espiral de Fibonacci –, que además sirve de medida, forma y proporción.

Incluso el uso de la geometría fractal, ofrece un beneficio respecto a la geometría clásica, que es la utilización del espacio multidimensional de la geometría fractal, en el diseño.



Fig. 90. Casa de Música de Oporto<sup>228</sup>

Algo muy similar a lo que sucedió con el Guggenheim y posteriores edificios en los que se utilizó un software computacional de aeronáutica, es lo que ha permitido dibujar y construir figuras muy complejas. Estos softwares con los que se construyeron aviones de formas aerodinámicas complejas, fueron utilizados también por Rem Koolhaas quien utilizó la

---

<sup>228</sup> Koolhaas, Rem. “Casa de Música de Oporto 2005”. 2022. [Es.Wikiarquitectura.com](https://es.wikiarquitectura.com). 04 Nov. 2021  
<<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/casa-da-musica-en-oporto/>>

estética del caza invisible “stealth”, para crear la casa de Música de Oporto.<sup>229</sup> Lo interesante es ver la diversificación en la utilización de los recursos geométricos fractales, tanto para distinguir obras que tienen detalles fractales como para construir obras explícitamente fractales. Estas cuestiones geométricas que van de lo simple a lo complejo, con la utilización de la geometría fractal, se simplificaron. Al grado de que en muchos edificios contemporáneos, por ejemplo el edificio del Museo de Astronomía de Shanghai,<sup>230</sup> se pueden distinguir por la construcción de detalles y de cambios de dimensión multidimensionales en el perímetro, pero también por la utilización de técnica de auto similitud.



Fig. 91. Paisaje fraccionado. Fuente imagen<sup>228</sup>

Desde las formas fractales hasta las formas caóticas en que se fraccionan los espacios exteriores e interiores, se reconoce una imposibilidad *a priori*, en la construcción de arquitectura con detalles arquitectónicos y uso de materiales nunca antes vistos...

<sup>229</sup> Fundación, Juan March. “Rem Koolhaas”. 20 Oct. 2011. [YouTube.com. Fundación Juan March](https://youtu.be/dsGmG-L5l2E). 17 Ago. 2021 <<https://youtu.be/dsGmG-L5l2E>> Min. (53:50-54:15)

<sup>230</sup> Ravenscroft, Tom. “Ennead Architects designs Shanghai Astronomy Museum to ‘echo the essence of the Universe’”. 9 Ago. 2021. [Dezen.com](https://www.dezeen.com/2021/08/09/shanghai-astronomy-museum-tennead-architects-designs/?utm_medium=email&utm_campaign=Dezeen%20Weekly%202021&utm_content=Dezeen%20Weekly%202021+CID_569e91a51d044ad473d58c993a3ee7c9&utm_source=Dezeen%20Mail&utm_term=Ennead%20Architects%20designs%20Shanghai%20Astronomy%20Museum%20to%20echo%20the%20essence%20of%20the%20Universe). 12 Ago. 2021 <[https://www.dezeen.com/2021/08/09/shanghai-astronomy-museum-tennead-architects-designs/?utm\\_medium=email&utm\\_campaign=Dezeen%20Weekly%202021&utm\\_content=Dezeen%20Weekly%202021+CID\\_569e91a51d044ad473d58c993a3ee7c9&utm\\_source=Dezeen%20Mail&utm\\_term=Ennead%20Architects%20designs%20Shanghai%20Astronomy%20Museum%20to%20echo%20the%20essence%20of%20the%20Universe](https://www.dezeen.com/2021/08/09/shanghai-astronomy-museum-tennead-architects-designs/?utm_medium=email&utm_campaign=Dezeen%20Weekly%202021&utm_content=Dezeen%20Weekly%202021+CID_569e91a51d044ad473d58c993a3ee7c9&utm_source=Dezeen%20Mail&utm_term=Ennead%20Architects%20designs%20Shanghai%20Astronomy%20Museum%20to%20echo%20the%20essence%20of%20the%20Universe)>



Fig. 92. 'El globo y sus detalles aleatorios, al interior del edificio'. Fuente imagen<sup>228</sup>

Todas estas expresiones y detalles que van de la pequeña a la gran escala, con figuras que se forman por auto similitud o por aleatoriedad y le dan forma a los elementos arquitectónicos, se encuentran en múltiples elementos, ya sea aparadores, celosías...



Estructuras: Stand Metálico con Paneles



Celosías y recubrimientos con paneles en espacios exteriores

Fig. 93. Estructuras explícitamente fractales. Fuente imagen<sup>231</sup>

Incluso en la reutilización de materiales, pues los detalles fractales se pueden ver no solo en la forma arquitectónica, sino también en sus acabados.

<sup>231</sup> 'Stands y celosías fractales'. Fuente: "Munich Fractal Arena / Dear design" 05 Feb 2011. ArchDaily. Accessed 18 Aug 2021. <<https://www.archdaily.com/109512/munich-fractal-arena-dear-design>>.y Bruag. "Shading Screens - Perforated Facade Panels". 2020. Archdaily. 15 Ago. 2021 <[https://www.archdaily.com/catalog/us/products/8504/shading-screens-perforated-facade-panels-bruag?ad\\_source=search&ad\\_medium=search\\_result\\_all](https://www.archdaily.com/catalog/us/products/8504/shading-screens-perforated-facade-panels-bruag?ad_source=search&ad_medium=search_result_all)>



Fig. 94. ‘Detalles de cualidad fractal nacidos de los materiales utilizados’<sup>232</sup>

Luego el control de los elementos arquitectónicos de esta calidad, se facilita con la geometría fractal, no cabe duda que la herramienta facilita el manejo de las geometrías compuestas que son no euclidianas.

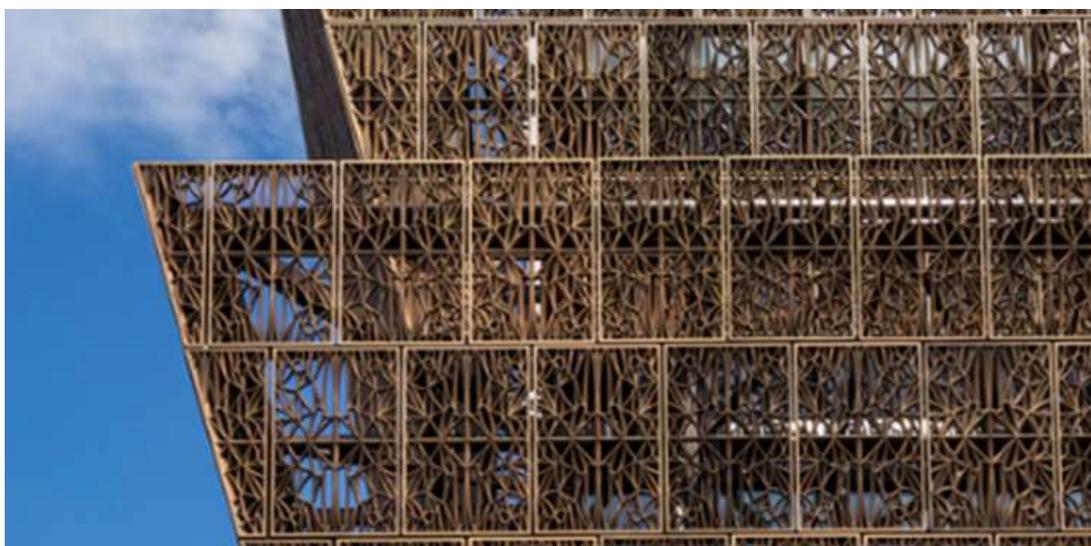


Fig. 95. ‘Formas caóticas en la celosía de los espacios exteriores’. Fuente imagen<sup>233</sup>

Se encontró que arquitectura que parece simple, por citar alguna la casa vernácula contemporánea, también se distingue por presentar en sus formas detalles de cualidad fractal. Esta arquitectura que desde la época arcaica y clásica goza de estos detalles fractales, en sus cambios dimensionales y entre elementos, debido a la imitación de la naturaleza. Se ha

<sup>232</sup> Domus. “Nigbo History Museum. Arq. Wang, Shu. Lu, Wenyu”. 3 Mar. 2012. domusweb.it. 18 Dic. 2020 <<http://www.domusweb.it/en/from-the-archive/2012/03/03/ningbo-history-museum.html>>

<sup>233</sup> "Smithsonian National Museum of African American History and Culture / Freelon Adjaye Bond/SmithGroup" 04 Jun 2019. ArchDaily. Accessed 18 Aug 2021. <<https://www.archdaily.com/794203/smithsonian-national-museum-of-african-american-history-and-culture-adjaye-associates>>

constatado en la investigación, algunos aspectos de la manera en la que se desarrolló la relación entre la geometría fractal y la arquitectura, incluso con la aparición de nuevos estilos como la deconstrucción. Se advierte que el aprovechamiento de la geometría fractal en la arquitectura, ya tiene digerida una técnica arquitectónica, para lograr formas variadas y de múltiples dimensiones. Por ejemplo en la figura siguiente, los cambios de entre elementos arquitectónicos, dan señales de la utilización de la técnica de auto similitud. Y ya sea que se utilicen en la composición: ‘tres dimensiones diferentes o más’, la regla de ‘auto similitud’, ‘el cálculo de la dimensión fractal’ o ‘las formas fractales caóticas o complejas’. Cualquiera de estas técnicas fractales vistas...



Fig. 96. ‘Técnica de auto similitud y de dimensiones diferentes en el elemento tectónico’. Fuente imagen <sup>234</sup>

Se admite que la arquitectura contemporánea por su riqueza en técnicas, provenientes desde la arquitectura clásica y moderna, ya tiene algunas características elementales de la arquitectura fractal. Por lo que la utilización de la geometría fractal en la arquitectura, se considera una consecuencia, de la utilización de los avances científicos y tecnológicos nuevos – de cada época – en este campo. A manera de desenlace, en la investigación se concentra la atención: en hacer notar que con el uso de la geometría fractal en la arquitectura, tanto como técnica de diseño, constructiva y de análisis. Sirvió para reconocer detalles fractales en los análisis y se mejoró el manejo de geometrías complejas hechas por computadora, lo cual dio por resultado una apertura al diseño arquitectónico fractal. Logrando abrir la mente hacia nuevas alternativas, para construir obras de arquitectura, con formas nuevas. Independientemente de que estas sean hechas para brindar un lugar, donde se reúnan las personas.

---

<sup>234</sup> ArchDaily. "Agri Chapel / Yu Momoeda Architecture Office" 05 Dic. 2017. ArchDaily.com. 18 Ago 2021. <<https://www.archdaily.com/884875/agri-chapel-yu-momoeda-architecture-office>>



Fig. 97. 'Edificio con patrones de auto similitud y formas caóticas'<sup>235</sup>

Por último se observó una ampliación en la compresión geométrica arquitectónica, desde el entendimiento de las formas con detalles de calidad fractal (surgidas de la imitación de la naturaleza), hechas con geometría clásica – utilizada de forma maestra –. Hasta la compresión del espacio multidimensional, muy difícil de entender e imposible de explicar arquitectónicamente, sin la geometría fractal.



Gráfica 7. 'Elementos clásicos, modernos y composiciones contemporáneas'. Elaboración propia.

<sup>235</sup> "Never Never Cube / Studio Ardete" 11 May 2021. ArchDaily. Accessed 18 Aug 2021. <<https://www.archdaily.com/961463/never-never-cube-studio-ardete>>

## Referencias

- Allen, Edward. Patrick, Rand. *Architectural Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- Aristóteles. *Retórica*. Trad. Quintín Racionero. Madrid: Pairo, 1999.
- Aron, Faegre. *The Nature of Architecture: the art & science of building with chaos and fractals*. Portland, Oregon, USA: Draft Essays, Willamette River Institute, 2004.
- Bachelard, Gaston. *La poética del espacio*. México: Fondo de Cultura Económica, 1957.
- Baldor. *Geometría Plana y del Espacio y Trigonometría*. México D.F.: Grupo Patria Cultural, 2001.
- Barozzi da Vignola, Iacomo. *Regla de los cinco órdenes arquitectónicos*. Trad. C. M. Delagardette. México: Imprenta de Andrade y Escalante, 1858.
- Bautista, Durán, Antonio. *El Cánón en el Arte. Reglas y Prescripciones en Torno a la Figura Humana. Tesis*. Universidad de Sevilla, 1993.
- Benade, Arthur H. "Fundamentals of Musical Acoustics". New York: Oxford University Press, 1976
- Bitterman, Mark. *Salted: A Manifesto on the World's Most Essential Mineral, with Recipes*. New York USA: Ten Speed Press, 2010.
- Böck, Ingrid. *Six Canonical Projects by Rem Koolhaas: Essays on the history of ideas*. Austria: jovis Verlag GmbH, 2015.
- Bovil, Carl. *Fractal Geometry in Architecture and Design*. Maryland USA: Springer Science + Bussines Media LLC, 1996.
- . *Sustainability in Architecture and Urban Design*. New York USA: Routledge, 2015.
- Bressani, Martin. *Architecture and the Historical Imagination: Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, 1814–1879*. England: Ashgate Publishing Company, 2014.
- Capitel, Antón. *Alvar Alto: Proyecto y Método*. España: Akal, 1994.
- Carreiro, Margaret y Yong, Chang, Song y Jianguo, Wu. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests: International Perspectives*. U. S. A.: Springer, 2008.
- Faber, Colin. *Las Estructuras de Candela*. Trad. Ing. Miguel M. Echeagaray. México: Compañía Editorial Continental, 1977.
- Collins, Rob. Matt, Symonds & Meike, Weber. *Roman Military Architecture on the Frontiers. Armies and Their Architecture in Late Antiquity*. Oxford: Oxbow Books, 2015.

- Corbo, Stefano. *From Formalism to Weak Form: The Architecture and Philosophy of Peter Eisenman*. England: Ashgate, 2014.
- Cortés, Rocha, Xavier. *Arquitectura Mecánica: la profesión y el oficio*. CDMX: Facultad de Arquitectura, UNAM, 2019.
- D. K., Ching, Francis. *Arquitectura, Forma, Espacio y Orden*. Trad. Arq. Santiago Castán. México: Ediciones G. Gili, S.A. de C. V., 1996.
- Daniel, Williams y FAIA. *Sustainable Design: Ecology, Architecture, and Planning*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- Doczi, György. *El poder de los límites: proporciones armónicas en la naturaleza y la arquitectura*. Buenos Aires: Editorial Troquel, 1996.
- Durero, Di Alberto. *Pittore e Geometra Chiarissimo Della Simmetria dei Corpi Hvmani. Libri Quattro*. Venecia: Aprello Roberto Meietti, 1594.
- Edward, Allen y Rand Patrick. *Architectural Detailing*. New Jersey, USA: Wiley, 2016.
- Ernest, Neufert. *Architects' Data*. Blackwell Science LTD: Oxford, 1980.
- Escrig, F. *The Great Structures in Architecture From Antiquity to Baroque*. Vol. 20. UK: WIT Press, 2006.
- Fischer, Brodwyn. Bryan, McCann. Javier, Auyero. *Cities from Scratch: Poverty and Informality in Urban Latinoamérica*. London: Duke University Press, 2014.
- Frampton, Kenneth. *Studies in Tectonic Culture*. Chicago, Illinois: The MIT Press, 1996.
- Gass, Saul I. *Linear Programming: Methods and Applications. Fifth Edition*. Mineola, New York: Dover Publications Inc., 2003.
- Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería. *Ingeniería de Cimentaciones Profundas*. 2 vols. México: SMIG, 2017.
- González, Juan, Manuel. *Towards the Beatification of Antoni Gaudí*. Barcelona: Association pro Beatification of Antoni Gaudí, 1992.
- Gropius, Walter. *The New Architecture and the Bauhaus*. Cambridge, Massachusetts USA: The MIT Press, 1965.
- Gurung, Kris. *Fractal Dimension in Architecture: An Exploration Of Spatial Dimesion*. Thesis. Dessau: Research Gate, 2017.
- Hambright, S. *Lecture 6: Robert Venturi, Vanna Venturi House. 1959-64*. Arizona: Drawing Canonical Ideas in Architecture. University of Arizona, s.f.

- Harvard University. "Sprawl and Suburbia". Harvard Design Magazine Readers, 2005. 21-54.
- Hays, K. Michael. Giovanni Damiani. *Bernad Tschumi*. Italia: Thames & Hudson Ltd, 2003.
- Hearn, Fil. *Ideas that Shaped Buildings*. Cambridge, Massachusetts USA: The MIT Press, 2003.
- Hillier, Bill y Hanson, Julienne. *The Social Logic of Space*. UK: Cambridge University Press, 1984.
- Imai, Masaki. *Kaizen: the Key to Japan's Competitive Success*. USA: Irwin Professional Pub, 1986.
- Isenberg, Barbara. *Conversations With Frank Gehry*. New York USA: Alfred A. Knopf, 2009.
- John, Ingram. *Invisible City: Poverty, Housing, and New Urbanism*. Austin: University of Texas Press, 2008.
- Kahn, Louis. *Conversations with Students*. Houston : Rice University School of Architecture , 1998.
- Kahn, Sal. *Linear Perspective: Brunelleschi's Experiment*. USA: Kahn Academy, 2016.
- Karel, Kosík. *Dialéctica de lo Concreto: Estudio sobre los Problemas del Hombre y del Mundo*. México: Grijalbo, 1967.
- Karen, Lewis. *Graphic Design for Architects*. New York USA: Routledge, 2015.
- Kenneth, Frampton. *Modern Architecture: a critical history*. London: Thames and Hudson, 1992.
- . *The English Crucible*. Britain, 1960.
- Koolhaas, Rem. *Delirious New York*. Italia: The Monacelli Press, Inc, 1994.
- Le, Corbusier. *Aircraft*. Londres: Trefoil Publications Ltd., 1987.
- . *Le Modulor*. Trad. Albert Junyent. Buenos Aires: Poseidon, 1961.
- . *Le Modulor 2*. Buenos Aires: Poseidon , 1962.
- . *The City of To-morrow and its Planning*. New York: Dover Publications, INC., 1987.
- . *Towards a New Architecture*. Trad. Frederick Etchells. New York USA: Dover Publications Inc., 1986.
- Lehmann, Charles H. *Geometría Analítica*. México: Limusa, 2009.
- Leon, Battista, Alberti. *The ten Books of Architecture*. New York USA: Dover, 1986.

- Lewis, Karen. *Graphic Design for Architects*. New York: Routledge, 2015.
- Mandelbrot, Benoit, B. «Fractals: Form, Chance, and. Dimension.» Recop. Reuiewed by Michael Aizenman. San Francisco: W. H. Freeman, 1977.
- . *The Fractal Geometry of the Nature*. New York USA: W. H. Freeman and Company, 1982.
- Martin, Richard. *The Architecture of David Lynch*. London, New Delhi, New York, Sydney: Bloomsbury, 2014.
- McHarg, Ian L. *Design with Nature*. Philadelphia, U. S.: Natural History Press, 1969.
- Mijares, Bracho, Carlos. *Tránsitos y Demoras: esbozos sobre el quehacer arquitectónico*. Chihuahua, México: Instituto Superior de Arquitectura y Diseño , 2002.
- Minke, Gernot. *Manual de Construcción en Tierra*. Uruguay: Fin de Siglo, 1994.
- Miquel, Adriá. *Mario Pani. La Construcción de la Modernidad*. México: Arquine, 2016.
- Moisset, Inés. *Fractales y Formas Arquitectónicas*. Argentina: i+p división editorial, 2003.
- Montaner, Joseph Maria. *Repensar Barcelona*. Barcelona: Edicions UPC (Universidad Politécnica de Barcelona), 2003.
- Morales, José Ricardo. *Arquitectónica*. Chile: Universidad del Biobío, 1984.
- O'Gorman, James F. *Chapter 14. 'the Prairie House'*. American Architectural History: A Contemporary Reader. Keith Eggener, Taylor And Francis, 2004.
- Ortín, Soriano, Pablo. "La Retícula en la Arquitectura Moderna". Dis. Universidad Politécnica de Valencia. 2016.
- Ostwald, Michael J. "Fractal Architecture". Nexus Network Journal. Vol. 3, No. 1 (2001): 74
- Ostwald, J., Michael. R., John, Moore. *Fractal Appropriations in Architecture: Examining Four Projects from the 1991 'Paper Architecture' Exhibition*. Australia: University of New Castle, s.f.
- Ostwald, Michael. Vaughan, Josephine. *The Fractal Dimension of Architecture*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- Palladio, Andrea. *Los Cuatro Libros de Arquitectura*. Trad. Luisa. Martinez, Crespo, Alicia Aliprandini. España: Ediciones Akal, S.A., 2010.
- . *The four Books of Architecture*. New York USA: Dover, 1996.
- Panero, Julius. Martin, Zelnik. "Las dimensiones humanas en los espacios interiores: estándares antropométricos". México: Ediciones G. Gili. 1996

- Parcker, James. "Trajan's Forum: A Study of the Monuments". California: California University Press, 1997.
- Piano, Renzo. *Renzo Piano Building Workshop Piece by Piece*. Padova: 6a. Edizione 'Biennale Internazionale di Architettura' by Barbara Cappochin, 2014.
- Quantrill, Malcom. *The Norman Foster Studio. Consistency through diversity*. London & New York: E & FN Spon, 2005.
- Reinach, Salomon. *Apolo: Historia General de las Artes Plásticas*. Trad. Domenech Rafael. México, D.F.: Editora Nacional, 1958.
- Roe, Jeremy. *Antoni Gaudí*. New York: Parkstone International , 2006.
- . *Gaudí Arquitecto y Artista*. Trad. Pablo Díaz-Aller. España: Mireya Fonseca Leal, 2012.
- Rogers, Richard. *Towards an Urban Renaissance*. London: Urban Task Force, 2002.
- Ruskin, John. *The Seven Lamps of Architecture*. London: Long Mans Green and Co, 1903.
- Santa Ana, Lozada, Perla R. Lucía G., Santa Ana, L. *Del Papel a la Obra: Cimentaciones. Procesos Constructivos y su Representación Gráfica*. CDMX: UNAM, 2020.
- Savater, Fernando. *Ética para Amador*. Madrid: Ariel, 1991.
- Serlio, Sebastiano. *Tercero y Cuarto Libro de Arquitectura*. Trad. Arq. Francisco Villanpando. España: Dirigido a Philipe Principe de España, 1552.
- Smithson, Peter. *Conversations with Students*. New York USA: Princenton Architectural Press, 2005.
- Spazzoli, Adriana. Tiziano, Tiziani. *Daniel Libeskind Interview: Great Architecture for a Great Renaissance*. International Realta MAPE Issue 43. (2013): 4-17
- Stang, Alana. Christopher, Hawthorne. *The Green House: New Directions in Sustainable Architecture*. New York: Princenton Architectural Press, 2005.
- Stewart, James. *Cálculo: conceptos y contextos*. México: International Thompson Editores, 1999.
- Sudjic, Deyan. *Norman Foster A Life In Architecture*. New York: The Overlook Press, Peter Mayer Publishers, Inc., 2010.
- Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de. *Manual de Construcción Geotécnica*. México: SMMS, 2002.
- Tafuri, Manfredo. *Architecture and Utopia*. Londres: The MIT Press, 1976.
- Tschumi, Bernard. *Architettura and Disjuntion*. Cambridge, USA: MIT Press, 1996.

- . *The Manhattan Transcripts*. New York: Academy Group LTD, 1994.
- Tucker, Johnny. *Exclusive interviews with Norman Foster*. *BluePrint* 354 (2017).
- Turk, Amos y Jonathan, Turk y Janet, T. Wittes. *Ecología, Contaminación, Medio Ambiente*. México: Mc Graw Hill, 2004.
- Twombly, Robert. *Louis Kahn Essential Texts*. New York USA: W. W. Norton & Company, 2003.
- Venturi, Robert. *Complexity and Contradiction in Architecture*. New York USA: The Museum of Modern Art, 1977.
- Venturi, Robert. Denise, Scott, Brown. Steven, Izenour. *Learning From Las Vegas*. Massachusetts: The MIT Press, 1988.
- Villagrán, García, José. *Integración del Valor Arquitectónico*. México: Universidad Autonoma Metropolitana Azcapotzalco, 1992.
- . *Teoría de la Arquitectura*. Distrito Federal : Palacio de Bellas Artes, 1964.
- Vitruvio, Polion, Marco. *Los Diez Libros de Arquitectura*. Trad. José Luis Oliver Domingo. Madrid: Alianza Editorial, 1997.
- Von Moss, Stanislaus. *Typology and Design Method. Le Corbusier, Elements of a Synthesis*. Massachusetts: MIT Press, 1979.
- Vyzantiadou, M.A., A. V. Avdelas. S. Zafirooulos. *The application of fractal geometry to the design of grid or reticulated shell structures*. Elsevier. Science Direct. Computer-Aided Design, 2016.
- Williams, Daniel y FAIA. *Sustainable Design: Ecology, Architecture and Planning*. New Jersey USA: John Wiley & Sons, 2007.
- Williams, Kim. Lionel, March, Stephen R. *The Mathematical Works of Leon Battista Alberti*. Italia: Birkhäuser, 2010.
- Williams, Kim. Michael, J. Ostwald. *Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future: Antiquity to the 1500s*. Vol. 1. New York: Springer International Publisher, 2015.
- . *Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future: The 1500s to the Future*. Vol. 2. New York: Springer International Publisher, 2015.
- Zemanski, Sears. *Física Universitaria Volumen 1 & 2*. CDMX: Pearson Educación, 2013.
- Zevi, Bruno. *Saber Ver la Arquitectura*. Trad. Ma. Luisa Martínez Alinari. España: Editorial Poseidón, 1981.

Zumthor, Peter. *Atmósferas*. Barcelona: Gustavo Gili, 2006.

### Sitios Electrónicos

A Journal, For Ideas and Criticism in Architecture. "Oppositions". Winter 1981. Published for the Institute for Architecture and Urban Studies by the MIT Press. 28 Ago. 2021. <[http://web.mit.edu/soa/www/downloads/1980-89/MAeu\\_Opp23\\_Wi1981\\_81.pdf](http://web.mit.edu/soa/www/downloads/1980-89/MAeu_Opp23_Wi1981_81.pdf)>. Pp. 57.

