





*“El hexágono pavimenta por selección fundamental, por selección natural y por selección cultural.”*

Wasenberg, J. La Rebelión de las Formas

Mi tesis busca hacer una analogía orgánica que relacione las formas de la naturaleza y las formas de la arquitectura. El interés por las estructuras coralinas dio origen a la misma. Estas arquitecturas marinas es el hábitat de miles de especies que tienen su vida bajo el mar en la Gran Barrera de Coral, Australia. Son kilómetros de estructuras vivas que crecen, se transforman y se adaptan a su medioambiente para sobrevivir. Su forma tan compleja, y sencilla a la vez, me llevó a preguntarme cuál es la lógica detrás de su organización.

A través de la naturaleza se observa que la belleza de las formas está en la regularidad, en la repetición del mismo elemento una y otra vez, con un orden geométrico. El panal de abeja es el ejemplo de la perfección de la estructura hexagonal. Este tipo de patrones son enrejados. Comprender la forma en que se construyen estos patrones de la naturaleza es consecuencia de una subdivisión progresiva del espacio a través de fuerzas de la naturaleza. D'Arcy Thompson, en su libro *“On Growth and Form”*, busca causas físicas universales que definan cómo se generan los patrones que componen y ordenan la naturaleza en forma armoniosa.

En el estudio de la composición del coral se vio que la forma platónica que rige es la del hexágono. Este polígono será el foco de la investigación, su forma como módulo unitario es la parte y la sumatoria de los mismos es el todo. Se estudia cómo se organiza y combina esta pieza en la naturaleza.

## LA FORMA EN LA NATURALEZA

La forma en la naturaleza se puede leer a lo largo de la historia cómo distintas interpretaciones. Giordano Bruno comprende que el universo es un conjunto de organismos y que, por ende, la arquitectura debe ser ejecutada como una operación orgánica. Andrea Palladio interpreta la villa en planta como un sistema digestivo, donde los espacios y servicios funcionan como soporte del espacio servido.

Goethe entiende la forma como algo dinámico. Intenta comprender la forma natural y la construida por el hombre. La naturaleza no es un elemento aislado, sino que es parte de un sistema en movimiento. Goethe explica que lo universal es como un caso único y que lo particular son un millones de casos. La *Gestalt* sostiene que la mente se encarga de configurar todos los elementos en su campo de visión por medio de la percepción y la memoria. La psicología Gestalt sostiene que el todo nunca es igual a la sumatoria de sus diversas partes, sino que es algo diferente. Las partes identificadas de manera individual tienen diferentes características al todo. El todo se conforma por este conjunto de partes que, si bien en sí mismas tienen un rol secundario, son menester para comprender el todo como elemento único. La percepción, el pensamiento, el sentimiento y la conducta, se ponen en juego en la persona para comprender el entorno.

La forma total de un organismo está basado en la complejidad de sus ciclo de vida. Existe una tensión entre la forma y lo que se forma. La forma se está formando de manera constante, y así el trabajo debe estar completo. En el espacio de los organismos vivos, la forma interna y la forma externa no pueden ser estudiados por separado. Los organismos son continuos con su entorno. La identidad se basa en patrones, no existe tiempo o límites.

La función en relación a la forma. La función existe como una actividad y genera una "buena forma". Los orígenes de la arquitectura tienen que ver con una impronta del comportamiento que toma forma. Se trata de una sola masa, un solo cuerpo, un solo espíritu. El sujeto existe por medio del objeto. Los peces existen a través del agua. Así pues, la arquitectura es una *Gestalt*, y una *Gehalt*, que le da significado.

Darwin, detrás de la teoría de la evolución, sostiene que no hay especies, sino que hay momentos de forma y estabilidad. Se vive en una continua transformación. Los individuos luchan por sobrevivir, esta es la naturaleza como unidad. Todas las plantas y los animales están relacionados. Todos los organismos vivos están conectados. Todo está evolucionando. La forma en sí está evolucionando.

Hegel cree que la forma en la naturaleza se presenta a través de la regularidad, la simetría, la conformidad a la ley y a la armonía. La belleza en la regularidad consiste en la repetición de una forma única, a la razón abstracta o lógica que hay detrás. La conformidad a la ley tiene que ver con un grado más elevado, la libertad de un ser vivo. La armonía es la relación entre los elementos diversos que forman una totalidad. Lo bello en la naturaleza es la forma primera, la naturaleza es imperfecta. La forma es cultural y dinámica. El arte como forma y contenido, lucha por representarse a si mismo a través de la naturaleza. El arte simbólico, es la unidad de la forma y el contenido.

Dewey