Abc.es. "ABC información: El número áureo, belleza matemática". 10 Oct. 2021. ABC.es. 10 Oct. 2021 <[https://www.abc.es/ciencia/abci-numero-aureo-belleza-matematica-201004150300-14058894848\\_noticia.html](https://www.abc.es/ciencia/abci-numero-aureo-belleza-matematica-201004150300-14058894848_noticia.html)>

Alofsin, Anthony. "Chapter 15. Wright, influence, and the world at large". 2004. American Architectural History : A Contemporary Reader, edited by Keith Eggener, Taylor and Francis. ProQuest Ebook Central. 13 Oct 2020 <<http://ebookcentral.proquest.com/lib/biblitesm/detail.action?docID=200277>>

Arsenal/Museum of Contemporary Architecture. "Bush D., Podyapolsky D., Khomyakov A. Private collection". 1988-89. Utopia Foundation. Moscow. 17 Ago. 2019 <<http://www.utopia.ru/english/item.phtml?id=51&type=graphics&sortby=title&start=0>>

Brooks-Scarpa. "Colorado Court Housing Santa Monica, Ca." 2022. Brooksandscarpa.com. 26 Mar. 2022 <<https://brooksscarpa.com/colorado-court-housing>>

Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. "Peter Eiseman casa XI". Revista de Arquitectura. 218 (1979): 34-36. Encontrada en el recurso <<https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1977-1980/docs/revista-articulos/revista-arquitectura-1979-n218-pag34-36.pdf>>

CNN. "Impresionante video muestra a ingenieros construir un edificio en menos de 29 hrs.". 17 Jun. 2021 <<https://cnnespanol.cnn.com/video/construyen-edificio-29-horas-china-changsha-perspectivas-mexico/>>

David Langdon. "AD Classics: V&A Spiral Daniel Libeskind Cecil Balmond" 29 Jun 2015. ArchDaily. 18 Ago 2021. <<https://www.archdaily.com/768565/ad-classics-v-and-a-spiral-daniel-libeskind-plus-cecil-balmond>>

Dueñas, Magdalena. "Clásicos de la arquitectura: Cementerio de San Cataldo | Aldo Rossi". 01 Feb. 2011. Archdaily.mx. 15 Feb. 2021 <

[https://www.archdaily.mx/mx/02-71078/clasicos-de-la-arquitectura-cementerio-de-san-cataldo-aldo-roso?ad\\_source=search&ad\\_medium=projects\\_tab&ad\\_source=search&ad\\_medium=search\\_result\\_all](https://www.archdaily.mx/mx/02-71078/clasicos-de-la-arquitectura-cementerio-de-san-cataldo-aldo-roso?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all)>

DW Documental. “100 años de Bauhaus: El código”. 2019. [Youtube.com](https://www.youtube.com). 2 Oct 2021

<<https://youtu.be/3TFmr6y8lcM>>

—. DW Documental. “100 años de Bauhaus: El efecto”. 2019. [Youtube.com](https://www.youtube.com). 2 Oct 2021

<<https://youtu.be/jGaOnSqN4gs>>

—. DW Documental. “100 años de Bauhaus: La utopía”. 2019. [Youtube.com](https://www.youtube.com). 2 Oct 2021

<<https://youtu.be/9WVOG9Kav5c>>

Eisenman, Peter. “A Reply to Jacques Derrida”. *The Journal of the Society of Architectural Historians*. Assemblage, No. 12 (aug., 1990), p. 14-17. 03 Abr. 2020.

<<http://www.jstor.org/stable/3171114>>

Eisenman, Peter. “Casa XI”. No. 218. May-Jun 1979. [Revista arquitectura 100 años. COAM.org](https://www.coam.org). 28 Feb. 2022

<<https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1977-1980/docs/revista-articulos/revista-arquitectura-1979-n218-pag34-36.pdf>>. Pp. 34-36

Eisenman, Peter. “Digital Scrambler: From Index to Codex.” *Perspecta*, vol. 35, 2004, pp.

40–53, <<http://www.jstor.org/stable/1567341>>. Accessed 21 Apr. 2022.

Euclides. “Postulados Libro I”. Jun. 1997. [Copyright Applet. D. E. Joyce. Clark University](https://www.euclides.org).

20 Mar. 2021

<[https://web.archive.org/web/20120420125059/http://www.euclides.org/menu/elements\\_esp/indiceeuclides.htm](https://web.archive.org/web/20120420125059/http://www.euclides.org/menu/elements_esp/indiceeuclides.htm)>

Fernández, Fernando. “Sobre una escalera de Luis Barragán”. 9 Oct. 2015. [Blogspot.com](https://www.blogspot.com).

28 Ago. 2021 <[oralapluma.blogspot.com/2015/10/sobre-una-escalera-de-luis-barragan.html?m=1](https://oralapluma.blogspot.com/2015/10/sobre-una-escalera-de-luis-barragan.html?m=1)>

Fundación Juan March. “Alvar Alto | Luis Fernández-Galiano”. 19 Jul. 2020. [Youtube](https://www.youtube.com). 30

Ago. 2020 <<https://www.youtube.com/watch?v=hnQ5dLObhBY>>

—. Fundación Juan March. “El Guggenheim de Bilbao: arquitectura y espectáculo | Luis

Fernández-Galiano”. 8 Jun. 2016. [Youtube](https://www.youtube.com). 11 Mar. 2021

<<https://www.youtube.com/watch?v=rBLnqIbdWDk&t=1834s>>

- . Fundación Juan March. “El tiempo de la Bauhaus | Luis Fernández-Galiano”. 2 Abr. 2014. YouTube.com. 29 Ago. 2021. <<https://youtu.be/S92NQDmA2Ds>>
- .Fundación Juan March. “Le Corbusier | Luis Fernández-Galiano”. 16 Mar. 2010. Youtube.com. 26 Feb. 2021 <<https://youtu.be/YO6b57PBkm0>>
- . Fundación Juan March. “Mies van der Rohe | Luis Fernández-Galiano.”. 25 Jul. 2020 YouTube. 22 Jul. 2021 <<https://www.youtube.com/watch?v=6QyXtzj13K4>>
- . Fundación Juan March. “Norman Foster | Luis Fernández-Galiano”. 18 Oct. 2011. Youtube. 30 Ene 2021. <<https://youtu.be/K5C2kJkBRMU>>
- Gómez, Giménez, José Manuel. “Arquitectura Fractal: una nueva geometría y sus consecuencias”. 12 Ene. 2019 <http://www2.caminos.upm.es>. 26 Mar. 2021 <<http://www2.caminos.upm.es/Departamentos/matematicas/Fdistancia/PIE/Chip%20geom%C3%A9trico/Arquitectura%20Fractal.pdf>>
- Hays, K. Michael. Eliot, Noyes. Erika, Naginski. Antoine, Picon. 2019. edX. HarvardX. Architectural Imagination. 19 Nov. 2022. <<https://www.edx.org/es/course/the-architectural-imagination>>
- . Antoine. “Lecture 5.1 Exhibitions, Iron, and the New Construction”
  - . “Lecture 5.2 The Project”
  - . “Lecture 5.3 Joseph Paxton”
  - . “Lecture 5.4 The Building”
  - . “Lecture 5.5 The Exhibition”
  - . “Lecture 5.6 The Aftermath”
- . Hays. “Lecture 1.1 Aesthetic Perception”
  - . “Lecture 1.2 Wittkower’s Palladian Diagram”
  - . “Lecture 1.3 Typology”
  - . “Lecture 1.4 Perspective”
  - . “Lecture 1.4 Perspective”
  - . Peter, Sealy. “Supplementary Lecture 1.a Perspective: A Brief Overview”
  - . “Lecture 1.5 The Ideal City”
  - . “Lecture 2 Reading Architecture: Column and Wall”
- . Erika. “Lecture 2.1 Wittkower’s Theory of Architecture”
  - . “Lecture 2.2 Wittkower and Alberti”
  - . “Lecture 2.3 Tempio Malatestiano”

- “Lecture 2.4 Santa Maria Novella”
- “Lecture 2.5 San Sebastiano & Sant’ Andrea”
- “Lecture 8.1 Ledoux’s Utopian City of Chaux”
- “Lecture 8.2 Representing Utopia: More and Vitruvius”
- “Lecture 8.3 Filarete’s Sforzinda”
- “Lecture 8.4 Boullée’s Architecture Parlante”
- “Lecture 8.5 The Production of the Sublime: Cenotaph to Newton”
- Hays. “Lecture 3.1 Hegel’s History”
  - “Lecture 3.2 Hegel’s Spirit”
  - “Lecture 3.3 Symbolic Architecture”
  - “Lecture 3.4 Romantic Architecture”
  - “Lecture 3.5 Classical Architecture”
  - “Lecture 3.6 The end of Art”
  - “Lecture 4 Aldo Rossi and Typology”
    - “Lecture 4.1 That is Architecture”
    - “Lecture 4.2 The Cuneo Monument”
    - “Lecture 4.3 The Architectural Type”
    - “Lecture 4.4 Anteriority and the Analogous City”
    - “Lecture 4.5 Architecture after Architecture”
  - “Lecture 5 The Crystal Palace: Infrastructure and Detail”
  - “Lecture 6 The Dialectics of Glass and Steel”
    - “Lecture 6.1 From Stone to Steel”
    - “Lecture 6.2 Behrens’s Theory”
    - “Lecture 6.3 The AEG Factory”
    - “Lecture 6.4 The Fagus Factory”
    - “Lecture 6.5 The Seagram Building”
  - “Lecture 7 Technology Tamed: Le Corbusier’s Machines for Living”
    - “Lecture 7.1 The Dom-ino”
    - “Lecture 7.2 Villa La Roche - Jeanneret”

- . “Lecture 7.3 Villa Garches”
- . “Lecture 7.4 The Five Points of a New Architecture”
- . “Lecture 7.5 Villa Savoye”
- . “Lecture 9 The Pompidou Center in the City of Paris”
- . “Lecture 9.1 Introduction”
- . “Lecture 9.2 Plateau Beaubourg and the Events of May ‘68”
- . “Lecture 9.3 The Project”
- . “Lecture 9.4 Braudillar’s Periodization”
- . “Lecture 9.5 Beaubourg as Simulation”
- . “Lecture 9.6 Conclusion”
- . “Lecture 10.1 Introduction”
- . “Lecture 10.2 Site and Project”
- . “Lecture 10.3 The Bitburg Controversy”
- . “Lecture 10.4 Modes of Abstraction”
- . “Lecture 10.5 Forms of the Sign”
- . “Lecture 10.6 Conclusion”

Heatherwick, Thomas. “Entrevista a Thomas Heatherwick, México: Para el 13° congreso Arquine”. 2012. [YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=zpQRIVRwSBI). 10 Ago. 2021 <<https://www.youtube.com/watch?v=zpQRIVRwSBI>>

History, LifeTime y A&E. “*La Gran Historia S1-E5*”. 9 Mar. 2020. [History Chanel](https://www.historyplay.tv/mx/player/serie/episodios-de-acceso-libre-h/la-gran-historia-s1-e5_pibxt4?previousSection=/mx/). 15 Mar. 2020. <[https://www.historyplay.tv/mx/player/serie/episodios-de-acceso-libre-h/la-gran-historia-s1-e5\\_pibxt4?previousSection=/mx/](https://www.historyplay.tv/mx/player/serie/episodios-de-acceso-libre-h/la-gran-historia-s1-e5_pibxt4?previousSection=/mx/)>

IBERO. [Arquitectura](https://tec.mx/es/estudios-creativos/arquitecto). <<https://tec.mx/es/estudios-creativos/arquitecto>>, <<https://ibero.mx/sites/default/files/05-arquitectura.pdf>>, 30 Nov. 2020.

IPN. [Ingeniero Arquitecto](https://www.ipn.mx/assets/files/ofertaEducativa/mapa-curricular/superior/escolarizado/ing-arquitecto.pdf). <<https://www.ipn.mx/assets/files/ofertaEducativa/mapa-curricular/superior/escolarizado/ing-arquitecto.pdf>>, 30 Nov. 2020

Le, Corbusier y Lluís, Sert Josep. «Carta de Atenas.» 18 de 02 de 2020. Carta. 23 de 02 de 2020. <<http://www-etsav.upc.es/personals/monclus/cursos/CartaAtenas.htm>>.

Leys, Jos. “Mathematical Imagery”. 28 Mar. 2018 [Jos Leys](http://www.josleys.com/references.php). 11 mar. 2021 <<http://www.josleys.com/references.php>>

- Lu, Xiaoshu. Derek Clements. Martti Viljanen. “Fractal Geometry and Architecture Design: Case Study Review”. 2012 Chaotic Modeling and Simulation. 11 Mar. 2021 Finland <<https://www.researchgate.net/publication/256059313>>.
- Marc, Treib. *To End a Continent: The Courtyard of the Salk Institute*. Vol. 65. USA: Society of Architectural Historians, sep. 2006. 3 vols. The Journal of the Society of Architectural Historians. 03 de 03 de 2020. <<http://www.jstor.org/stable/25068295>>.
- Mistral, Gabriela. “La lluvia lenta”. 2019. Cultura UNAM. Material de Lectura. Oct. 2019 <<http://www.materialdelectura.unam.mx/index.php/poesia-moderna/16-poesia-moderna-cat/144-065-gabriela-mistral?start=11>>
- MIT. Architecture. <[https://architecture.mit.edu/handbook/undergraduate-students#Bachelor-of-Science-in-Architecture-\(BSA\)](https://architecture.mit.edu/handbook/undergraduate-students#Bachelor-of-Science-in-Architecture-(BSA))>, 30 Nov. 2020.
- Moisset, Inés. “Fractales y arquitectura”. 13 Abr. 2016. Blog de Wordpress.com. 20 May. 2020 <<https://inesmoisset.com/2016/04/13/fractales-y-arquitectura/>>
- MoMa. “Alexander Khomyakov Russian, born 1957” 2018. The Museum of Modern Art. 29 Jul. 2019 <<https://www.moma.org/artists/74801> >
- Moreira, Susana. “Los Cinco Puntos de la Arquitectura Moderna y su Reinterpretación en Veinte Proyectos Contemporáneos”. 26 Sep. 2020. Archdaily.mx. 15 Mar. 2021 <<https://www.archdaily.mx/mx/947886/los-5-puntos-de-la-arquitectura-moderna-y-su-reinterpretacion-en-20-proyectos-contemporaneos>>
- Muy Interesante. “¿Cuánto aire respiramos al día?”. 2011. Muy Interesante.es. 27 Ago. 2021 <<https://www.muyinteresante.es/curiosidades/preguntas-respuestas/icuanto-aire-respiramos-al-dia>>
- Ross, Neil. Michael, Schwarz. Bill, Jersey. “Fractals: Hunting the Hidden Dimension”. 2008. PBS Home Video. NOVA. 25 Mar 2019. Recursos: 1.- <<http://www.area-documental.com/player.php?titulo=Fractales%20La%20Caza%20de%20la%20Dimension%20Oculto>> 2.- <[https://www.amazon.com/-/es/Neil-Ross/dp/B09N5NLF3H/ref=sr\\_1\\_1?keywords=fractals+hunting+the+hidden+dimension&qid=1648245206&srefix=Fractals%20Caps%2C183&sr=8-1](https://www.amazon.com/-/es/Neil-Ross/dp/B09N5NLF3H/ref=sr_1_1?keywords=fractals+hunting+the+hidden+dimension&qid=1648245206&srefix=Fractals%20Caps%2C183&sr=8-1)>
- RTVE. “La caja escénica del Teatro Real: La mecánica al servicio de la escena”. 2019. Youtube.com. 26 Mar. 2021 <<https://youtu.be/PlkApNjNPOQ>>
- Smart Planet. “Redes. La Proporción Áurea. Eduard Punset. 1996-2013” 2020. TVE. Redes. Smart Planet. 4 May 2021. <<https://www.rtve.es/play/videos/redes/>>. Soporte: 2021. <[https://youtu.be/d\\_71-uqz\\_ic](https://youtu.be/d_71-uqz_ic)>
- SMIE ESIA Tecamachalco. “Estructuración Arquitectónica | Arq. Benjamin Romano”. 9 Sep. 2020. FaceBook Watch. 10 Sep. 2020 <<https://fb.watch/e7ak-l84er/>>

- Snow, Jessica. “Farnsworth House – An Artist’s Perspective”. 2018. Vimeo 8 Mar. 2021 <<https://vimeo.com/279328526>>
- Steven Holl. “Horizontal Skyscraper – Vanke Center”. Shenzhen, China 2009 Steven Holl Architects. 12 Ene. 2021 <<https://stevenholl.com/projects/vanke-center/>>
- The Open University. “Modernist Architecture: Roots (1920-1929)”. 30. Ago. 2019. The Open University: Open Learn. 08 Feb. 2021 <<https://www.open.edu/openlearn/history-the-arts/history/heritage/modernist-architecture-roots-1920-1929>>
- The Canadian Centre for Architecture. “Digitized Items: casa 11a”. 2020. CCA.QC.CA. 28 Ene. 2020 <<https://www.cca.qc.ca/en/search?digigroup=391314>>
- UNAM. Arquitectura. <<https://arquitectura.unam.mx7plan-de-estudios-arq.html>>, 30 Nov. 2020.
- Vyzantiadou, M.A. Avdelas. Zafiropoulos. “The application of fractal geometry to the design of grid or reticulated shell structures”. 24 Sep. 2016. Elsevier. Science Direct. Computer-Aided Design. 14 Mar 2021 <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
- Wendl, Nora. “Uncompromising Reasons for Going West: A Story of Sex and Real Estate, Reconsidered”. 16 Jul. 2020 MIT Press Journals. 8 Mar. 2021 <[http://www.mitpressjournals.org/doi/pdf/10.1162/thld\\_a\\_00052](http://www.mitpressjournals.org/doi/pdf/10.1162/thld_a_00052)>. Pp. 22

### **Imágenes y muestras analizadas**

- Archdaily. “AD Classics: Fallingwater House / Frank Lloyd Wright”. 2022. Archdaily.com. 27 May. 2022 <<https://www.archdaily.com/60022/ad-classics-fallingwater-frank-lloyd-wright>>
- Archdaily. “Casa del Futuro Baitasi / dot Architects” [Baitasi House of the Future / dot Architects] 06 Mar. 2019. ArchDaily.com. 23 Feb. 2022 <<https://www.archdaily.mx/mx/912734/casa-del-futuro-baitasi-dot-architects>>
- Archdaily. “Clásicos de Arquitectura: Museo Guggenheim Bilbao / Frank Gehry | Escrito por Brian Pagnotta. Traducción: Natalia Yunis”. 25 Mar. 2015. Archdaily.mx. 05 Jun. 2022 <<https://www.archdaily.mx/mx/764294/clasicos-de-arquitectura-museo-guggenheim-bilbao-frank-gehry>>
- Archdaily. “En perspectiva: Felix Candela | Escrito: Begoña Uribe”. 27 Ene. 2017. Archdaily.mx. 12 Jun 2022 <<https://www.archdaily.mx/mx/626588/feliz-cumpleanos-felix-candela>>
- Arkiplus. “La Sagrada Familia”. 2022. Arkiplus. com. 12 Jun. 2022 <<https://www.arkiplus.com/la-sagrada-familia/>>
- Arkiplus. “Templo Malatestiano”. 2022. Arkiplus.com. 2022 <<https://www.arkiplus.com/templo-malatestiano/>>.

Biatch. "Green building swanston street Melbourne" 9 Oct. 2006 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green\\_building\\_swanston\\_street\\_melbourne.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_building_swanston_street_melbourne.jpg)>

Brank Ljuba. "Cathedral Anagni, Italy". 28 Sep. 2014. Wikimedia Commons. 15 Ago. 2020 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anagni\\_katedrala\\_04.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anagni_katedrala_04.JPG)>

Brian Pennington. "Centre Pompidou" 2020. Creativecommons.org. 01 Feb. 2021. <<https://www.flickr.com/photos/byebyeempire/27846345/>> License: <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode>>

Carol M. Highsmith. "Casa Farnsworth | Mies van der Rohe. Plano, Illinois". 2021. Loc.gov. 22 sep. 2021 <<http://www.loc.gov/pictures/item/2011631309/>>

Cca.qc.ca. "House 11<sup>a</sup> | Peter Eisenman. Palo Alto, California. 1978". 2021. Cca.qc.ca. 25 Ago. 2021. <<https://www.cca.qc.ca/en/search?digigroup=391314>>

Christophe, Jean. "Carte generale des environs de la Saline de Chaux. Ledoux, Claude-Nicolas. 1805". 2007. Wikipedia.org. 10 Ago. 2021 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carte\\_g%C3%A9n%C3%A9rale\\_des\\_environs\\_de\\_la\\_Saline\\_de\\_Chaux.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carte_g%C3%A9n%C3%A9rale_des_environs_de_la_Saline_de_Chaux.jpg)>

Commonwealth of Australia. "Ópera de Sidney". 2007. Unesco. 16 Jul. 2021 <<https://whc.unesco.org/es/list/166>>

David Langdon. "AD Classics: V&A Spiral Daniel Libeskind Cecil Balmond" 29 Jun 2015. ArchDaily. 18 Ago 2021. <<https://www.archdaily.com/768565/ad-classics-v-and-a-spiral-daniel-libeskind-plus-cecil-balmond>>

Decorative Treppe. "Entdecken Sie die extravagantesten Designs". 2021. Neue Dekor 24 Feb. 2021 <<https://br.pinterest.com/pin/649010996279930261/>>

Eisenman, Peter. "Aronoff Center for Design and Art. Cincinnati, Ohio 1988-1996" 1996. Eisenman Architects.com 17 Feb. 2021 <<https://eisenmanarchitects.com/Aronoff-Center-for-Design-and-Art-1996>>

—Eiseman, Peter. "Casa III". 2020. Eisenmanarchitects.com. 7 Abr. 2021 <<https://eisenmanarchitects.com/House-III-1971>>

—Eiseman, Peter. "IBA Social Housing. Berlin. 1985". 2021. Eisemanarchitects.com. 20 Ago. 2021 <<https://eisenmanarchitects.com/IBA-Social-Housing-1985>>

—Eisenman, Peter. "Wexner Center for the Visual Arts and Fine Arts Library". 2022. Eisenmanarchitects.com. 25 May. 2022 <<https://eisenmanarchitects.com/Wexner-Center-for-the-Visual-Arts-and-Fine-Arts-Library-1989>>

"El Palais Garnier". 14 May. 2008. Commons Wikimedia. 7 Mar. 2021 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Beaux\\_Arts\\_\(arquitectura\)#/media/Archivo:Palais\\_Garnier.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Beaux_Arts_(arquitectura)#/media/Archivo:Palais_Garnier.jpg)>

El Universal. “Cuando las gasolineras eran una obra de arte”. 14 Nov. 2018. [eluniversal.com.mx](http://eluniversal.com.mx).

18 Sep. 2022 <<https://www.eluniversal.com.mx/cuando-las-gasolineras-eran-una-obra-de-arte>>

Étienne-Louis Boullée. “Cénotaphe à Newton”. 2021. Commons Wikimedia. 13 Ago. 2021 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton\\_memorial\\_boullee.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton_memorial_boullee.jpg)>

Flores es Arquitectura y Arte. “Museo Santa María Novela”. 2021. [Flores.es](http://www.flores.es). 19 Jun 2021 <<http://www.flores.es/arquitectura-y-arte/los-museos/museos-municipales/museo-santa-maria-novella>>

Foster, Norman. “Projects Reichstag: New German Parliament”. 1999. Foster and Partners.com. 17 Feb. 2021 <<https://www.fosterandpartners.com/projects/reichstag-new-german-parliament/#gallery>>

Frank Lloyd Wright “Casa Robie”. 1909. Wikiarquitectura. 03 Feb. 2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/casa-robie/>>

Frank Lloyd Wright “Palmer House. ‘Gallery’”. 2009. FLW Palmer House LLC. 15 Mar. 2021 <<http://flwpalmerhouse.com/gallery.php>>

Frank Lloyd Wright Building Conservancy. Palmer House Structure. 3 Jul. 2013. [SaveWright.org](http://www.savewright.org). 20 Mar. 2021 <<http://wrightchat.savewright.org/viewtopic.php?t=7158>>

Fundación Juan March. “El Guggenheim de Bilbao: Arquitectura y espectáculo | Luis Fernández-Galiano”. 8 Jun 2016. YouTube. 2022 <<https://www.youtube.com/watch?v=rBLnqlbdWDk>>. Imagen: ‘Capilla de Notre-Dame-du-Haut de Ronchamp’. Min. (7:45).

Fundació mies van der rohe Barcelona. 2020 “Barcelona Pavilion”. 22 Nov. 2020 <<https://miesbcn.com/>>

González, Enric. “El pasado turbulento de San Pedro”. 22 Ago. 2007. Reportaje, Basílica de San Pedro. 09 Feb. 2020 <[https://elpais.com/diario/2007/08/22/revistaverano/1187733601\\_850215.html](https://elpais.com/diario/2007/08/22/revistaverano/1187733601_850215.html)>

Guggenheim, Bilbao. “El Museo Guggenheim de Bilbao: El Edificio”. 1997. [Guggenheim-Bilbao.eus](http://www.guggenheim-bilbao.eus). 5 Feb. 2019 <<https://www.guggenheim-bilbao.eus/el-edificio>>

Harvard Fine Arts. “Interior, view of nave looking towards the altar; San Lorenzo. Interior, Florence, Tuscany, Italy”. 2020. by Unknown, Harvard Fine Arts Library, Special Collection. 24 Oct. 2020 <<http://id.lib.harvard.edu/via/olvsite38552/urn-3:FHCL:579249/catalog>>

—Harvard Fine Arts. “Exterior, turbine house; AEG Turbine Factory, AEG, Berlin (Tiergarten), Germany”. 2022. By Unknown, Harvard Fine Arts Library, Special Collections. 12 Ene. 2022 <<http://id.lib.harvard.edu/via/olvsite10712/urn-3:FHCL:925511/catalog>>. ‘Karaibische Hütte from Der Stil in den Technischen und

- Tektonischen Künsten; oder, Praktische Aesthetik, vol. 2, p. 263' by Gottfried Semper. <https://archive.org/stream/derstilindentech02sempuoft#page/262/mode/2up>
- Horst, Frank. "Espectro electromagnético". 16 Mar. 2017. WikimediaCommons. 30 Mar. 2021 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum-es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg)>
- Jakeukalane. "The Fractal City of Ehlvorpattiv Pong. No.12" 7 May. 2016. Deviant Art. 2 Feb. 2020 <<https://www.deviantart.com/jakeukalane/art/The-Fractal-City-of-Ehlvorpattiv-Pong-12-605626503>>
- Legorreta. "Proyecto Catedral de Managua" 1993. Legorreta.mx. 11 Ene. 2019 <<https://www.legorreta.mx/es/proyecto-catedral-de-managua#pid=5>>
- Leys, Jos. "Mathematical Imagery". 28 Mar. 2018 Jos Leys. 11 mar. 2021 <<http://www.josleys.com/references.php>>
- Libeskind, David. "World Trade Center Master Plan. New York. EUA". 2003. Studio Libeskind. 07 ago. 2021 <<https://libeskind.com/work/ground-zero-master-plan/>>
- Mandelbrot, Mandala. "Fractal de Mandelbrot". 20 Jun. 2012. WordPress.com. 15 Sep. 2020 <<https://ordinarycreativity.wordpress.com/2012/06/20/mandelbrot-mandala/>>.
- Mies van der Rohe. "El Pabellón de Barcelona". 01 Jun. 2016. Fundación Mies van der Rohe Barcelona 15 Ene. 2021 <<http://miesbcn.com/the-pavilion/>>
- Mies van der Rohe. "Minerals and Metals Building". 1943. Plan of Illinois Institute of Technology. 14 Ene. 2021. <<https://arch.iit.edu/about/minerals-and-metals-building>>
- Pinterest. "Escalera de la casa de Tacubaya de Barragán". 24 Feb. 2021. Pinterest.com. 24 Feb. 2021 <<https://www.pinterest.com.mx/pin/487373990919934371/>>
- Robles, Beatriz. "Alimentos irradiados" 8 Ago. 2017. BeatrizRobles.com. 30 Mar. 2021 <<https://beatrizrobles.com/irradiacion/>>
- Scarpa. Brooks. "Ministry of Environment Water Agriculture". 2010. Brooks + Scarpa. Architecture Landscape Urban Design. 1 Jul 2021 <<https://brooksscarpa.com/ministry-of-environment-water-agriculture>>
- Sharon. "The Opera the Paris six reasons to visit" 2016. Exploringworld.com. 22 Nov 2020 <<https://exploringrworld.com/opera-de-paris-six-reasons-visit/>>
- Steven Holl. "Horizontal Skyscraper – Vanke Center". Shenzhen, China 2009 Steven Holl Architects. 12 Ene. 2021 <<https://stevenholl.com/projects/vanke-center?>>
- The Economist. "Wooden Skyscrapers Could be the Future of Cities". 1 Feb. 2018. Youtube.com.The Economist. 12 Mar. 2020 <[youtube.com/watch?v=2DPp2NcnTb0](https://youtube.com/watch?v=2DPp2NcnTb0)>
- Urbipedia. "Baker House | Alvar Alto". 2022. Urbipedia.org. 22 May. 2022 <[https://www.urbipedia.org/hoja/Baker\\_House](https://www.urbipedia.org/hoja/Baker_House)>
- Valueyou. "The Villa Savoye in Poissy". 2021. Wikipedia.org. 05 Feb. 2021 <<https://en.wikipedia.org/wiki/File:VillaSavoye.jpg>>. 'Exterior, general view; Robie House,

Chicago, Illinois, United States' by Unknown.  
<<http://id.lib.harvard.edu/via/olvsite16974/urn-3:FHCL:1137830/catalog>>

Veritasium. “This equation will change how you see the world (the logistic map)”. 10 Abr. 2020. YouTube. 01 Abr. 2021 <<https://youtu.be/ovJcsL7vyrk>>

Vox. “What it’s like to work in the world’s greatest office”. 2022. youtube.com. 10 Sep. 2022 <<https://youtu.be/yb-kYt1lpnI>>

Wikiarquitectura. “Catedral de Santiago de Compostela” 2022. Wikizarquitectura.com. 06 May. 2022 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/catedral-de-santiago-de-compostela/>>

—. Wikiarquitectura. “Chandigarh – Palacio de la Asamblea | Le Corbusier”. 2022. wikiarquitectura.com. 24 May. 2022 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/chandigarh-palacio-de-la-asamblea/>>

—. Wikiarquitectura. “Crystal Palace | Joseph Paxton. 1851”. 2021. Es.wikiarquitectura.com. 18 Ago. 2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/Crystal-Palace/>>

—. Wikiarquitectura. “Gran Palacio de Bellas de las Artes. Arquitectos: Albert Louvet, Albert Thomas, Charles Girault, Henri Deglane. 1900. Paris”. 2021. Es.wiki.arquitectura.com. 04 Abr. 2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/gran-palacio-de-las-bellas-artes/>>

—. Wikiarquitectura. “Edificio Seagram. Arquitecto: Ludwig Mies van der Rohe & Philip Johnson. 1958. New York”. 2021. es.wikiarquitectura.com. 4 Abr. 2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/edificio-seagram/>>

—. Wikiarquitectura. “Panteón de Agripa | Arq. Apolodoro de Damasco”. 2022. Wikiarquitectura.com. 5 May. 2022 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/panteon-de-agripa/>>

—. Wikiarquitectura. “San Carlo alle Quattro Fontane. Arquitecto: Francesco Borromini. 1682. Roma”. 2022. Wikiarquitectura.com. 25 May 2022 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/san-carlo-alle-quattro-fontane/>>

—. Wikiarquitectura. “Santa María del Fiore | Arq. Filippo, Brunelleschi. di Bondone, Pisano. Di Cambio”. 2022. Wikiarquitectura.com. 5 may. 2022 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/santa-maria-del-fiore/>>

Wikipedia. “Basílica de San Andrés”. 2022. Wikipedia.org. 2022 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Basílica\\_de\\_San\\_Andrés\\_\(Mantua\)#/media/Archivo:Sant\\_Andrea\\_straight.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Basílica_de_San_Andrés_(Mantua)#/media/Archivo:Sant_Andrea_straight.jpg)>

—. Wikipedia. “Basílica de Santa María Novella”. 2022. Wikipedia.org. 2022 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Basílica\\_de\\_Santa\\_María\\_Novella#/media/Archivo:Santa\\_Maria\\_Novella\\_\(Florence\).jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Basílica_de_Santa_María_Novella#/media/Archivo:Santa_Maria_Novella_(Florence).jpg)>

—. Wikipedia. “Fachada Poniente: Edificio el Capricho. 1885. Antoni Gaudí”. 10 Ago. 2011. Wikipedia.org. 2 Feb. 2019

- <[https://es.wikipedia.org/wiki/El\\_Capricho\\_\(Gaud%C3%AD\)#/media/Archivo:Capricho\\_gaudi\\_201108.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/El_Capricho_(Gaud%C3%AD)#/media/Archivo:Capricho_gaudi_201108.jpg)>
- .Wikipedia. “House of Directors at the Saline Royale d'Arc et Senans, France. 1806”. 1 Jun. 2007 by Süssbrich, Rolf. Wikimedia.org. 30 Ene. 2021 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Salina\\_Real\\_de\\_Arc-et-Senans#/media/Archivo:France\\_arc\\_et\\_senas\\_saline\\_royal\\_main\\_building\\_1.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Salina_Real_de_Arc-et-Senans#/media/Archivo:France_arc_et_senas_saline_royal_main_building_1.jpg)>
  - .Wikipedia. “Iglesia de San Sebastián – Mantua”. 2022. Wikipedia.org. 2022 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Iglesia\\_de\\_San\\_Sebastián\\_\(Mantua\)#/media/Archivo:Mantova,\\_san\\_sebastiano,\\_esterno\\_04.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Iglesia_de_San_Sebastián_(Mantua)#/media/Archivo:Mantova,_san_sebastiano,_esterno_04.jpg)>
  - .Wikipedia. “Órdenes clásicos”. 2021. Es.wikipedia.org. 7. May. 2021 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Órdenes\\_clásicos](https://es.wikipedia.org/wiki/Órdenes_clásicos)>
  - .Wikipedia. “Partenón”. 2021. Commons. 2 Feb. 2021 <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ce/2006\\_01\\_21\\_Ath%C3%A8nes\\_Parth%C3%A9non.JPG/1200px-2006\\_01\\_21\\_Ath%C3%A8nes\\_Parth%C3%A9non.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ce/2006_01_21_Ath%C3%A8nes_Parth%C3%A9non.JPG/1200px-2006_01_21_Ath%C3%A8nes_Parth%C3%A9non.JPG)>
  - .Wikipedia. “Planta del Partenón | Autor: Argento”. 29 Abr. 2006. Wikipedia.org. 03 May. 2022 <<https://es.wikipedia.org/wiki/Parten%C3%B3n#/media/Archivo:Parthenon-top-view.svg>>
  - .Wikipedia. “San Carlo alle Quattro Fontane (Rome) – Dome | Arq. Francesco Castelli”. 2022. Wikimedia.org. 07 Mar 2022 <[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:San\\_Carlo\\_alle\\_Quattro\\_Fontane\\_\(Rome\)\\_-\\_Dome\\_HDR.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:San_Carlo_alle_Quattro_Fontane_(Rome)_-_Dome_HDR.jpg)>
  - .Wikipedia. “Villa Gazzotti in Bertesina | Andrea Palladio” 2022. publicado por Bertotti Scamozzi. 02 Feb. 2022 <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Villa\\_Gazzotti\\_pianta\\_Bertotti\\_Scamozzi\\_1778.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Villa_Gazzotti_pianta_Bertotti_Scamozzi_1778.jpg)>
  - .Wikipedia. “Vista occidental (Plaza de la Virgen): Puerta de los Apóstoles, cimborrio y Obra Nova | Fotografía: Diego Delso”. 30 Jun. 2014. Wikipedia.org. 25 May. 2022 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Catedral\\_de\\_Santa\\_Mar%C3%ADa\\_de\\_Valencia#/media/Archivo:Catedral\\_de\\_Valencia,\\_Valencia,\\_Espa%C3%B1a,\\_2014-06-30,\\_DD\\_160.JPG](https://es.wikipedia.org/wiki/Catedral_de_Santa_Mar%C3%ADa_de_Valencia#/media/Archivo:Catedral_de_Valencia,_Valencia,_Espa%C3%B1a,_2014-06-30,_DD_160.JPG)>
  - .Wikipedia. “Vista oriental (plaza de la Limosna): puerta de la Almoina y cimborrio | Fotografía: Felivet” 4 May. 2008. Wikipedia.org. 25 May. 2022 <[https://es.wikipedia.org/wiki/Catedral\\_de\\_Santa\\_Mar%C3%ADa\\_de\\_Valencia#/media/Archivo:Almoina\\_cimborri.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Catedral_de_Santa_Mar%C3%ADa_de_Valencia#/media/Archivo:Almoina_cimborri.jpg)>
- Wordpress. “espacio arquitectónico en México”. 2021. Wordpress.com. 19 Sep 2021 <<https://espacioarquitectonicoenmexico.wordpress.com/palacio-de-mineria/>>

Wordpress. “Original Drawings, Aldo Rossi Monument of the Resistance in Cuneo, 1962 (unbuilt)” 2017. Wordpress.com. 09 Jun 2021 <[https://speculativecities.wordpress.com/2017/09/15/the-concept-of-type\\_-rossis-monument-of-the-resistance-in-cuneo/](https://speculativecities.wordpress.com/2017/09/15/the-concept-of-type_-rossis-monument-of-the-resistance-in-cuneo/)>.

Wright, Lloyd, Frank. “The Palmer House. 1950”. 2021. Frank Lloyd Wright Foundation. 18 Ago. 2021 <<https://franklloydwright.org/site/palmer-house/>>

Zaha, Hadid Architects. “Lois & Richard Rosenthal Center for Contemporary Art”. 2003. Zaha-hadid.com. 18 Jul. 2019 < <https://www.zaha-hadid.com/architecture/lois-richard-rosenthal-center-for-contemporary-art/>>

## Apéndice

**Introducción.** En esta sección se realizan prácticas, en donde se utilizan las técnicas vistas de la arquitectura fractal – *ingeniería arquitectónica para diseños fractales* –. Además también se hace uso de los paneles, para construir diagramas arquitectónicos fractales. También se trabaja en algunos aspectos de concepto, que surgieron a raíz, de estudiar las consecuencias del uso de la geometría fractal en la arquitectura.

**Figuras en los Acabados.** Con geometría fractal, se puede cubrir un área ya sea de piso, pared o techo utilizando figuras hechas por auto similitud, un trabajo artesanal es el de adaptar alguna materia prima manufacturada, por ejemplo el piso laminado que ya tiene una forma estándar definida de fábrica. Se puede adaptar a formas variadas, por decir algo; a partir de una lámina cuadrada o rectangular; hay que hacer cortes para obtener por ejemplo un pentágono. Y de acuerdo a las posibilidades, crear pentágonos regulares que tengan auto similitud con el primer pentágono, pero que cada vez sean más pequeños: es un trabajo que de no tener la técnica de la geometría fractal, se vuelve artesanal, es decir se realiza a base de prueba y ensayo. Pero al aplicar el método de los paneles de dimensión fractal, se tiene un marco de referencia junto con los sistemas de medidas, para estandarizar los cortes.

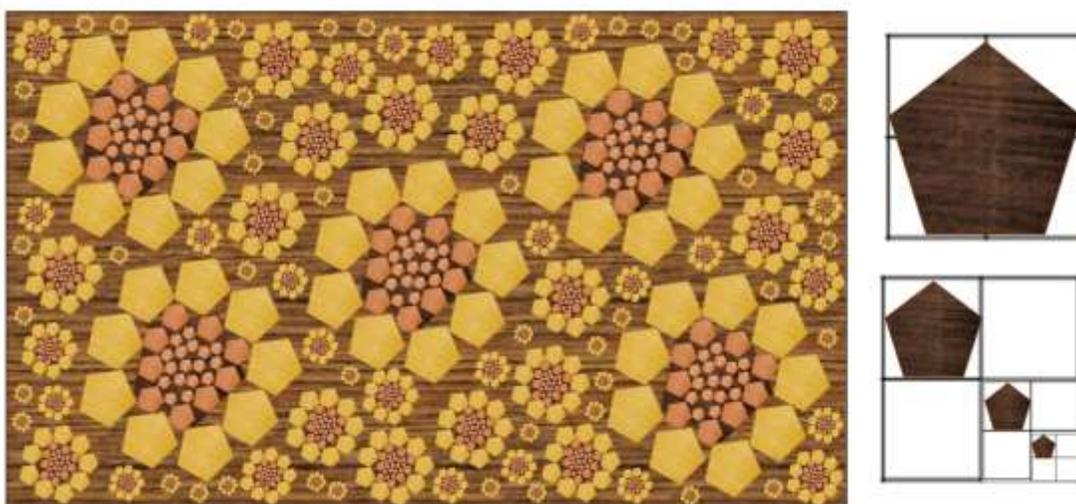


Fig. 98. “Espacio plano y formas con pentágonos”. Fuente: elaboración propia.

La utilización de retículas de dimensión fractal, se utiliza para diseñar utilizando el espacio multidimensional. El cual se distingue del espacio fraccionario, debido a que en realidad al utilizar iteraciones, cada elemento es independiente y único. Al comparar ambos espacios, se mencionó que se distinguen uno de otro en qué; el espacio fraccionario, se modela a partir de

una figura final que se fracciona; mientras que el espacio multidimensional, a partir de iteraciones se va buscando la forma final.

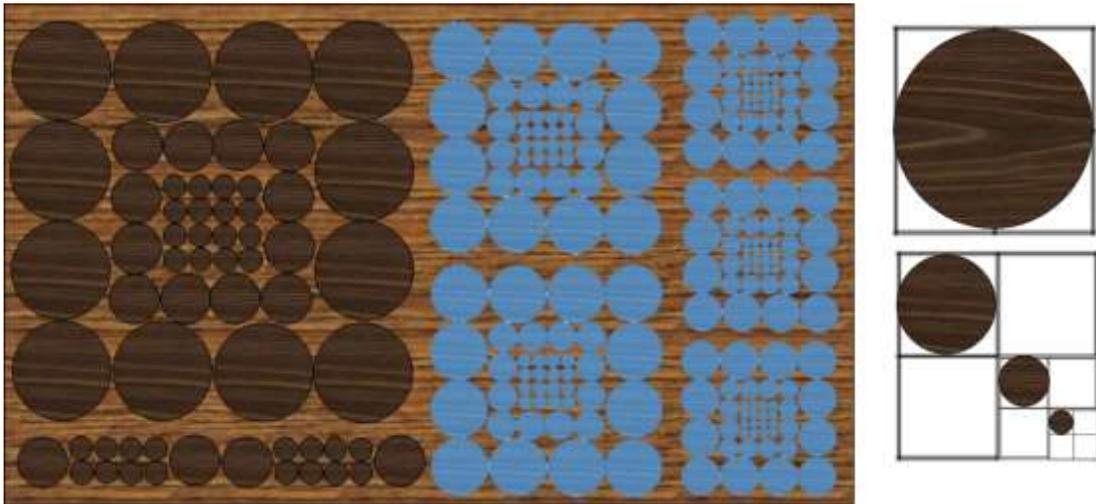


Fig. 99. “Espacio plano y formas con círculos”. Fuente: elaboración propia.

En este tipo de construcciones, con metodologías de sistemas de calidad, como la metodología de las 5's:<sup>236</sup> se mejoran aspectos de clasificación, orden y estandarización entre otros.

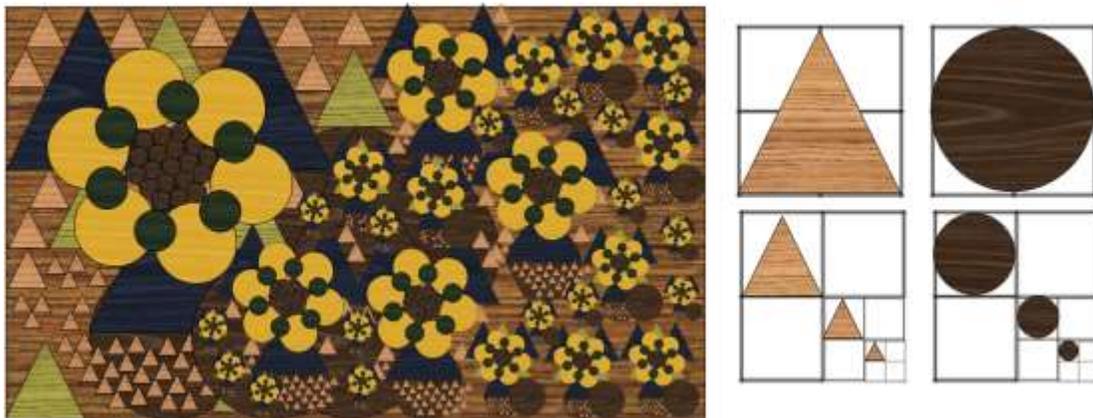


Fig. 100. “Espacio plano y formas compuestas”. Fuente: elaboración propia.

Debido a que a manera de plantillas, se pueden crear infinidad de patrones geométricos fractales, e ir de la composición de diagramas arquitectónicos con geometría clásica hasta la utilización de la geometría fractal de formas caóticas o complejas. Se hace notar que las retículas son la base para los métodos de dibujo por píxeles, utilizados en computación y con las aplicaciones de inteligencia artificial, donde con instrucciones geométricas y a base de puntos gráficos el programa de computadora interpreta una imagen y la pasa en dibujo. A pesar de que hay infinidad de formas que son posibles de crear en la geometría arquitectónica, el proceso de diseño en la arquitectura se observó

<sup>236</sup> Masaaki Imai crea el Kaizen Institute. Fundado en la filosofía Kaizen, que significa mejora continua. Se le atribuye también el método de las 5s iniciada en Toyota en los años 60s.

debe estar apegado a la dimensión humana. La importancia de esto va muy de la mano con lo que argumento Rem Koolhaas, de manera simbólica, respecto a uno de los elementos arquitectónicos.<sup>237</sup> Para esto la estandarización de una forma en el aspecto físico, se logra con ingeniería y ayuda de la física, aunque hay muchas formas difíciles. Estas formas difíciles, se descubren por su complejidad, al intentar localizar el centro de gravedad.<sup>238</sup>

En el caso de una figura geométrica homogénea, esta tiene su centro de gravedad, en su centro geométrico. El centro geométrico del ser humano, por ejemplo, se conoce como su centro de masa<sup>239</sup> entre el ombligo y el vientre. Sears menciona que “si un objeto es homogéneo tiene un centro geométrico, es ahí donde se localiza el centro de masa... Si un objeto tiene un eje de simetría, el centro de masa estará sobre este”, sin embargo las condiciones de equilibrio dictan que “la suma de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo debe de ser cero y la suma de las torcas externas debe ser cero”.<sup>240</sup>

***Creación de un diagrama arquitectónico fractal.*** Para crear el diagrama arquitectónico de la práctica, se propone de manera imaginaria utilizar un material nuevo. El material escogido es la fibra de carbono y se utiliza de material de construcción, junto con el acero el vidrio y el concreto. Primero se compara, con otros materiales, según los valores de su resistencia.<sup>241</sup>

$$\text{Acero} \approx 2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$$

$$\text{Fibra de carbono } 390 \text{ GPa} \approx 390 \times 10^9 \approx 3.9 \times 10^{11} \text{Pa}$$

$$\text{Aluminio} \approx 7.0 \times 10^{10} \text{Pa}$$

---

<sup>237</sup> “Koolhaas turns the scheme for a prison into a voluntary, desired habitat by a radical mirror inversion of significance and attraction. He proclaims that ‘division, isolation, inequality, aggression, destruction’, all the negative aspects of the Wall, could be the ingredients of a new phenomenon: architectural warfare against undesirable conditions,...” (Böck 33-34)

“Koolhaas cambia el esquema de una prisión, en un hábitat voluntario y deseado por medio de una inversión radical de espejo de significado y atracción. Proclama que ‘la división, el aislamiento, la desigualdad, la agresión, la destrucción’, todos aspectos negativos del ‘muro’, podrían ser los ingredientes de un nuevo fenómeno: la guerra arquitectónica contra condiciones indeseables,...” (Trad. Propia).

<sup>238</sup> (Zemanski Vol. I (345-347))

<sup>239</sup> (Zemanski Vol. I (258-259)) figura 8.28

<sup>240</sup> (Ídem 348-350)

<sup>241</sup> (Zemanski 352-353)

Luego se observa una técnica de ensamblaje, utilizada para unir materiales de diferente clase. En este caso los edificios de madera, que para su ensamblado se utilizan elementos como el acero, aun cuando hay maderas laminadas muy resistentes.<sup>242</sup>



Fig. 101. ‘Acero para ensamblar madera’. Fuente: Elaboración propia con imágenes (The Economist)

En la figura anterior, se señala el diseño arquitectónico, de un rascacielos de madera de 300m. La viga grande con orificios y la viga pequeña, representan el ensamble de madera con acero. En el caso de la práctica se propone usar elementos de fibra de carbono.



Fig. 102. ‘Estructuras propuestas con fibra de carbono’. Fuente: Elaboración propia.

- 1.- Estructuras tubulares armadas con nodos de acero.
- 2.- Elementos arquitectónicos ya sean domos, cúpulas, bóvedas y techos con estructuras a base de acero, utilizado como elemento tectónico.

<sup>242</sup> The Economist. “Wooden Skyscrapers Could be the Future of Cities”. 1 Feb. 2018. [Youtube.com.The Economist](https://www.youtube.com/watch?v=2DPp2NcnTb0). 12 Mar. 2020 <[youtube.com/watch?v=2DPp2NcnTb0](https://www.youtube.com/watch?v=2DPp2NcnTb0)>. “debido a que la madera no es tan maleable como el concreto y el acero, ni tan resistente. La ingeniería creo la madera laminada cruzada CLT “Cross-Laminated Timber”. ‘London architects Waugh Thistleton’ ya diseñan estos edificios” (The Economist).

3.-Varilla de fibra de carbón anclada en acero, es decir la varilla de acero se reviste de fibra de carbono, sirviendo como aislante incluso del fuego y un soporte que fortalece la varilla.

*Superficies y Estructuras (geometría y ensamblado por paneles).*

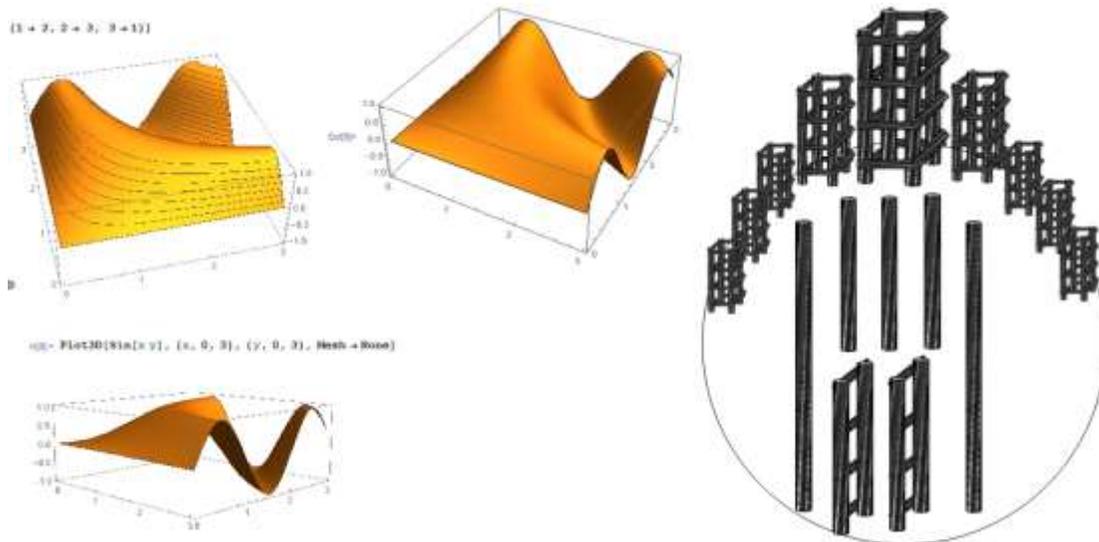


Fig. 103. 'Estructura matemática'. Fuente: elaboración propia. Plano elaborado en (Mathematica 10).

Se modeló la superficie matemática, para utilizarla de diagrama arquitectónico, donde se especifica la realización de un ensamble con las 'varillas de fibra de carbono'.

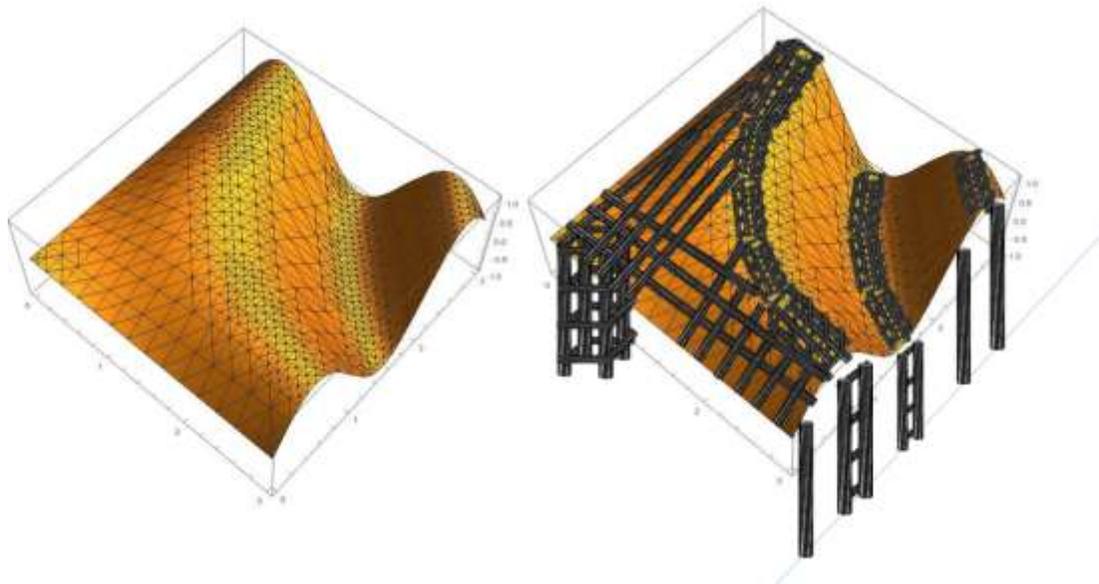


Fig. 104. 'Estructura matemática a seguir y elementos arquitectónicos acomodados'.

Los elementos arquitectónicos en este caso son formas tubulares o cónicas llamadas varillas de fibra de carbono, se unen para darle soporte a la superficie – también conocida como

‘estela’ – de fibra de carbono. Aquí la última gráfica, ya supone que el elemento tectónico, tiene su estructura con cambios de dimensión y auto similitud entre piezas.

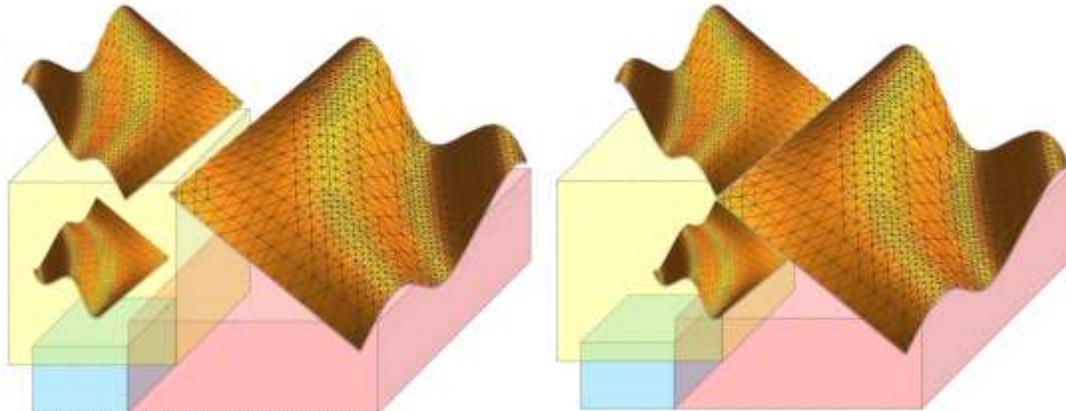


Fig. 105. ‘Volúmenes por debajo de estructuras, basadas en planos geométricos iterados, que siguen la regla de auto similitud’. Fuente: elaboración propia. Plano elaborado en (Mathematica 10).

En el diagrama siguiente, se hace notar, que cada figura es la misma pero en diferente escala o dimensión. El trazo de la superficie geométrica, se logra con la ecuación  $\sin(\theta)$ , que al ser multiplicada por la base canónica, da cada uno de los puntos que se necesitan para trazar la figura. El ensamblado por paneles, es un diseño de una forma geométrica, construida con paneles de Fibonacci.

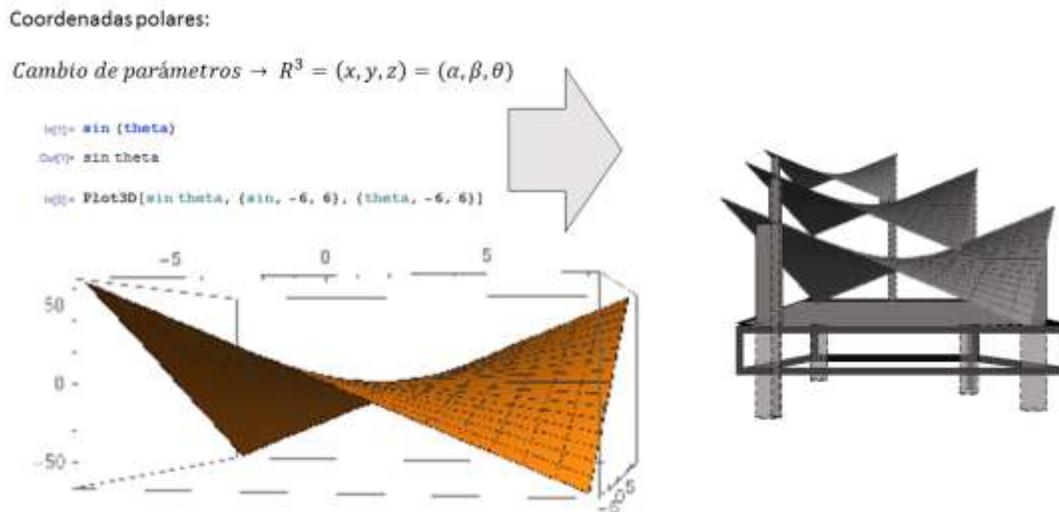


Fig. 106. ‘Ensamble de domos’

La forma de ensamble de este tipo de estructuras, se hace por módulos, representados por parches de fibra de carbono. Una vez creado el domo, se procede a construir la estructura para soportarlo, recordando que se tienen tres tipos de estructura:

- 1.- La que le da rigidez al domo
- 2.- la que sostiene el domo
- 3.- Y la que sostiene la estructura total

**Construcción con nodos.** Haciendo uso de nodos, surgió la idea de construir un diagrama:

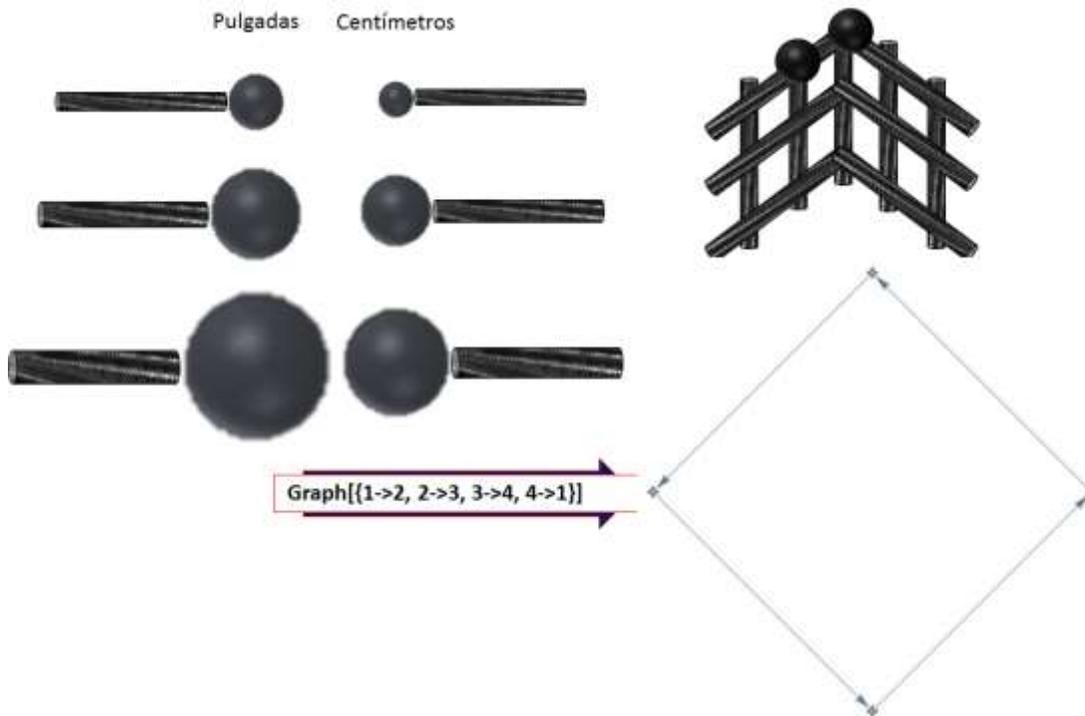


Fig. 107. Unión con nodos

A base de la unión de los diferentes elementos iterados, se logra darle forma a la gráfica. Las dimensiones de las esferas están relacionadas con los paneles:

- Diametro esfera 1  $\rightarrow PA_1 = 1cm$ , diámetro tubo  $\rightarrow FA_1 = 0.4$
- Diametro esfera 2  $\rightarrow PA_2 = 1.57cm$ , diámetro tubo  $\rightarrow FA_2 = 0.5$
- Diametro esfera 3  $\rightarrow PA_3 = 2cm$ , diámetro tubo  $\rightarrow FA_3 = 0.6$
- Diametro esfera 4  $\rightarrow PA_4 = 2.54cm$ , diámetro tubo  $\rightarrow FA_4 = 0.7$
- Diametro esfera 5  $\rightarrow PA_5 = 3cm$ , diámetro tubo  $\rightarrow FA_1 = 0.8$
- Diametro esfera 6  $\rightarrow PA_6 = 4.11cm$ , diámetro tubo  $\rightarrow FA_1 = 0.9$

La unión con nodos se caracteriza por ser vectorial, en el espacio tridimensional, a partir del plano con coordenadas  $(x, y, z)$ .

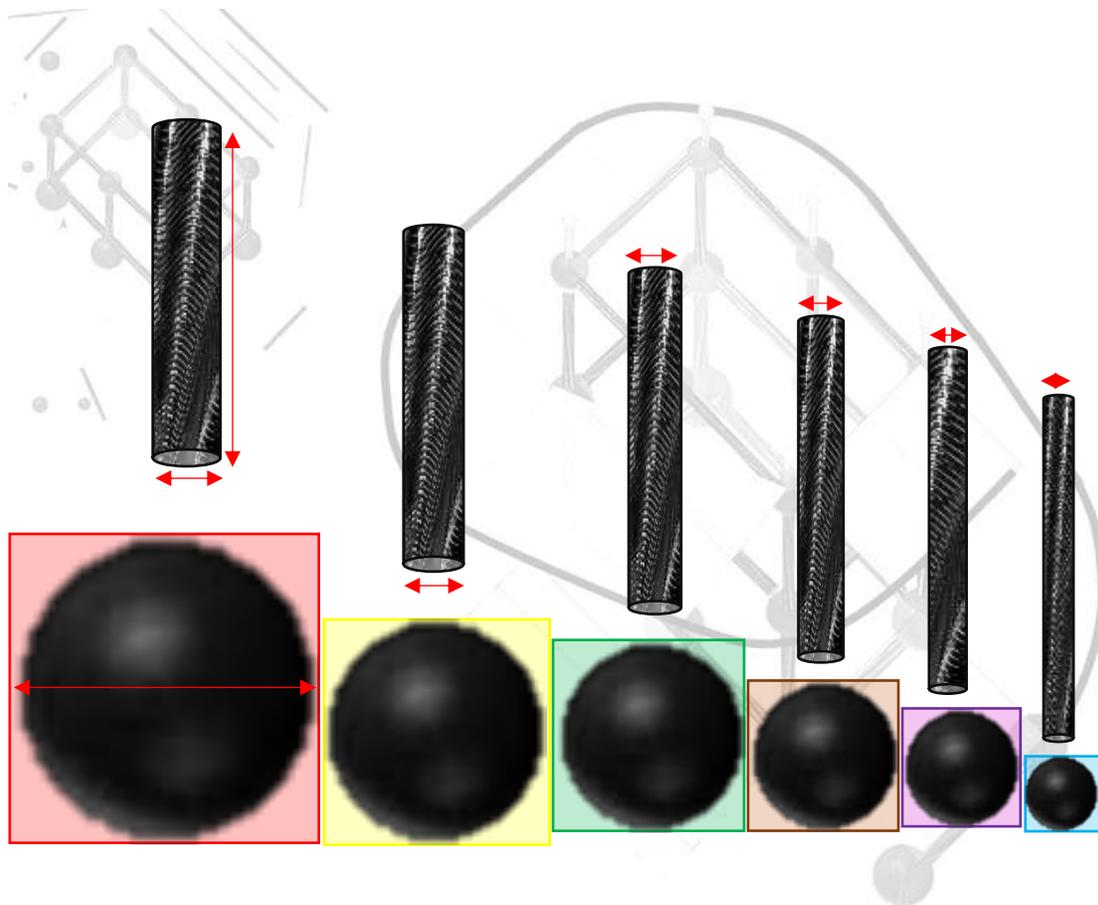


Fig. 108. ‘Ensamblado siguiendo la forma de la ‘Domino House’ y la estructura de las ramas un árbol (que van de gruesas a delgadas).’ Elaboración propia.

Al tomar el espacio arquitectónico como el lugar donde se representa la tercera dimensión, se toman de apoyo “los vectores de la base canónica”<sup>243</sup> Tres vectores especiales sobre los ejes (x, y, z):

*i*: el vector de componentes (1,0,0)

*j*: el vector de componentes (0,1,0)

*k*: el vector de componentes (0,0,1)

Una vez que en el espacio se define un punto donde representar los ejes (x, y, z) se dibujan los vectores de la base canónica – flechas rojas –. Las flechas azules, representan vectores, al empezar por los nodos de la planta baja, tomando la esquina donde están las flechas, desde

<sup>243</sup> Marsden E., Jerold, Anthony J. Tromba. “Cálculo Vectorial”. Pearson: Madrid. 2004. Pp. (10-11)

el punto donde se fijan los vectores de la base canónica se suman vectores y se multiplican escalares. Por ejemplo en los ejes ( $x = i, y = j, z = k$ ).

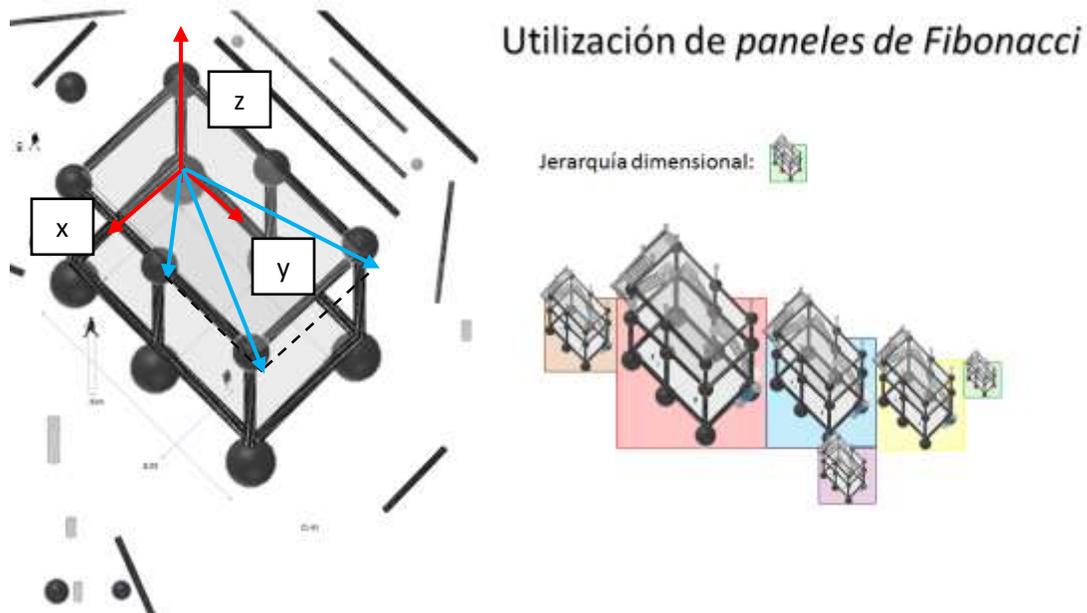


Fig. 109. 'Ordenación de elementos'. Elaboración propia

Así debido a los análisis geométricos multidimensionales, que se toman por datos, la cuestión programática se vuelve una tarea interesante cuando se analizan y configuran elementos como la ordenación, disposición, distribución, simetría y otros... Todo esto se puede hacer tan solo siguiendo las leyes de la física, con esto se estará asegurando que la ingeniería realizada tiene grados de prueba, ensayo y control. Desde el proceso de diseño arquitectónico, hasta en los aspectos, que requiere la ingeniería civil para hacer su trabajo. Tener una noción de a lo que se refiere tener buenos cimientos, es lo que permite entender que los nodos que sostienen la base de la estructura significan esta cimentación. La estructura se plantea como una mesa que se puede posar en cualquier lugar: bajo el argumento de que las esferas le brindan estabilidad sobre el suelo. Y las patitas que son pilotes continuos usados como pilares de la planta baja: sirven de agarre de la estructura en el terreno (sea esta cual sea, en teoría). Así se brinda una imaginación arquitectónica producto del manejo del espacio multidimensional iterado. Manejar cambios de retículas por iteraciones, permite ir descubriendo nuevos aspectos espaciales, porque cada iteración es un paso diferente. Para que este proceso pueda ser fractal, al menos se deben tener iteraciones, en los cambios dimensionales más significativos. Con esto se puede conocer la correlación directa que hay entre la espacialidad diseñada arquitectónicamente y los movimientos del ser humano dentro

de ellas. En este caso son planos y su rampa inclinada, con pausas ortogonales como descanso, después de las vueltas en las esquinas del edificio.

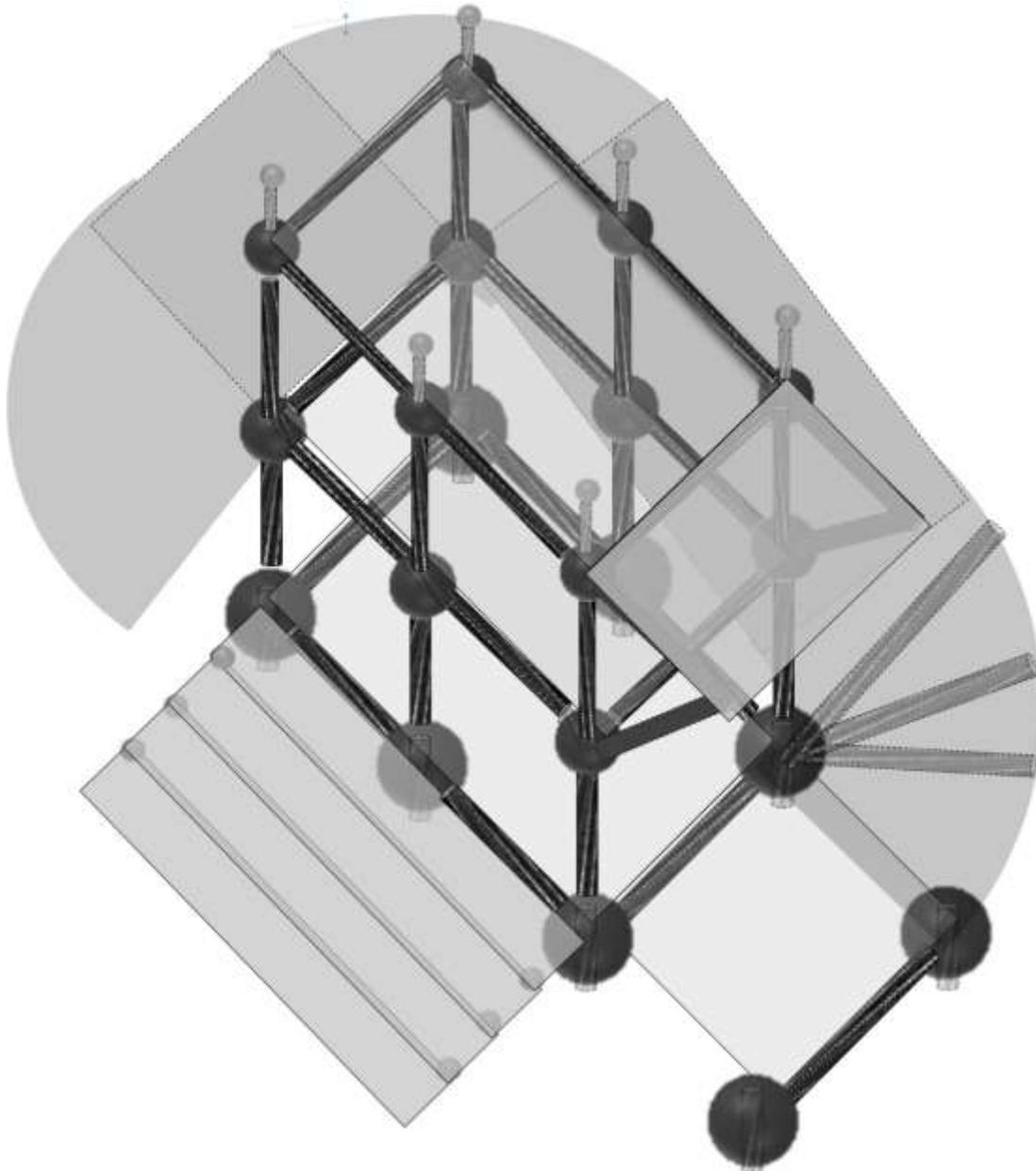


Fig. 110. 'Ensamblado de la estructura'. Elaboración propia

Si cada piso se considera un módulo, se puede ver que se fueron uniendo los nodos del más grande al más pequeño, debido a los análisis multidimensionales, para unir los nodos estructuralmente solo es necesario: seguir el centro de masa de cada esfera. Todos los cilindros que se unen con las esferas, están fusionados con la esfera en el centro de masa, la estructura final

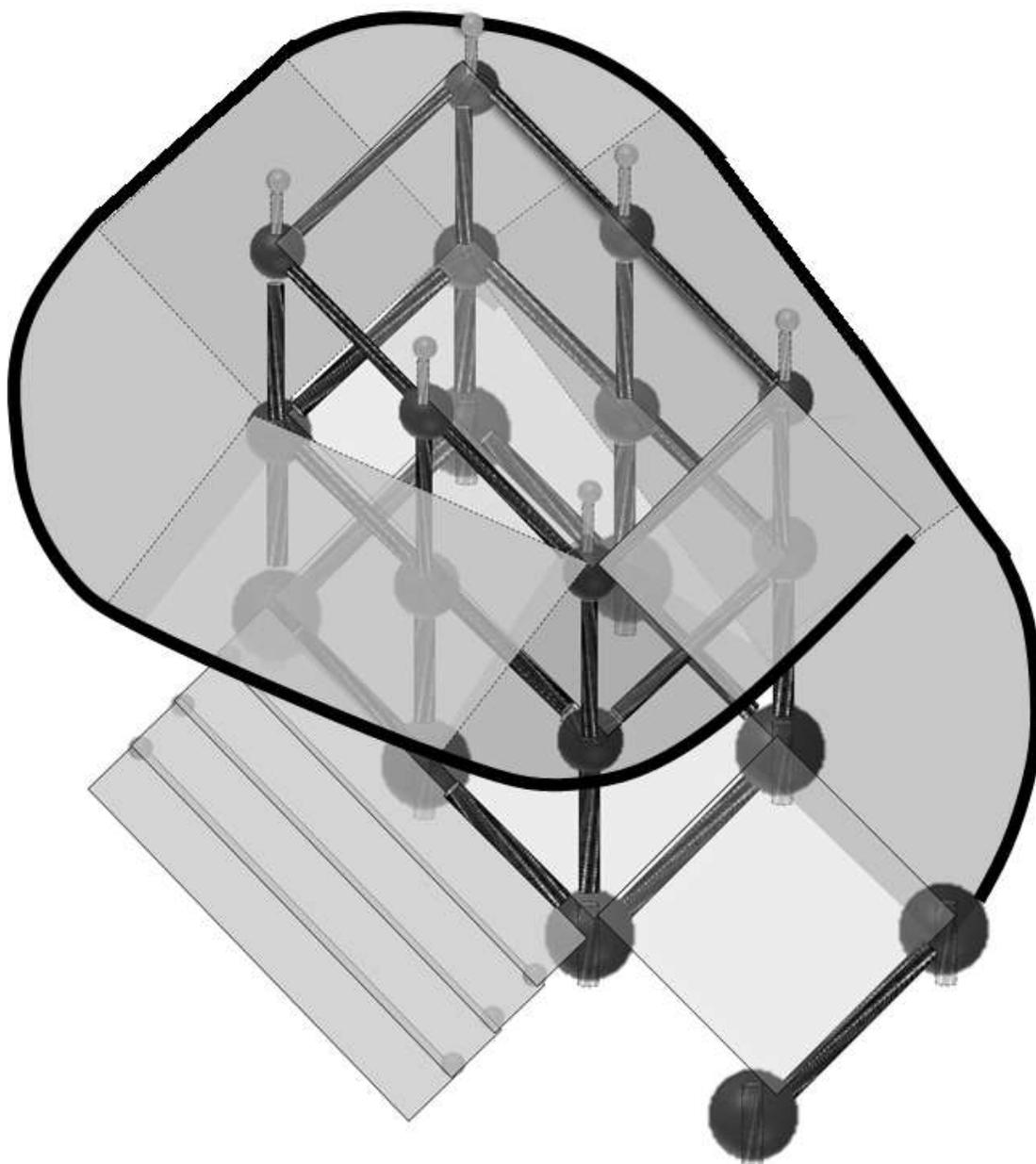


Fig. 111. 'Creación de un módulo'

***Programación Arquitectónica Fractal (dinámica)***. Debido a esta característica vista en la forma de las plantas, la manera en la que distribuyen sus ramas y su modo formación. Al fraccionar el espacio se tienen parámetros para analizar la posible ordenación de un espacio arquitectónico. Pero al iterarlos se puede analizar combinaciones de la disposición del espacio a partir de las medidas y forma del terreno para la construcción. Se tienen dos opciones para trabajar, una que el terreno este en un cajón o lote con forma definida y la otra que sea un terreno de forma indefinida.

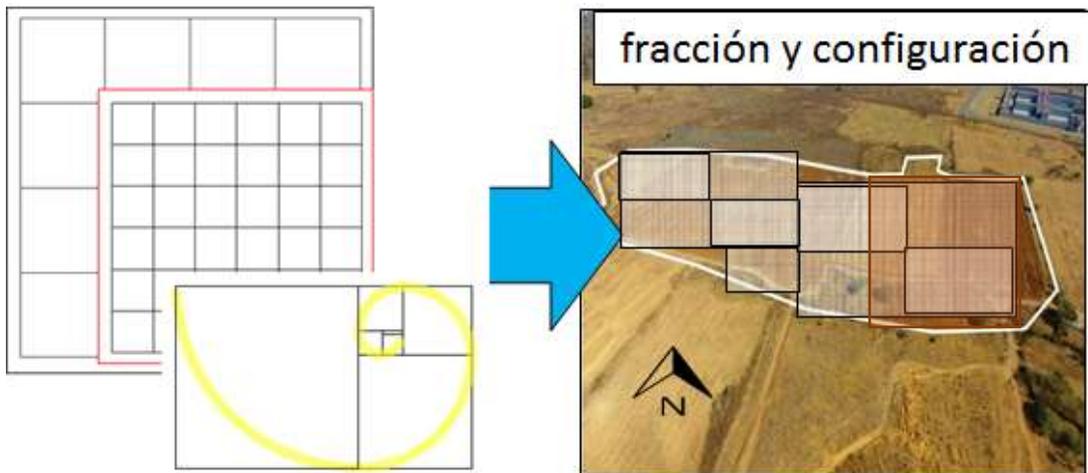


Fig. 112. 'Fracción del espacio en el terreno'. Elaboración propia

La misma orientación puede estar ya reglamentada, entonces las combinaciones del orden del espacio, se pueden utilizar para analizar la mejor distribución de entradas de luz natural para su aprovechamiento; así como hacerlo con otras variables, la ventilación por ejemplo. Sin embargo se pone este ejemplo de la luz, debido a que las investigaciones han obtenido resultados, de que la naturaleza de las plantas: es que sus hojas crezcan buscando la luz, distribuyéndose alrededor del tronco o tallo según números que siguen la serie de Fibonacci. Un hecho importante de mencionar es la reflexión y refracción de la luz<sup>244</sup>. Dado a que la naturaleza de la luz tiene dos personalidades una que se explica con el concepto de “frente de onda para describir la propagación de las ondas” (Zemanski) y la otra que explica “desde el punto de vista ondulatorio, un rayo es una línea imaginaria a lo largo de la dirección de propagación de la onda”.<sup>245</sup>

“Las espirales que forman en el corazón de muchas flores, se pueden ver espirales cuyos números se corresponden con números de Fibonacci correlativos”,<sup>246</sup> con estas espirales de tipo logarítmico se logra una disposición que aprovecha el espacio horizontal más eficientemente. En este capítulo se pone de ejemplo lo que se ha visto en la forma en la que se distribuyen las plantas. Estas al crecer se distribuyen según el ángulo  $137.5^\circ$  que es la división de  $\{360^\circ \text{círculo} / [\text{Phi} = \varphi = 1.618] = 222.49\}$  y  $\{229 / [\text{Phi} = 1.618] = 137.5$ . De esta manera la planta, se asegura que a medida que el tallo crece, las ramas no crecerán

<sup>244</sup> (Zemanski Vol. II, 1081)

<sup>245</sup> (Ídem 1082)

<sup>246</sup> Smart Planet. “Redes. La Proporción Áurea. Eduard Punset. 1996-2013” 2020. [TVE. Redes. Smart Planet.](https://www.rtve.es/play/videos/redes/) 4 May 2021. < <https://www.rtve.es/play/videos/redes/>>. Soporte: 2021. <[https://youtu.be/d\\_71-uqz\\_ic](https://youtu.be/d_71-uqz_ic)> Min. (8:00- 9:40)

una sobre la otra. Sino que cada una, alcanza una disposición diferente, aprovechándose mejor la luz del sol.

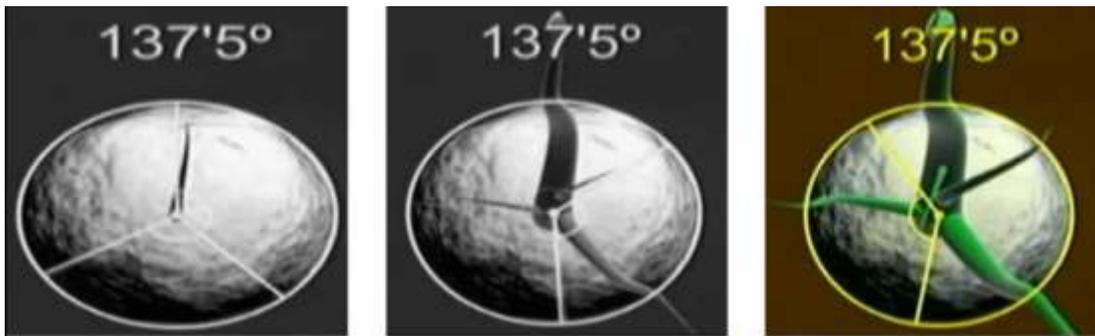


Fig. 113. La búsqueda de la luz

En función de esta terminología, la reflexión es cuando los rayos de luz se reflejan en alguna superficie y la refracción, cuando los rayos atraviesan alguna superficie. Por ejemplo el vidrio refleja y refracta los rayos de luz. En base al razonamiento anterior, se puede concluir, que los espacios con formas ortogonales: favorecen la reflexión con un ángulo definido. Lo cual da a la luz una amplitud, debido a la homogeneidad con la que se expande. Mientras que en una superficie curva o rugosa o irregular la luz se dispersa. Es importante demostrar que hay dos tipos de reflexión “Reflexión especular” y “Reflexión difusa”.

La primera se da cuando los rayos de luz se reflejan con un ángulo definido desde una superficie muy lisa. Y la otra es una reflexión dispersa que se da en una superficie áspera. Por ejemplo en una pared de un espacio ortogonal se tiene una reflexión especular. Mientras que en un pared curva o de formas complejas se obtiene una reflexión difusa. Entonces los espacios ortogonales – que son lisos – favorecen el reflejo de la luz en un ángulo definido, logrando que esta se expanda e ilumine un volumen mayor de espacio. Finalmente a manera de recordatorio, de que se están haciendo análisis geométricos multidimensionales, todas estas tareas se facilitan. Porque el proceso de revisión que implican los cambios de dimensión, deja a la luz muchas oportunidades para poder obtener nuevos recursos. Y a la vez esto promueve la solución o al menos la propuesta, para poder resolver nuevas necesidades. Sobre todo porque la arquitectónica construida por el hombre, ha mostrado que puede ser construida como una herramienta eficaz. Que puede facilitar la captación, recolección y almacenaje de algunos recursos – según se dijo: el agua –.

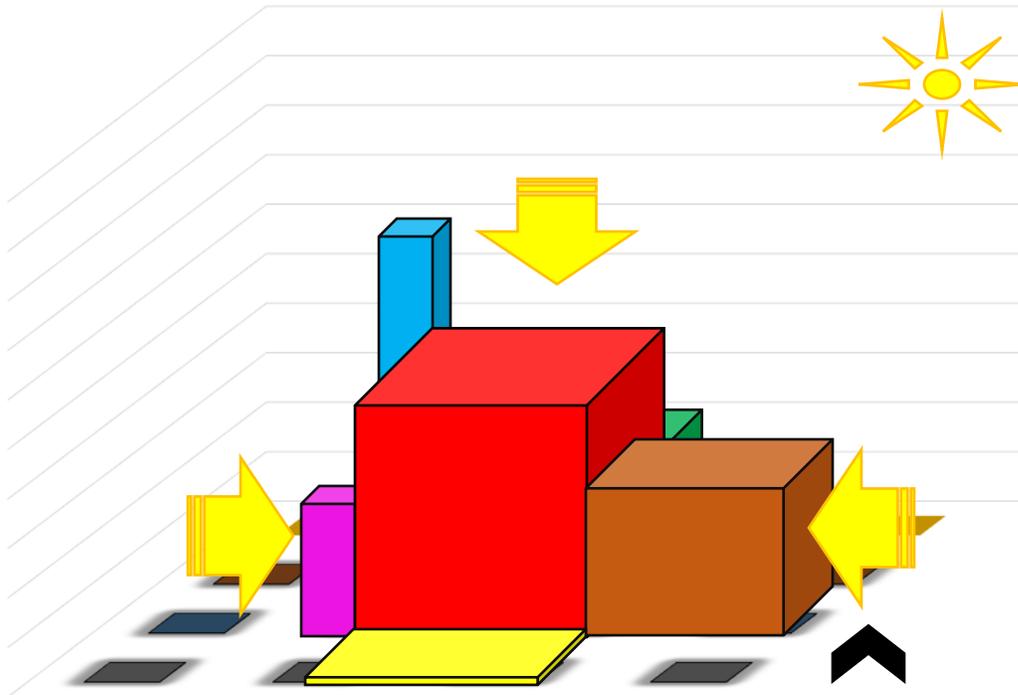


Fig. 114. Utilización de proporciones para dividir y seccionar los espacios

En contraste los espacios interiores de la casa orgánica, por ser cóncavos absorben luz y no hay una buena reflexión, pues se crea un vacío.

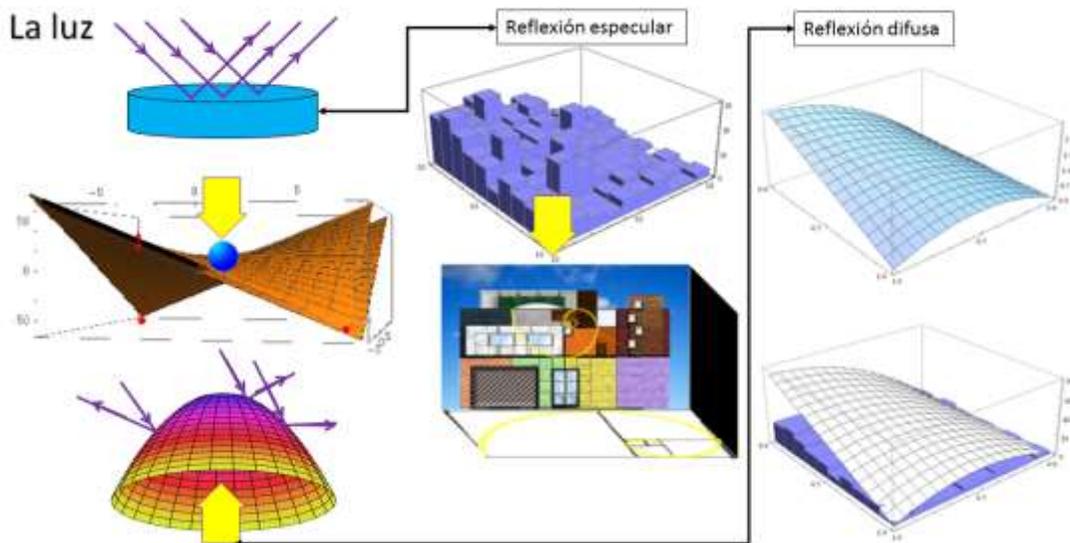


Fig. 115. Los tipos de reflexión de la luz.

En los espacios exteriores que son convexos la luz se refleja sobre la saliente de la superficie dejando sombras hacia los puntos más profundos con respecto a esa saliente. Esto por su puesto tiene implicaciones directas, con el ángulo de incidencia visual y la perspectiva lineal:

### 1 punto de fuga

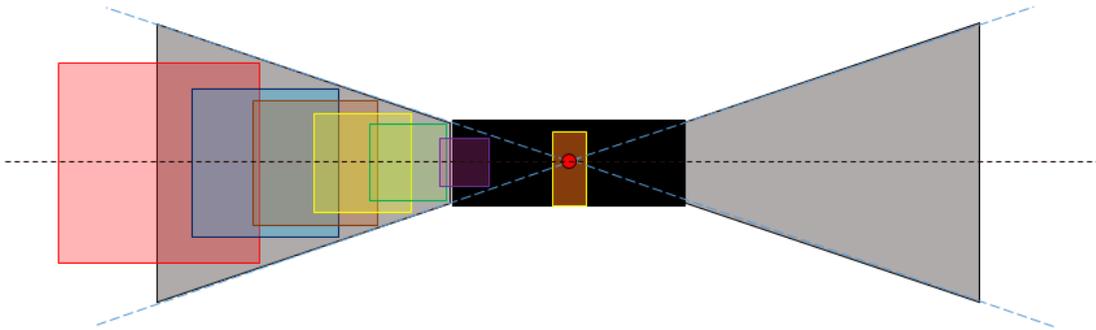


Fig. 116. Un punto de fuga con paneles

Inclusive el tema del papel que juega la luz en la incidencia visual, se cree importante mencionarlo porque la ausencia de luz, crea la oscuridad y la presencia de sombras y estas también tienen que ver con la perspectiva.

### 2 puntos de fuga

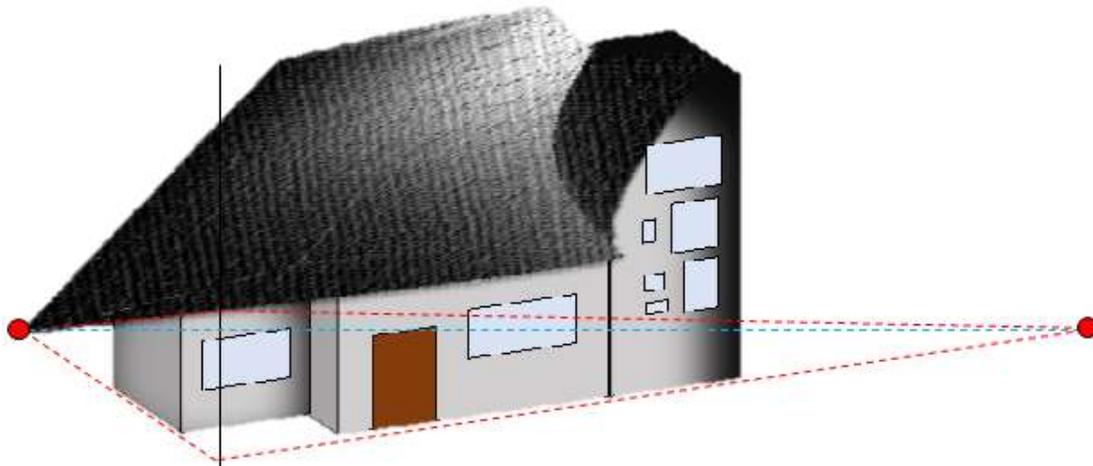


Fig. 117. Dos puntos de fuga con paneles

A tal grado de que la línea de horizonte (como se vio con la perspectiva del Palacio de Minería, en el capítulo cuatro), está a la altura del punto de fuga donde convergen líneas transversales y líneas ortogonales. Esa distancia que denota el uso de la técnica de

perspectiva, en el diseño arquitectónico deja crear múltiples perfiles de la obra, y es ahí donde están las sombras y/o la luz.

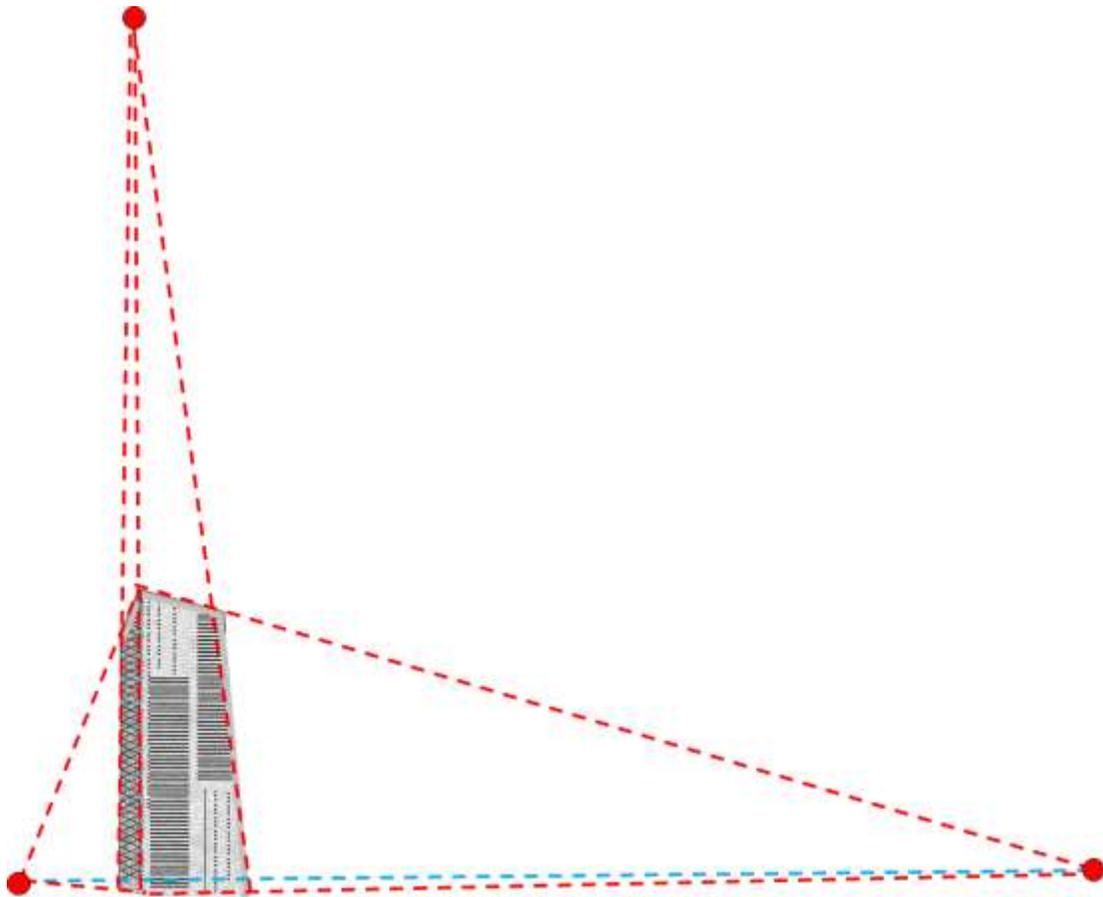


Fig. 118. Tres puntos de fuga con paneles

Con los resultados del análisis, incluso da para hacer una transformación geométrica de un estilo, por ejemplo: la Robie House, transformando sus triángulos en parábolas.

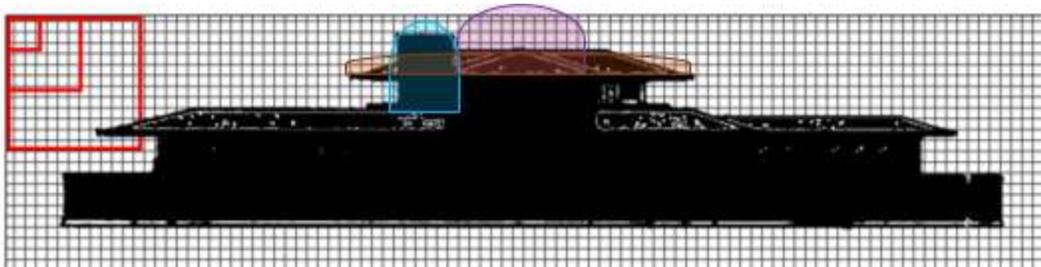


Fig. 119. Robie House con una transformación en sus líneas del techo. Elaboración propia. Imagen<sup>247</sup>

<sup>247</sup> Silueta de la Robie House analizada en el capítulo 2

Al revisar el orden en las gráficas arquitectónicas hay permutaciones y combinaciones que se pueden realizar. ¿De cuantas formas se puede ordenar un espacio? Esta pregunta se puede resolver de forma didáctica con el espacio fraccionado al realizar un análisis de dimensión fractal. Las fracciones del espacio al ser asociadas con los paneles, se pueden manejar de forma didáctica para realizar permutaciones y combinaciones. Aunque hay miles de opciones, estas se reducen rápidamente cuando el arquitecto le da la distribución más adecuada al espacio. Note que incluso al diseñar un edificio, se distingue en el diagrama arquitectónico un flujo, casi todos con un tipo de patrón lineal-funcionalista. Por citar un ejemplo: al dividir las zonas para las diferentes actividades. Utilizando: 3 zonas generales

{ **Recepción** → Sala, Descanso, ½ w.c. }  
 { **Servicios** → Comedor y cocina, cuarto y patio serv. }  
 { **Privados** → Recámaras }

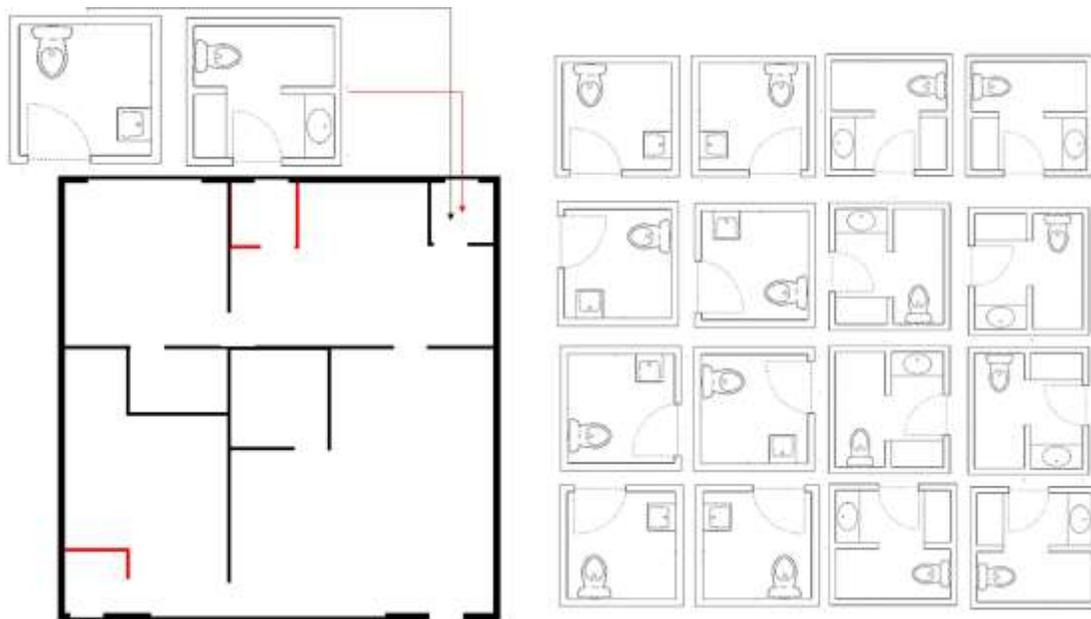


Fig. 120. El orden en los espacios interiores

Esta opción de poder permutar y combinar los espacios<sup>248</sup>, es consecuencia, de una organización geométrica de los espacios interiores. Estas son cuestiones como las que Durand se planteó, respecto a la permutación de espacios. Y la organización geométrica, es

<sup>248</sup> “Gracias a que los elementos del edificio, como columnas, puertas y ventanas, estaban colocados en ejes comunes, daban lugar a que las habitaciones generadas por estos elementos estuvieran colocadas necesariamente sobre ejes comunes. Sin embargo, este proceso no limitaba el resultado, ya que existe un infinito número de combinaciones de nuevos ejes...” (Ortín 17-25).

una técnica que ha sido utilizada desde la antigua Grecia y Roma.<sup>249</sup> En el presente caso, con la utilización de la técnica del espacio multidimensional, una vez que se caracterizó la definición de cómo van a quedar los espacios ya fijos (es decir que estos ya fueron definidos, ordenados y dispuestos por el arquitecto). Se hace alusión a la pregunta de espacios individuales, por ejemplo:

¿Cuántas opciones se tienen, de entre tres espacios ventilados, para colocar medio baño con dos posibles órdenes diferentes? Entonces por la regla del producto  $3 \times 2 = 3! = 6$ . Al asignar las fracciones de un espacio a un panel, que le corresponde en dimensión, se puede hacer el análisis de combinaciones y crear una matriz como la de la figura anterior. Esto para conocer, las posibles ordenaciones, que puede llegar a tener un espacio. Si se quieren sacar tres paneles o módulos de la matriz. Número de permutaciones de tamaño tres para dieciséis:

$$16 \times 15 \times 14 = \frac{16!}{13!} = P(16,3) = 6,227,020,800$$

En cambio sacar tres sin reemplazo:

$$\begin{aligned} (3!) \times (\text{selecciones de tamaño 3 de la matriz de 16}) &= C(n, r) = \frac{P(n, r)}{n!} \\ &= \frac{n!}{r!(n-r)!} = \frac{16!}{3!13!} = 3,360 \end{aligned}$$

Tres mil formas diferentes de combinar estos espacios, que se reducen a las seis funcionales del primer análisis. Entonces estas son las opciones, que se pueden analizar multidimensionalmente de un espacio y esa es la ventaja en la utilización de este recurso.

***Uso de Técnicas de Arquitectura Fractal.*** Se propone, utilizar las técnicas enlistadas en la investigación juntas, para realizar un diagrama arquitectónico. La idea de diseño arquitectónico del edificio, se tomó a partir de un modelo existente, *para poder utilizar la técnica de auto similitud, ensamblando por partes los elementos arquitectónicos utilizando*

---

<sup>249</sup> “Geometric organization of the house site... At Pompeii and Herculaneum the houses use a limited number of proportions and of regulating square sizes. The most common proportion of width to depth was 1:3, followed by 1:2. There were a few occurrences of 1:2 1/2 and 1:1”. (K. M. Williams, Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future: Vol. I 206).

“Organización geométrica del espacio para hogar... En Pompeya y Herculano, las casas usaban un número ilimitado de proporciones y de regulaciones de los tamaños de los cuadrados. La proporción más común de ancho era 1:3, seguida por 1:2. Había pocas ocurrencias de 1:2 1/2 and 1:1”. (Trad. Propia).

nodos, el modelo está inspirado en la “Domino House<sup>250</sup> de Le Corbusier”. El diagrama arquitectónico se empieza utilizando la técnica uno.

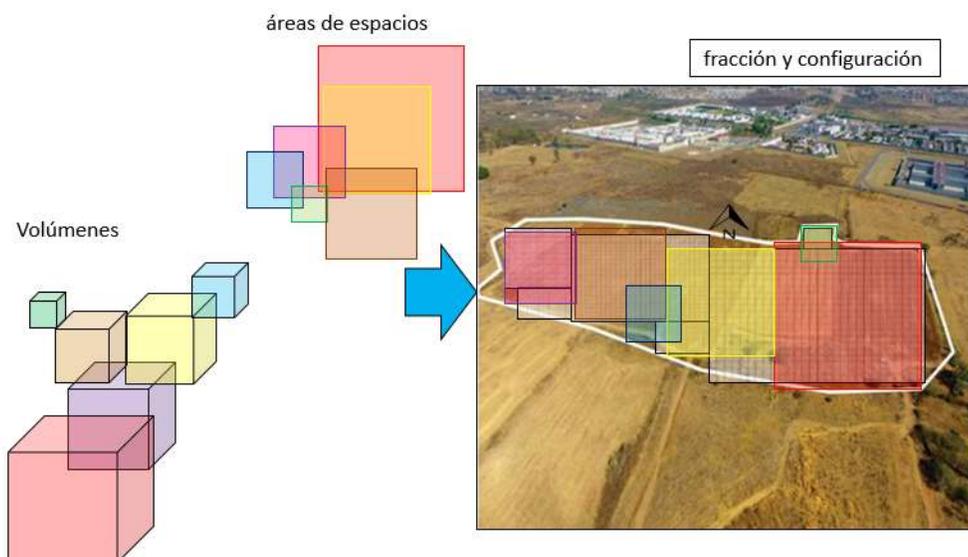


Fig. 121. ‘División del terreno en fracciones’. Elaboración propia.

En la división del terreno en fracciones, se considera un terreno libre, en donde se podría iterar la orientación cardinal de la entrada libremente. Se tiene un cuadrado de  $10 \times 10m$ . Es necesario dividirlo, para hacer un análisis de proporciones por capas de cimentación y la estructura. La importancia de las medidas en el terreno, va de que se utilizan en todos los rubros, como se puede ver en la siguiente cita:

“El lienzo que se ha de avaluar, supongamos los Z, tiene de altura 4 varas, el largo sean 5 varas, y el grueso de la pared sean  $2/3$ ... Esto medido, súmese,..., multiplíquese,..., multiplíquese por el nominador del quebrado del grueso,..., pártanse al denominador... y salen varas cúbicas..., avalúense al precio a que está regulada la vara cúbica... y se habrá hecho el avalúo”<sup>251</sup>

<sup>250</sup> “Después de la Primera Guerra Mundial... Y él entonces ya como arquitecto piensa en la reconstrucción, va a ver que construir mucho – dice: ‘las guerras están destruyendo muchas cosas’ – e inventa un sistema para reconstruir el mundo. Ese mundo devastado por la primera guerra, lo llama el sistema dominó. Que es un juego de palabras por un lado viene de *domus* casa en latín y por otro dominó, ‘porque como ven tiene la fichita que él ha dibujado, tiene como seis puntitos que son los seis pilares... Es casi como un ideograma de la arquitectura de Le Corbusier... Tiene de particular que por primera vez Le Corbusier reduce la arquitectura a nada más que un forjado y nada más que un pilar... Simplemente la arquitectura se reduce a su mínima expresión... Pero el cuándo propone las casas domino, las propone como ven aquí, con un cerramiento al final, que tiene este aire de clasicismo depurado” (Fundación Juan March. “Le Corbusier | Luis Fernández-Galiano”. Min. (18:38-20:07)).

<sup>251</sup> Cortés, Rocha, Javier. *Arquitectura Mecánica: la profesión y el oficio*. Ciudad de México: Facultad de Arquitectura, Instituto de Investigaciones Bibliográficas UNAM, 2019

Aunque habla de un avalúo no se deja pasar desapercibida, la idea e importancia de tabajar con áreas y volúmenes al configurar el espacio o medirlo.



Fig. 122. Proporciones de la partición del terreno. Elaboración propia.

Sin embargo se tratará como indican las instrucciones de diseño, creando muros de colindancia a ambos lados de la casa. Para lo cual se define la entrada con una única orientación y en este caso las iteraciones y combinaciones no son de interés creativo ni técnico. Se toma el *panel 6 rojo*:  $PA_6 = 4.11cm$  – el de mayor tamaño –, para definir la suma de un *panel 1 azul* y un *panel 5 amarillo*. La orientación se escogió con la entrada viendo hacia el sur, así a partir de las fracciones, se procede a delimitar las áreas. La partición con el *panel 5 amarillo*, deja ver cuantos de estos paneles  $PA_5 = 3cm.$ , sirven para rellenar el espacio dividiéndolo en nueve secciones o áreas, el resto de los paneles permiten hacer una relación visual de las proporciones. Tres por tres paneles de tres centímetros en la base más uno de un centímetro. Representan en una escala de 1:100 los diez metros. Ahora luego de realizar la partición, se empieza por utilizar la técnica uno, tres dimensiones diferentes. Empezando desde los cimientos del edificio, se necesita un espacio de  $10 \times 10m$  (en una escala 1:100, el tamaño de este espacio en un dibujo sería de diez centímetros, que se representan con el cuadrado negro).

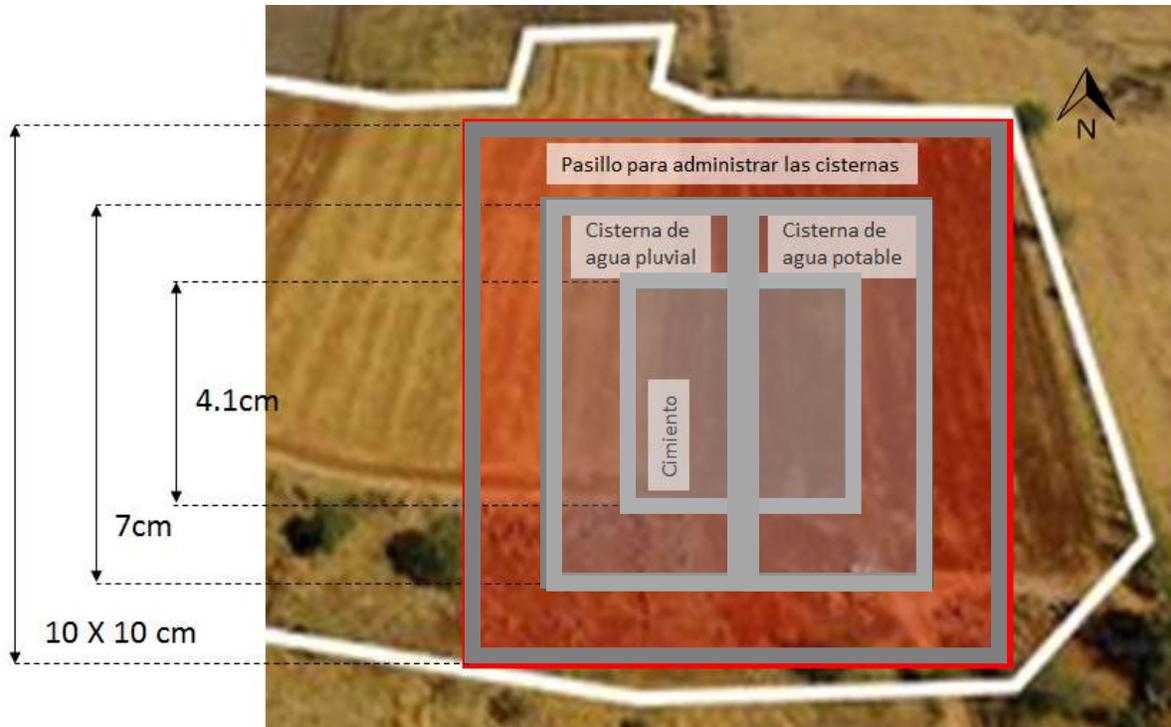


Fig. 123. Proporciones de la partición del terreno. Elaboración propia.

Por ejemplo el cuadrado del cemento, es una base sólida de concreto armado, que se conecta con el volumen de los muros de los dos cajones de las dos cisternas. La base tiene:

$$\text{Base cimiento} \rightarrow 4.1\text{cm}^2 \times \{1: 100[1\text{yarda} = 91.44\text{cm}] = .9144\} \approx 15.3710\text{cm}^3$$

Este resultado es de la gráfica, pero haciendo el cambio a metros serían  $15,371\text{m}^3$ . A la base hay que quitarle la diferencia de la base de los cajones, para calcular dicha base.

$$\begin{aligned} \text{Diferencia losa 1} &\rightarrow \text{Base} - \{4.1\text{cm}^2 \times [20\text{pulg.} = 0.508\text{cm}]\} \\ &= 15.3710\text{cm}^3 - 8.5394\text{cm}^3 = 6.8316\text{cm}^3 \end{aligned}$$

Al calcular los cajones de las cisternas como son dos idénticos, se tiene:

$$\text{Losa cisternas} \rightarrow (7\text{cm})^2 \times .508\text{cm} = 24.892\text{cm}^3$$

$$\text{muros cisternas} = 7\text{cm} \times .30\text{cm} \times 1.57\text{cm} = 3.297\text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Diferencia muros cisternas} &= \text{muros cisternas} - \{(.30\text{cm})^2 \times 1.57\text{cm}\} \\ &= 3.297\text{cm}^3 - 2(0.1413\text{cm}^3) = 3.0144\text{cm}^3 \end{aligned}$$

La última diferencia, corresponde la pared menos la unión de muro con muro, es decir el volumen ocupado por los castillos reforzados. Los cajones son de concreto armado.

$$\begin{aligned} \text{Castillos} &\rightarrow \{[0.09\text{cm}^2 \times 1.57\text{cm}] + [0.09\text{cm}^2 \times 0.508\text{cm}] + [0.09 \times .9144]\} \\ &= 0.1413\text{cm}^3 + 0.0457\text{cm}^3 + 0.0822\text{cm}^3 = 0.2692\text{cm}^3 \end{aligned}$$

Es decir los primeros castillos que son los de la caja de la cisterna tienen el largo de las paredes de las cisternas, atraviesan la losa de las cisternas y llegan al nivel del piso donde se posa la base.

$$\begin{aligned} \text{Muro divisor cisternas} &\rightarrow 7\text{cm} \times .30\text{cm} \times 1.57\text{cm} = 3.297\text{cm}^3 - 2(.1413\text{cm}^3) \\ &= 3.0144\text{cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diferencia} &\rightarrow [VT = 7\text{cm}^2 \times 1.57\text{cm}] - [VP = 6.7\text{cm}^2 \times 1.57\text{cm}] \\ &= [76.93\text{cm}^3] - [70.47\text{cm}^3] = 6.46\text{cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Diferencia} \rightarrow [VP = 70.47\text{cm}^3] - [3.0144\text{cm}^3] = 67.45\text{cm}^3$$

Así, cada cisterna tendrá capacidad para unos 60 metros cúbicos, la cantidad de agua que cabe sin llenar es de unos 30,000 litros de agua por cisterna. 10,000 pueden ser de la toma y en época de lluvias de lo que se perciba de escurrimientos de agua de la casa hay capacidad para 20,000 metros cúbicos. Para cambiar de volumen se varía la altura únicamente:

$$\text{Paredes cisternas} = 7\text{cm} \times .30\text{cm} \times 2\text{cm} = 4.2\text{cm}^3$$

$$\text{Diferencia muros perimetrales cisternas} = 4.2\text{cm}^3 - 2(0.1413\text{cm}^3) = 3.9174\text{cm}^3$$

$$\text{Muro divisor cisternas} \rightarrow 4.2\text{cm}^3 - (0.2826\text{cm}^3) = 3.9174\text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Diferencia} &\rightarrow [VT = 7\text{cm}^2 \times 2\text{cm}] - [VP = 6.7\text{cm}^2 \times 2\text{cm}] \\ &= [98\text{cm}^3] - [89.78\text{cm}^3] = 8.22\text{cm}^3 \end{aligned}$$

Aquí se tendrían sin llenar unos 80,000 metros cúbicos de agua.

$$\text{Losa sótano} \rightarrow (10\text{cm})^2 \times .40\text{cm} = 40\text{cm}^3$$

$$\text{Diferencia losa sótano} = 40\text{cm}^3 - [(4.5\text{cm})^2 \times .40\text{cm}] = 31.9\text{cm}^3 \approx 32\text{cm}^3$$

La losa del sótano se posa exactamente arriba de la caja de las cisternas. En el sótano, si es importante construirlo siguiendo el límite del terreno, con un cajón que servirá de límite perimetral tipo muro milán. Pero todo el cajón sótano complementa el cimiento.

$$\text{muros sótano} = 10\text{cm} \times .30\text{cm} \times 2.30\text{cm} = 6.9\text{cm}^3$$

$$\text{Diferencia paredes sótano} = \text{Paredes sótano} - \{(.30\text{cm})^2 \times 2.30\text{cm}\}$$

$$= 6.9\text{cm}^3 - 2(0.207\text{cm}^3) = 6.486\text{cm}^3$$

$$\text{Área castillos sótano} \rightarrow (0.508\text{cm})^2 = 0.258\text{cm}^2$$

$$\text{Castillos} \rightarrow \{[0.258\text{cm}^2 \times 2.30] + [0.258 \times 0.40] + [0.258\text{cm}^2 \times 1.57\text{cm}]\}$$

$$+ [0.258\text{cm}^2 \times 0.508\text{cm}] + [0.258 \times .9144]\}$$

$$= 0.5934\text{cm}^3 + 0.1032\text{cm}^3 + 0.405\text{cm}^3 + 0.1310\text{cm}^3 + 0.2359\text{cm}^3 = 1.4685\text{cm}^3$$

Los castillos del sótano son más grandes, debido a que estos en su punto final al nivel de la losa de la planta baja del edificio, cumplen con la función de postes para ensamblar la vigas, es decir por abajo son pilotes y sobre la losa de la planta baja son postes de concreto armado con tornillos salientes para ensamblar las vigas de acero.

$$\text{Losa PB} \rightarrow (10\text{cm})^2 \times .38\text{cm} = 38\text{cm}^3$$

Utilización de vigas para columnas y losa

$$\text{Vigas PB} \rightarrow \text{anchos} = 25.40\text{cm} \text{ y } 14.60\text{cm}. \text{Espesor} = 1\text{cm}$$

Luego los muros corridos del sótano, forman un casco cuadrado de perímetro, tipo muro milán y ocupan los  $10 \times 10\text{m}$ . Sobre estos el piso de la planta baja, es el único que ocupa toda el área dispuesta. A continuación se realiza una ‘proyección ortogonal’ de un árbol, en un edificio que imita la forma de la naturaleza, el árbol es un organismo que regula sus recursos (el agua y nutrientes, desde sus hojas y desde la raíz). Esta mentalidad de diseño, proviene inspirada de las nuevas reglamentaciones, para diseñar arquitectura que de alguna manera promueva la sustentabilidad y el ahorro de recursos naturales.

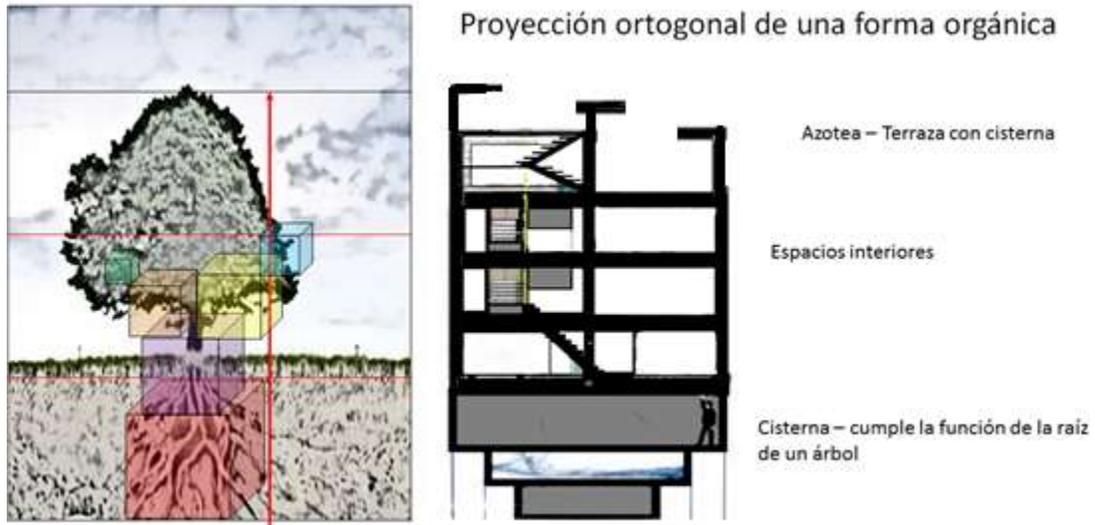


Fig. 124. Imitando a la naturaleza. Elaboración propia

Este edificio tiene integradas cisternas que captan agua pluvial, como las raíces de un árbol, la cual se almacena en un sistema de escurrimientos. Y sus elementos arquitectónicos van de mayor a menor escala. Para lograr que los elementos arquitectónicos, se reduzcan en sus losas y paredes, conforme se va subiendo en pisos. Se utiliza una estructura con vigas I, embebida en concreto, imitando la construcción del Seagram. Entonces se tendría una estructura de acero diferenciada, sobre de la base de la planta baja, con un área de  $9.5m \times 9m.$ , para dejar  $50cm.$ , donde colocar otros elementos. Para captar el agua se utilizan a los costados acueductos, así se capturan los escurrimientos de agua en las temporadas de lluvias.

Los soportes de las sombrillas, se puede ver son una extensión de la estructura metálica de la esquina izquierda de atrás del edificio, el pilar de en medio y por último la estructura de la esquina derecha del frente del edificio. Al final de cada extensión se explicó que hay una losa para soportar elementos: en esta caso las sombrillas. Es una losa delgada, con terminaciones metálicas que permiten el ensamble. Esto hace que las sombrillas puedan montarse y desmontarse a voluntad, cuestión pensada así para aumentar la utilidad de estos elementos; tanto al momento de darles mantenimiento; cambiarlos de lugar, renovarlos o incluso cambiar de diseño de sombrillas.

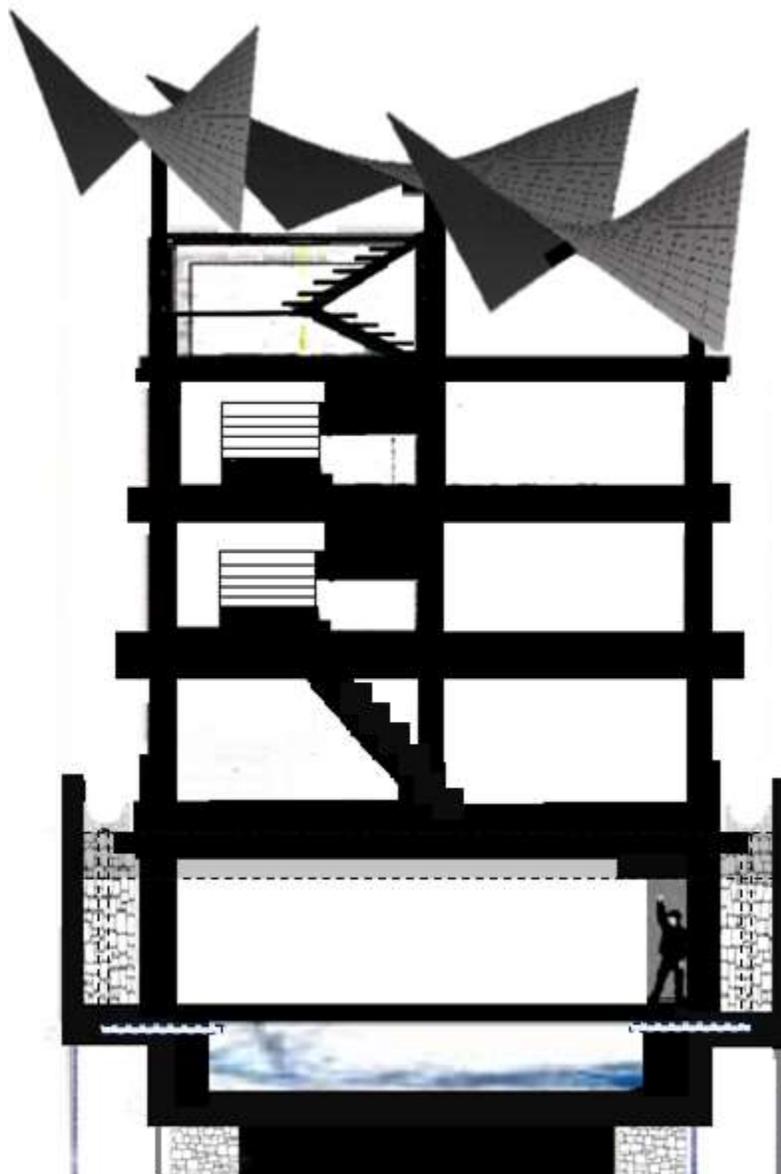


Fig. 125. Diagrama de la estructura. Elaboración propia

El diagrama expresa la forma del edificio, se mencionó que lleva muchos cambios dimensionales, los cuales se irán observando. Se hacen ajustes, particiones y segmentos, para la formación de elementos arquitectónicos. Las sombrillas o estelas de la terraza jardín y mirador sirven tanto para cubrir del sol, como para direccionar los escurrimientos de las lluvias, fuera del edificio. Para que caigan en el jardín trasero, recorriéndose hacia los acueductos y las escaleras de entrada con dirección hacia el alcantarillado. Una vez ya se captó el agua pluvial, de los muros los del último piso, son los más esbeltos de todo el edificio. Igualmente las losas de cada piso, se van reduciendo en espesor; pasando de una losa en el planta baja de *30cm.*; a una de *25cm.*; luego a una de *20cm.*; y finalmente una de

15cm., para el techo del cuarto de servicio en el jardín terraza, esa losa sirve de mirador. También las sombrillas de la terraza y mirador tienen losas de 10cm., para soportarlas.



Fig. 126. Varillas y sus dimensiones. Elaboración propia

Incluso los cambios dimensionales propios de los materiales, presentan variaciones de fábrica, que permiten configurar los aspectos multidimensionales. Así se puede proceder a ordenar los diferentes elementos arquitectónicos del edificio, logrando los cambios dimensionales, que van de una escala mayor a una menor. La utilización de elementos más esbeltos conforme se sube en pisos, obedece no solo a la imitación de la naturaleza, sino a la cuestión de ahorro de recursos materiales. Los cambios dimensionales de los materiales, en general no tienen que con factores comerciales ni de ahorro de materiales, aquí actúan las leyes de la física. Pues a base de experimentos, en el campo de las estructuras. Se lograron estandarizar, las dimensiones más funcionales de los materiales, para construir ensambles de los mismos. Pues una estructura de pequeñas dimensiones, va a necesitar materiales de menor envergadura, que los de una mega estructura. Gracias a esto, en el aspecto de diseño y con las consecuencias que deja el manejo del espacio multidimensional y el diseño arquitectónico fractal, se pueden hacer muchas combinaciones funcionales. De cómo se quieren los cambios dimensionales, entre los elementos de la obra de arquitectura, una vez se materializa esta.



Fig. 127. Proporciones de las plantas. Elaboración propia.

Cada caja del edificio, es proporcionalmente más chica que la anterior, esta característica es una de las características fractales. Las medidas van cambiando según el espacio multidimensional, este recurso es un apoyo al realizar el diseño arquitectónico, pues brinda infinitud de posibilidades para el diseño. Al poder manejar múltiples cambios dimensionales, sin restricciones en el espacio, para darle forma al diagrama arquitectónico. La estructura de acero, debe ser un cuerpo único, el cual cuenta con la característica de poder ser sumergido en concreto. Se piensa básicamente hacer un casco con el elemento base-cimiento, cimientos, cisterna doble, sótano y pasillo para dar mantenimiento a la cisterna y losa de planta baja.

Este sólido es importante que sea un cuerpo arquitectónico único. Y sobre este se tendrá la base para instalar las vigas y construir los pisos arriba.

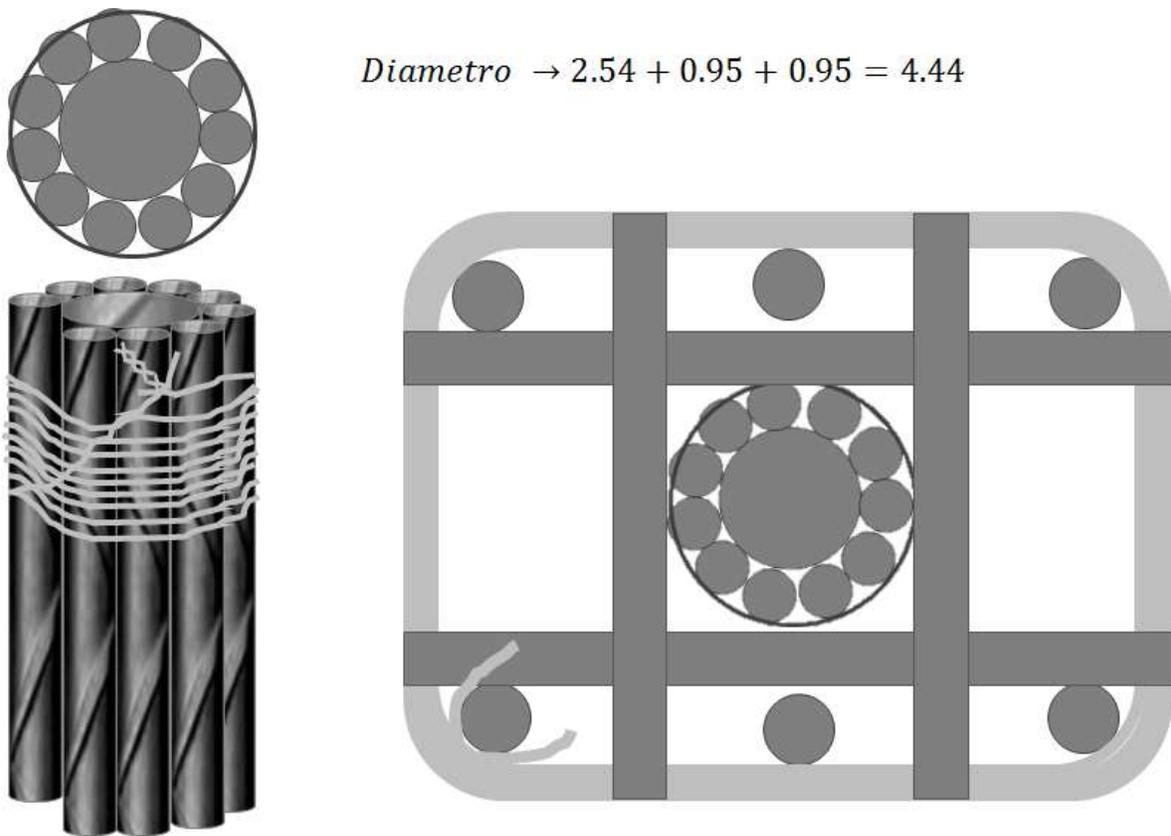


Fig. 128. Amarres de varilla para crear los castillos. Elaboración propia

El castillo tiene un núcleo de una varilla de una pulgada rodeada de varillas de tres octavos, en la gráfica once varillas de tres octavos le dan la vuelta a una de una pulgada, este es el núcleo del castillo. Los estribos están hechos con varilla de tres octavos, para abrazar a las varillas de media pulgada, que sostienen el castillo. Y finalmente las varillas que atraviesan de lado a lado del estribo, son para fijar en el centro el núcleo.



Medidas
10 × 20 × 40cm
12 × 20 × 40cm
15 × 20 × 40cm
20 × 20 × 40cm
25 × 20 × 40cm



Medidas
6 × 12 × 24cm
5 × 12 × 27cm
5.5 × 12 × 24cm
7 × 14 × 28cm

Fig. 129. 'Cambios dimensionales en tabiques y Blocks'. Elaboración propia

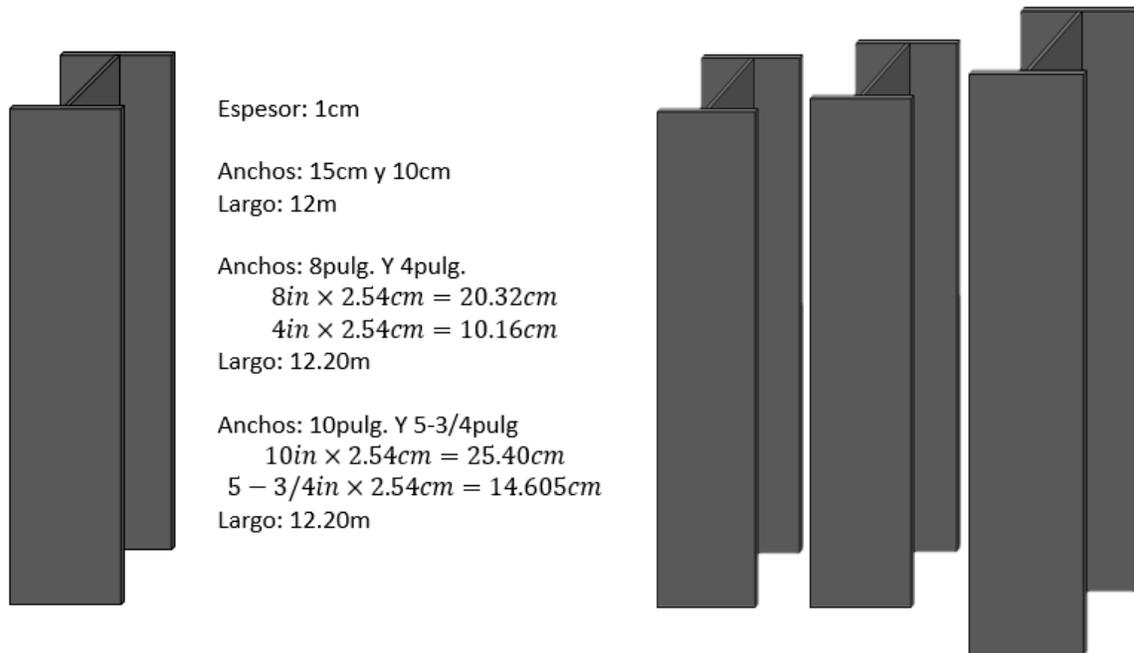


Fig. 130. 'Cambios dimensionales en vigas'. Elaboaración propia

El armado de un castillo también supone cambios de dimensiones: para acomodar las vigas y elementos cortantes y muros, se analiza la técnica utilizada por Mies en la formación de las vigas y los muros que delimitan el edificio "Minerals and Metals Building".

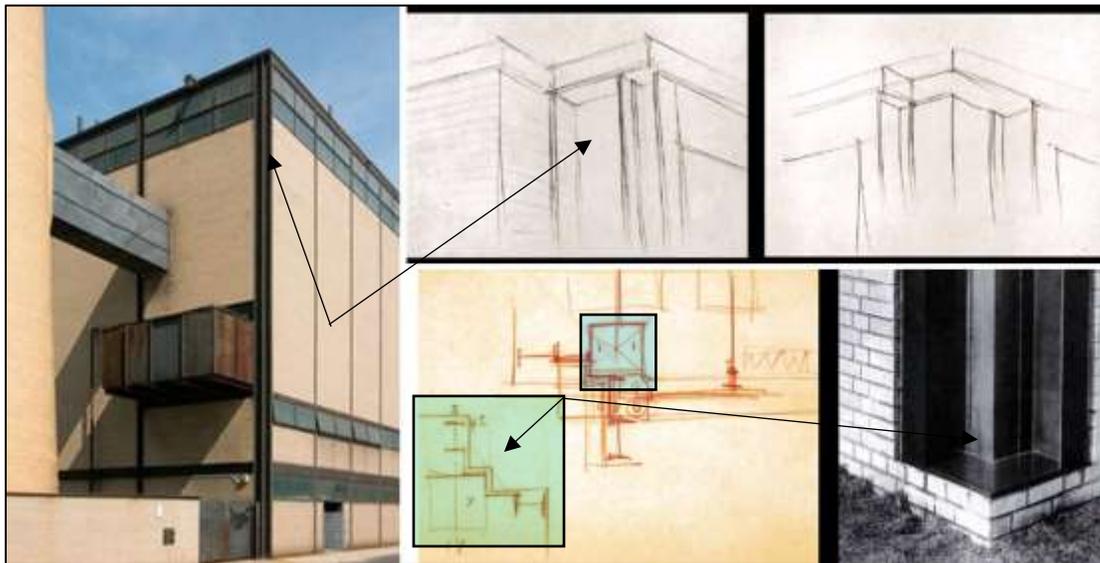


Fig. 131. Efectos del diseño arquitectónico. Fuente imágenes<sup>252</sup>

<sup>252</sup> Mies van der Rohe. "Minerals and Metals Building". 1943. Plan of Illinois Institute of Technology. 14 Ene. 2021. < <https://arch.iit.edu/about/minerals-and-metals-building>>

Mies<sup>253</sup> estudió la forma de hacer una estructura de acero, el objetivo en este caso, es lograr hacer un manejo óptimo de los elementos arquitectónicos y formarlos de tal manera que se logren ir integrando elementos. Esto dará como resultado, que cada nueva sección, a pesar de ser auto similar a la anterior tenga una dimensión diferente. El conjunto total y sus cambios dimensionales, son los que se considera, tendrán detalles de cualidad fractal. El casco de concreto de la planta baja, tiene su barda perimetral, un acueducto de mampostería y con conductos que dan a la cisterna para captar el agua pluvial. Esta debe estar sellada para que una vez que se llene el agua llene los conductos y lo que sobre se deslice hacia la calle. Se hacen aproximaciones a manera de práctica, para formar las paredes laterales y trasera de la P.B. Por ejemplo, con block de cemento de  $10 \times 20 \times 40cm$ .

$$\text{Largo muros laterales P.B.} \rightarrow \frac{9.5cm}{.4} = 23.75$$

Si se quiere un muro de  $9.5cm$ ., equivalente a uno de  $9.5m$  en una escala de 1:100, una línea de casi 24 blocks. Sería el largo del muro, para la altura:

---

<sup>253</sup> “And this is a very, very interesting development in the idea of architectural ornament. We're a long way from Semper's knot, but what is similar to Semper's knot, or the ornament of Semper's weaving, is its representational function for what is, in fact, a constructional and structural vocation. This I-section in front of the glass is playing the role that in architectural terms, we call a mullion. And the series of mullions in front of the glass-- because of that one flat plane of the I-section-- actually creates a virtual plane that is parallel to, but in front of, the glass itself... You don't actually see the Seagram Building as you're coming down Park Avenue. You first see only the gap... Of course, the structure of the Seagram Building is based on a steel frame. The issue is that because of American building code, the steel cannot be exposed. It cannot even be made visible. The reason is that a steel frame, in the case of an accidental fire-- exposed steel runs the risk of softening and failing structurally. So building codes require that the steel frame be clad in an insulating material, usually concrete. And that's the case at Seagram. Even though it's actually made of a steel frame, the entire steel frame is encased in concrete... We're a long way from Semper's knot, but what is similar to Semper's knot, or the ornament of Semper's weaving, is its representational function for what is, in fact, a constructional and structural vocation”. (Hays “Lecture 6.5. The Seagram Building”).

“Y este es un desarrollo muy, muy interesante, en la idea del ornamento arquitectónico. Estamos muy lejos del nudo de Semper, pero lo que es similar al nudo de Semper o al ornamento del tejido de Semper, es su función representativa de lo que es. De hecho, una vocación constructiva y estructural. Esta sección en I frente al vidrio, está jugando el rol de lo que llamamos parteluz, en términos arquitectónicos. Y la serie de parteluces frente al vidrio – debido a ese plano de la sección en I – en realidad crea un plano virtual que es paralelo, pero frente al vidrio mismo... Tú en realidad no puedes ver el edificio Seagram al bajar por Park Avenue. Primero ves solo la brecha... Por supuesto, la estructura del edificio Seagram se basa en un marco de acero. El problema es que debido al código de construcción estadounidense, el acero no puede estar expuesto, ni siquiera se puede hacer visible. La razón es que un marco de acero, en el caso de un incendio accidental, corre el riesgo de ablandarse y fallar estructuralmente. Por lo tanto, los códigos de construcción exigen que la estructura de acero esté revestida con un material aislante, normalmente hormigón. Y ese es el caso en el Seagram, aunque en realidad está hecho de un marco de acero, todo el marco de acero está revestido de hormigón... Estamos muy lejos del nudo de Semper, pero lo que es similar al nudo de Semper, o al adorno del tejido de Semper, es su función representativa. por lo que es, de hecho, una vocación constructiva y estructural...” (Trad. Propia).

$$\text{Altura pared PB} \rightarrow \frac{3\text{cm}}{.10\text{cm}} = 30$$

Luego

$$30 \times 24 = 720 \text{ blocks para formar un muro}$$

Los calculos anteriores son estimaciones y aproximaciones, a lo que vendría siendo el volumen de cada elemento, sus dimensiones se aproximan con las operaciones (base, altura y espesor). Al hacer cálculos con longitudes, áreas y volúmenes, se obtiene una población de datos. Con estos es posible hacer aproximaciones y estimaciones de la cantidad de materiales que se estaran utilizando. Un análisis detallado de esta y muchas otras variables, se facilita con el método de *ingeniería arquitectónica*, pues se tiene la forma canónica desde donde hacer múltiples combinaciones. Con las cuales se hacen cambiar los elementos arquitectónicos, como el orden y la disposición, a esto es a lo que ayuda tener el espacio dividido con los *paneles de Fibonacci*. El efecto que se logra con el método iterativo y multidimensional, es que hay muchas opciones para mover y cambiar el espacio, que define el diagrama.

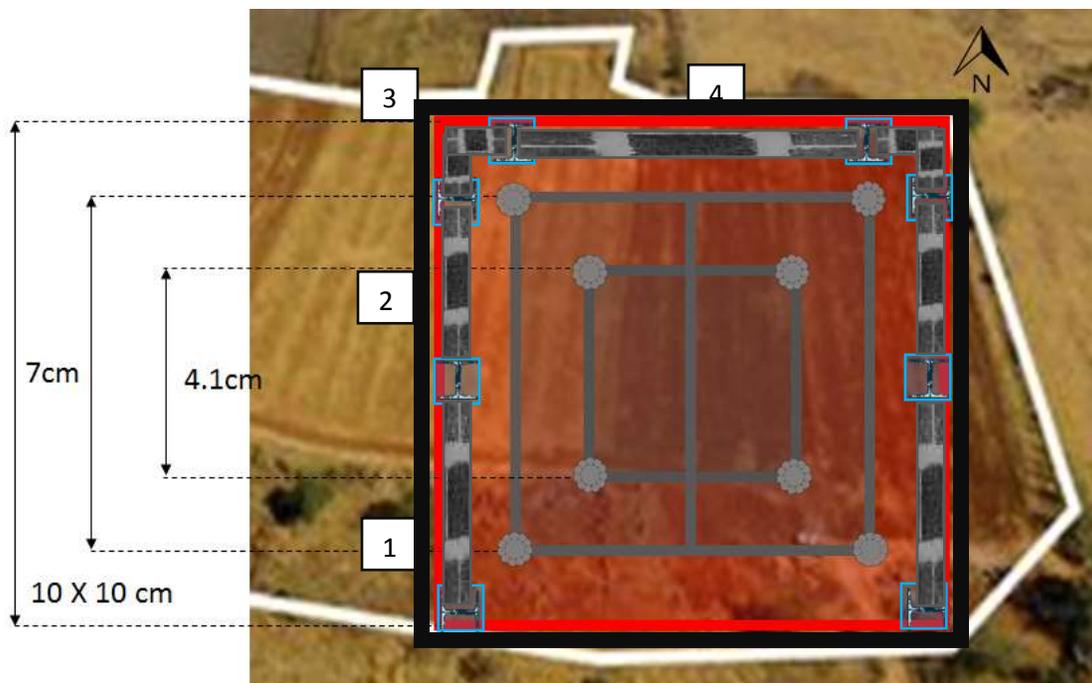


Fig. 132. Ordenación de elementos arquitectónicos. Elaboración propia

En la figura anterior, se marca de rojo, el espacio donde se instala el acueducto receptor de agua pluvial. La idea del casco *Base – Cimientos → Cisternas → Sótano → losa P.B.*,

es tener un elemento sólido, en donde se ensamblen las vigas, se instalen las losas y se construyan los muros de pisos arriba. A lo cual es plausible observar algunas experiencias del pasado, en orden de tener la idea de los que se necesita para tener unos buenos cimientos:

“Con mucho acuerdo y consejo de experimentados se debe cimentar en suelos no conocidos para no caer en irremediables hierros... porque edificado un templo de más de cincuenta pies de ancho con ocho tercias de grueso de pared y para cubrirse de bóveda plantado sobre la tierra sin cimiento alguno... por el consejo de un grande arquitecto... Los religiosos lo creyeron como maestro... más a quien de los suyos los desengañaba con la razón y la verdad que después de levantadas y enrazadas las paredes conocieron el hierro...”<sup>254</sup>

Cada uno de los elementos de la estructura, tiene al menos tres elementos de diferentes dimensiones. Incluso al observar el manejo que hace Mies, de elementos como las vigas de acero, se puede pensar en utilizar otro método diferente del canónico o geométrico. Utilizando lo que se conoce por Geoffrey Broadbent<sup>255</sup> como el método icónico, en donde se toma como punto de partida una arquitectura existente, para imitar la configuración del espacio que este tiene.

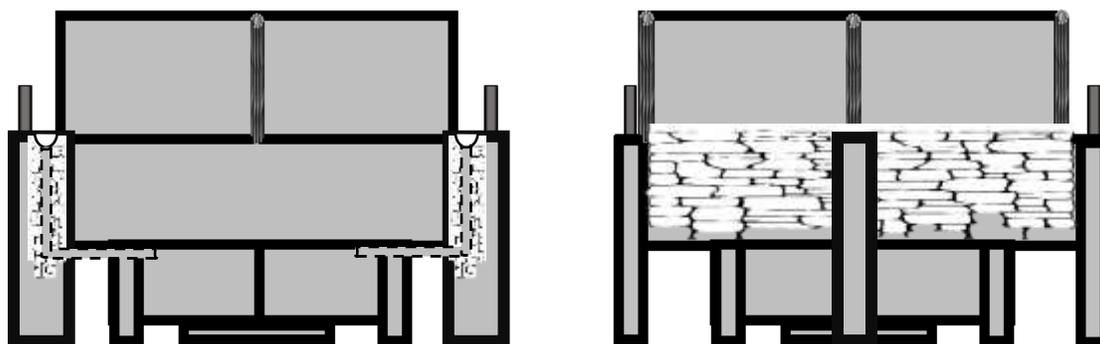


Fig. 133. Diagrama casco “elementos: base-cimiento, cisterna, sótano y PB”. Elaboración propia

Una vez que se tengan los tres cambios de dimensión en el perímetro, entonces, se procede a utilizar la técnica de auto similitud. La idea es que cada uno de los pisos, sean iguales aunque su estructura vaya cambiando de dimensión, es decir se van haciendo más esbeltas. La regla de *auto similitud*, se aplica a cada piso superior y sus muros ornamentales. El casco que forma la base, las cisternas y el sótano de servicios, es la estructura más gruesa (comparada contras las cajas de los pisos arriba del edificio).

<sup>254</sup> San Miguel, Fray Andrés De. Obras de Fray Andrés De San Miguel (1577-1652). [Introducción, notas y versión paleográfica. Eduardo Báez Macías]. México: Instituto de Investigaciones Estéticas UNAM, 2007.

<sup>255</sup> Arquitecto originario de Inglaterra, académico y profesor emérito, autor en teoría de la arquitectura, especialmente en semiótica.

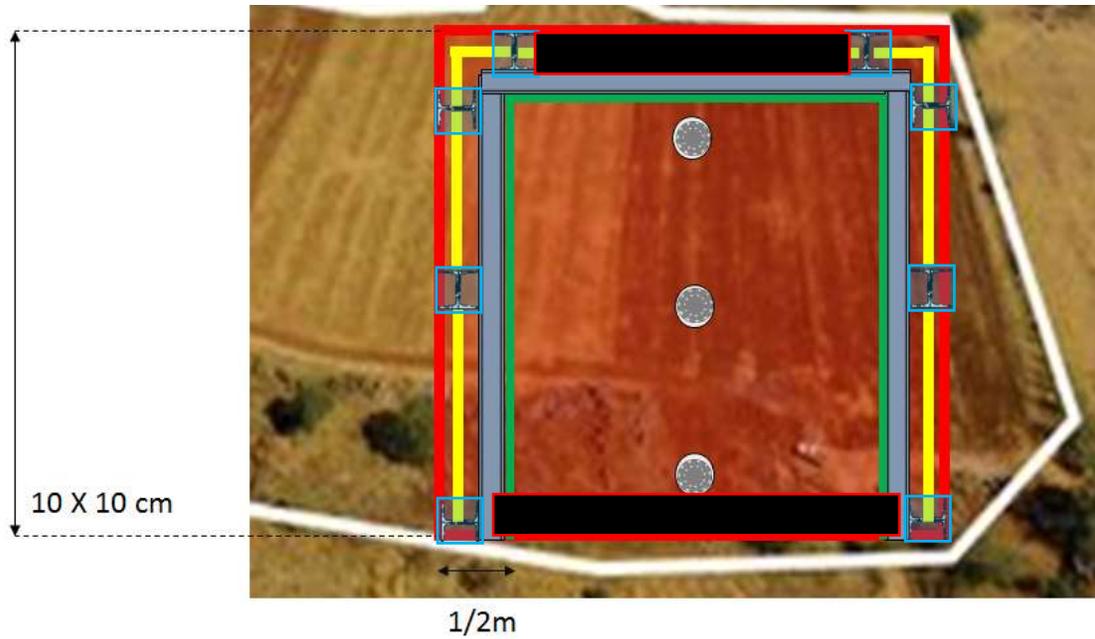


Fig. 134. Paredes de la PB. Elaboración propia

Con el cuadrado perimetral, se marcan los cambios dimensionales; el rectángulo gris paredes del edificio; los rectángulos negros con margen rojo, conforman la entrada y la parte trasera; los acueductos en las partes laterales, marcados en blanco y negro. Juntan cuatro cambios dimensionales, con los que se construye el perímetro del edificio.

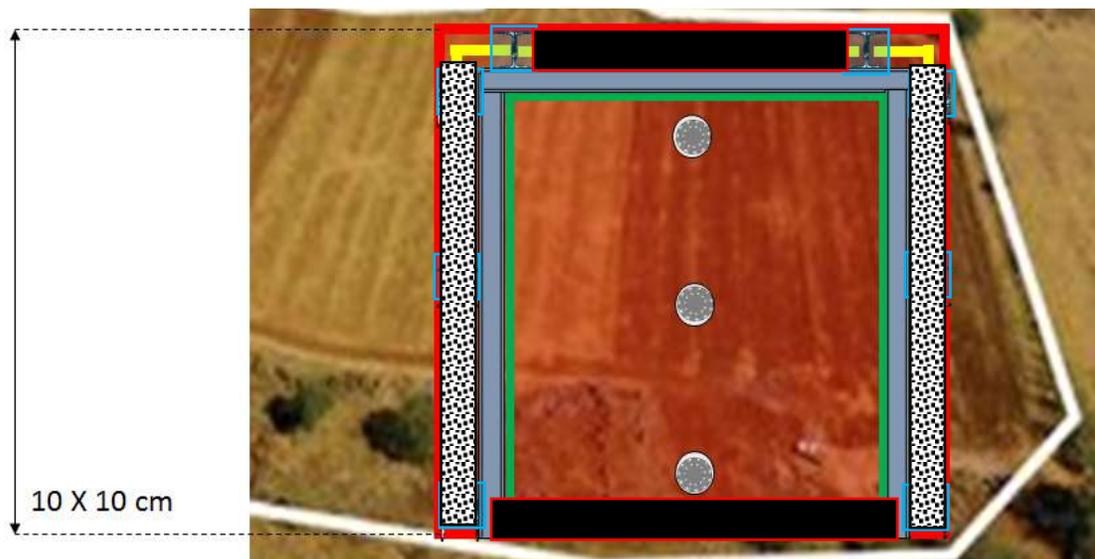


Fig. 135. Paredes de la PB. Elaboración propia

Los acueductos se instalan sobre la losa de la planta baja, que es el cuadrado de diez por diez.

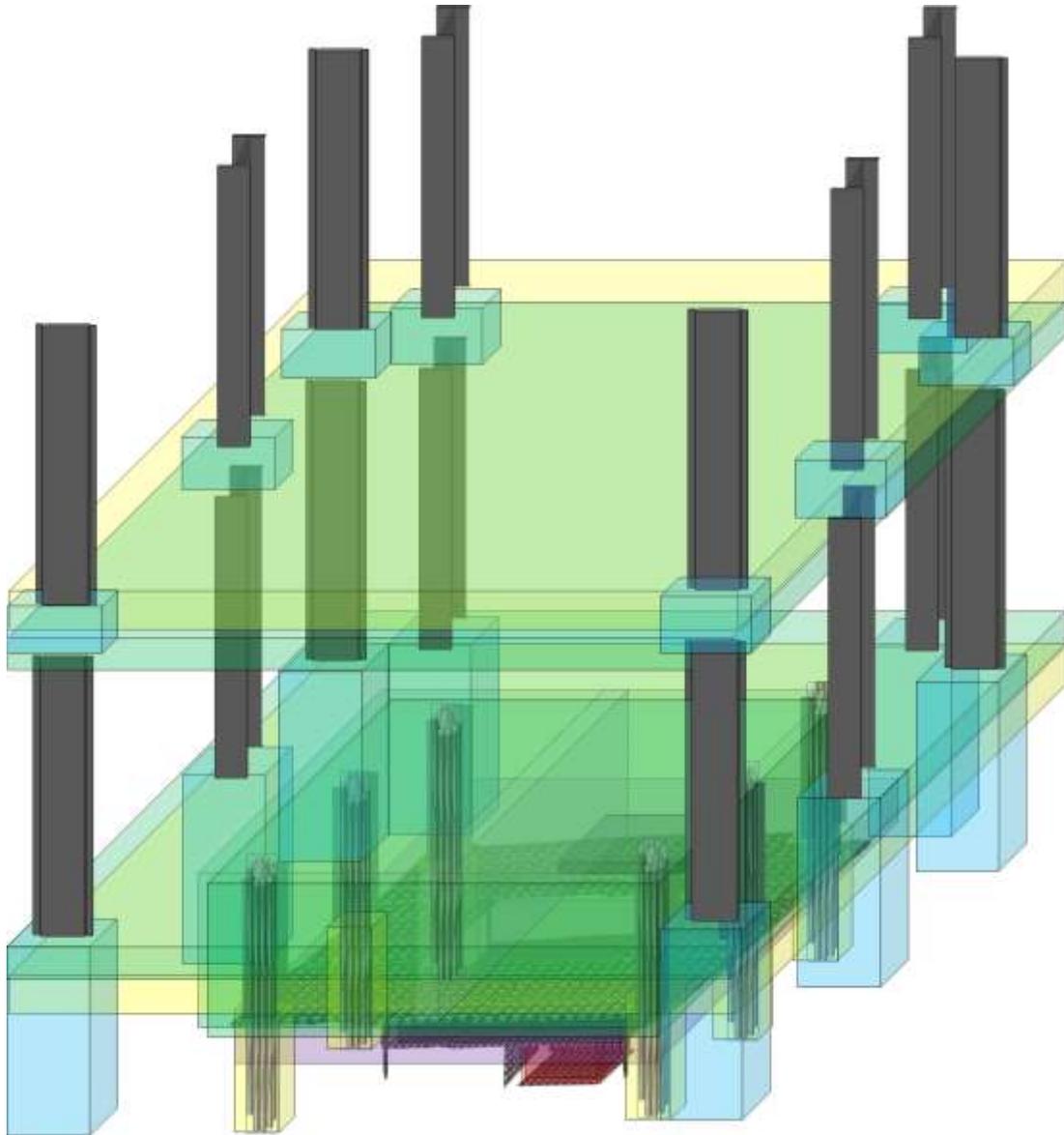


Fig. 136. Pisos auto similares, formados uno tras otro sobre la base. Elaboración propia.

Cada uno de los cambios son geométricos, en general el diseño se apega – por imitación – lo más posible a las estructuras ya analizadas de los edificios. Cuenta con cimientos, pilares, muros y elementos para una estructura básica, sin embargo el objetivo es lograr imitar a la naturaleza. En un proceso de obtención de recursos naturales, imitando en este caso a un árbol, para la obtención por medio de captación y almacenamiento de agua pluvial. Una vez analizados los aspectos que pueden surgir en el proyecto, trabajado con las técnicas de geometría fractal vistas, se saca ventaja del espacio multidimensional. Así teniendo retículas de diferentes dimensiones, se puede prácticamente esculpir el diagrama, creando detalles que van de la gran escala – conjunto arquitectónico –, a la pequeña escala.

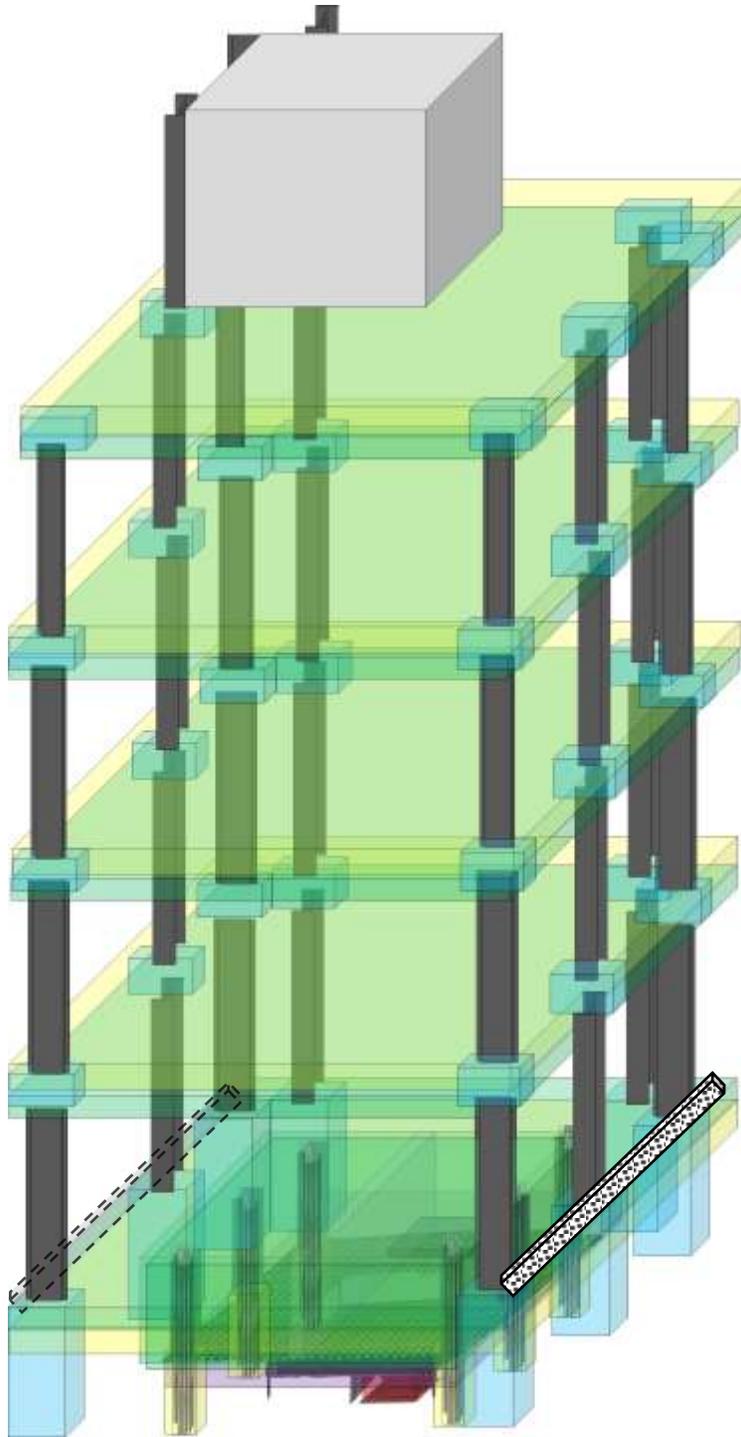


Fig. 137. Cambios de proporciones. Elaboración propia

Cada piso sigue la regla de auto similitud, así en cada uno se muestra la manera en la que las vigas, cambian de dimensión al ir subiendo de nivel. Aunque esto no es algo nuevo, el diseño fue hecho con la finalidad, de que los cambios dimensionales de las estructuras sean aparentes. Logrando que estos cambios sean parte funcional del edificio, bajo el argumento de que: la utilización de una manufactura más esbelta pisos arriba brinda más espacio.

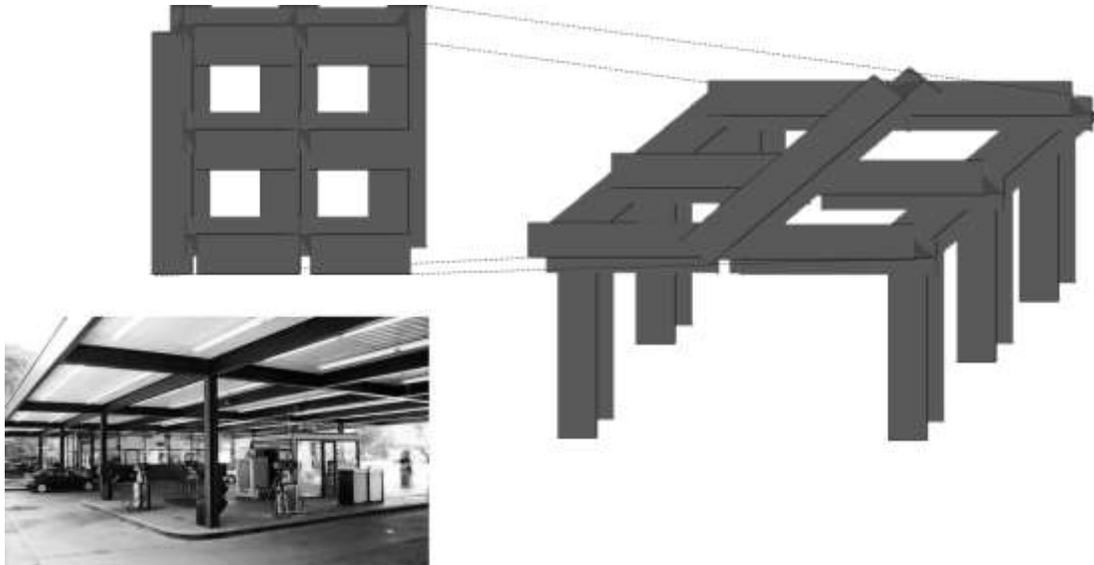


Fig. 138. 'Utilización de vigas siguiendo la forma de la Estación de Gas de Mies'. Fuente<sup>256</sup>

El diagrama da las indicaciones, de la manera en la que el edificio se ensambla, al igual que se hizo con el ejercicio de nodos. Los elementos al ser vigas se tienen que ir ensamblando pieza por pieza, en este caso, cuidando utilizar elementos de escalas diferentes. Así es que desde la estructura, se vigila este aspecto, de incluir cambios dimensionales.

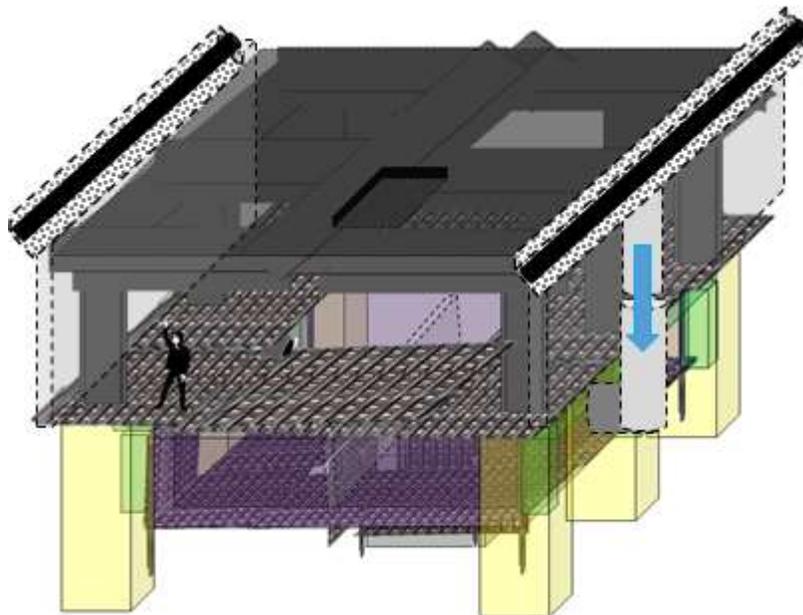


Fig. 139. 'Las cisternas y el sistema de captación de agua'. Elaboración propia.

<sup>256</sup> : Gráfica de elaboración propia. Imagen: Ludwig Mies van der Rohe. "Estación de servicio Mies van der Rohe". 1968. [Es.wikiarquitectura.com](https://es.wikiarquitectura.com). 10 May. 2021 <<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/estacion-de-servicio-mies-van-der-rohe>>

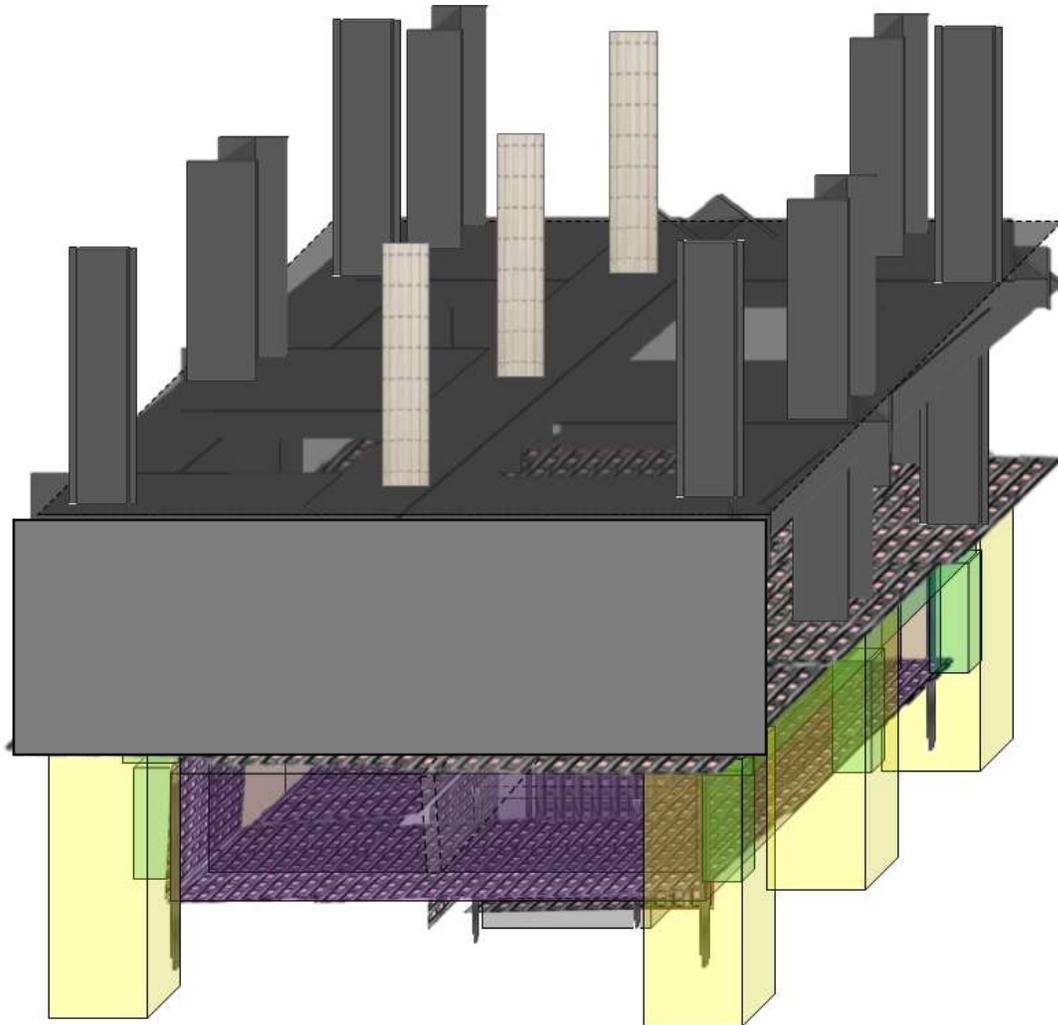


Fig. 140. Primera caja de la base a la PB. Elaboración propia

Con la estructura diseñada, se puede realizar la medición de la dimensión fractal, con la utilización de los paneles para calcular las dimensiones y proporciones de piso. Por ejemplo en el caso del piso, se dividió en nueve fracciones, de tres metros cuadrados cada una. Con este análisis de la dimensión fractal, además de sacar medidas y proporciones, se puede hacer una programación como la hecha al usar la técnica tres. Es decir se fracciona el espacio, una vez fraccionado se configura, hasta terminar de definir el proyecto. Luego se pueden realizar combinaciones, para conocer diferentes variables dimensionales del edificio. En algunos espacios, no se puede realizar ninguna permutación o combinación, sin embargo hay espacios que si lo permiten. Sobre todo con el propósito de hacer un análisis dimensional, que no involucre medidas, sino solo mover los elementos para realizar otras combinaciones.

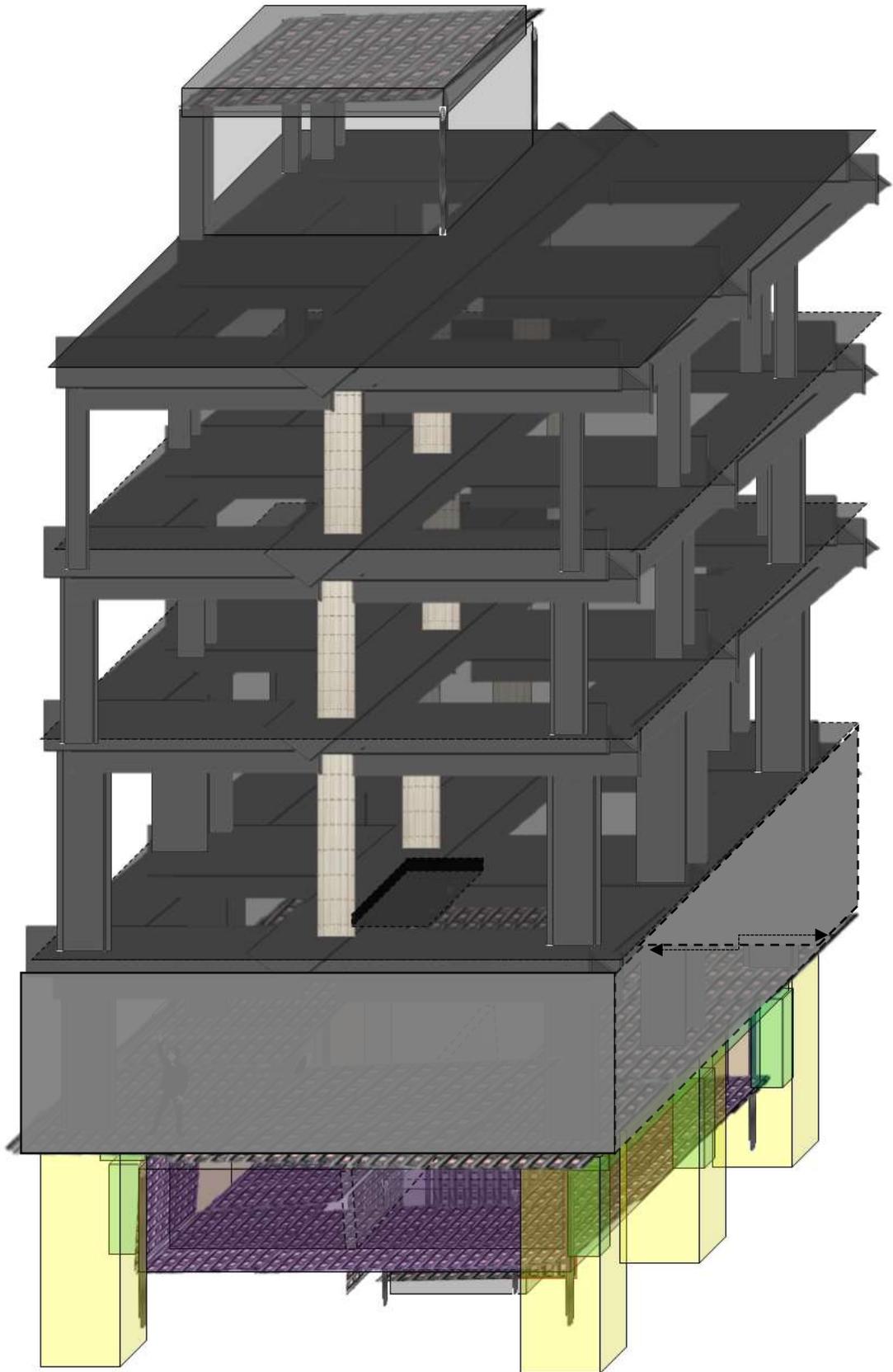


Fig. 141. Cajas totales sus volúmenes, auto similitud y cambios de dimensión

Permutaciones y combinaciones, se pueden analizar sobre el espacio ya configurado y sus elementos arquitectónicos. De estos análisis salen a la luz muchas variables, pues al permutar y/o hacer diferentes combinaciones de la ordenación – una vez ya configurada la arquitectónica por el arquitecto –, se pueden estudiar otras variables a trabajar. Ya sea la luz natural, la ventilación, por ejemplo: al revisar como incide el sol dentro de un espacio, a manera de ejercicio, se realizan iteraciones de un elemento fijo de la arquitectónica. Y con esto se obtienen posibles, cambios de orden a partir de la utilización de un panel. Por ejemplo, en el caso de una habitación, para ver cuál sería el nivel de iluminación que se obtendría y por donde llegaría la luz natural en diferentes horas del día y de estaciones del año.

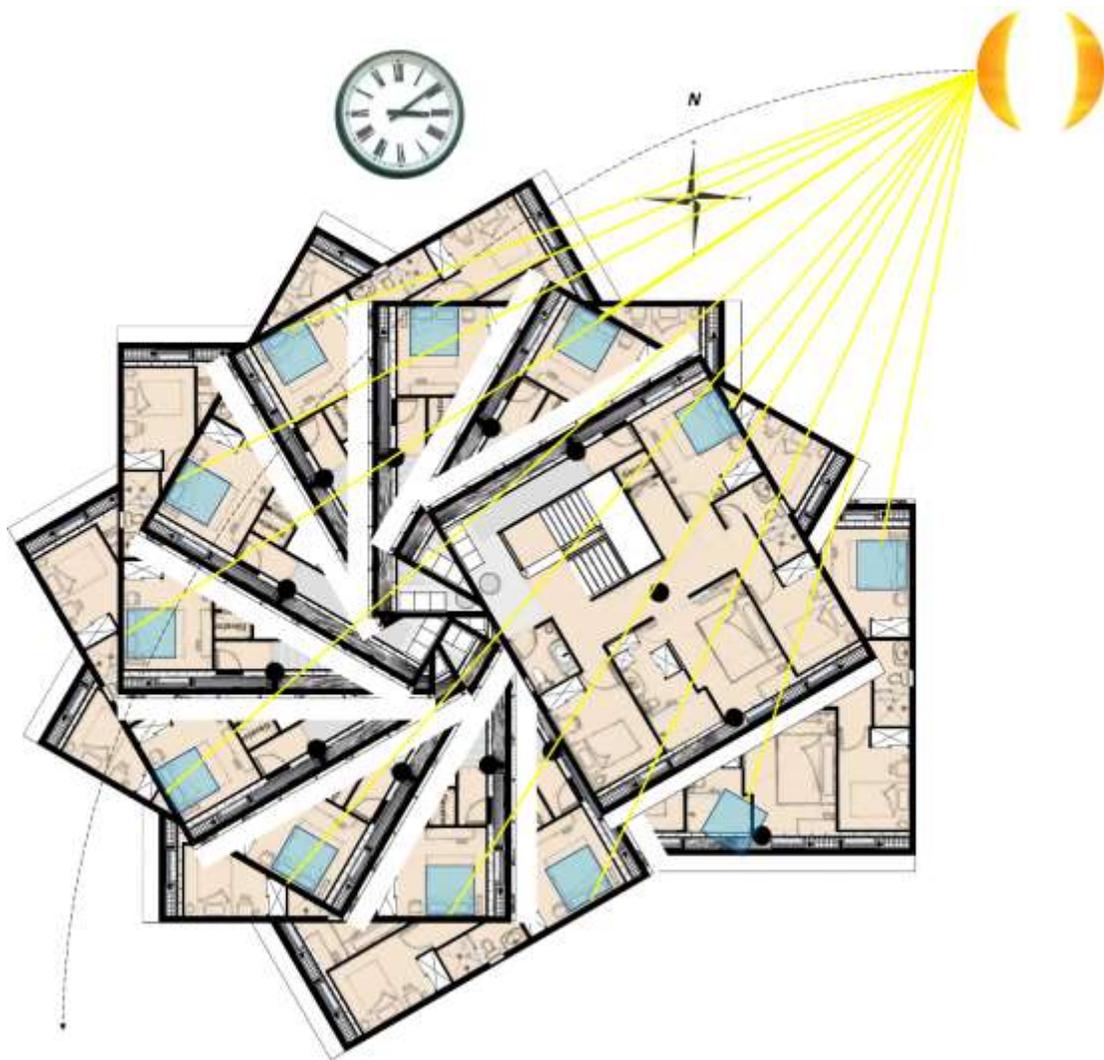


Fig. 142. Las permutaciones y cuestiones de la orientación

La idea de diseño según se mencionó proviene de la domino house, además el diseño cumple, con los cinco puntos para una nueva arquitectura de Le Corbusier. Se diseñaron elementos arquitectónicos multidimensionales, por ejemplo las estelas en la terraza: por su forma sirven para reflejar la luz natural del sol, darle redirección a corrientes de aire; y captar escurrimientos de agua de lluvia. El edificio se nombró el árbol caoba.

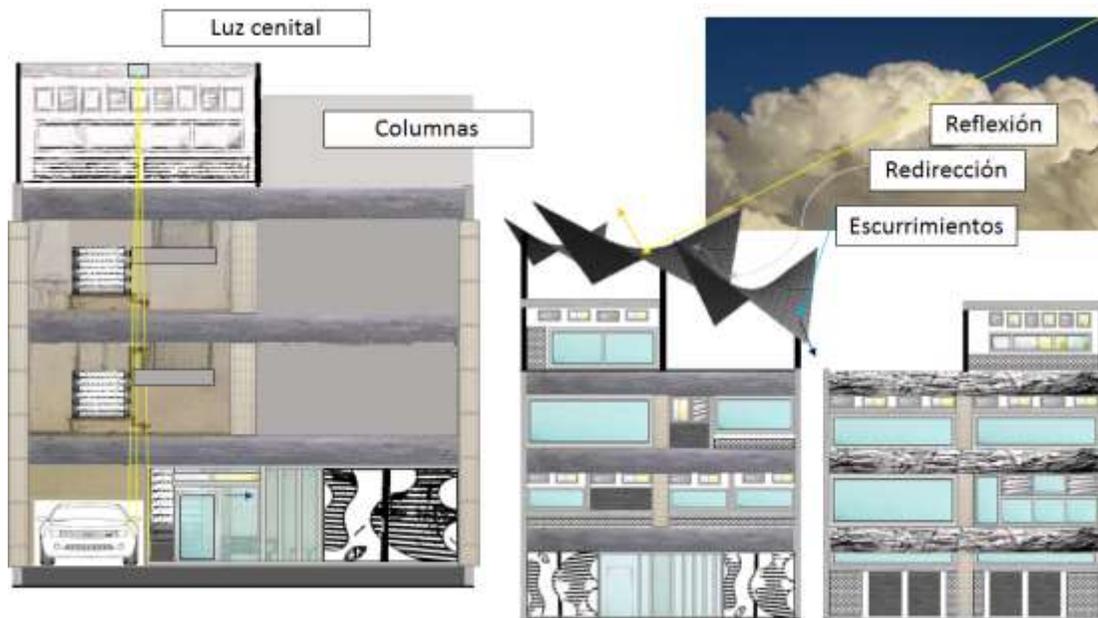


Fig. 143. Espacios exteriores 'Edificio Caoba'. Elaboración propia

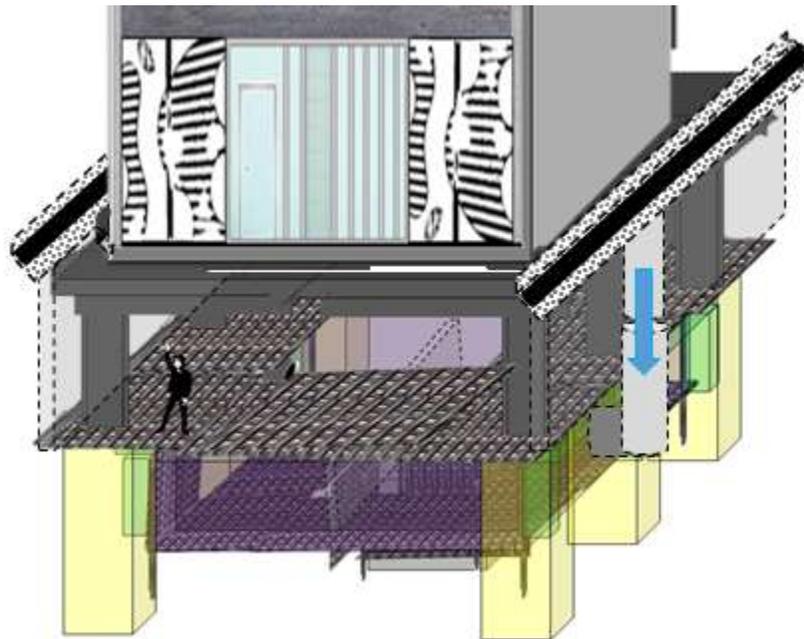


Fig. 144. Sistema de captación de agua 'Edificio Caoba'. Elaboración propia.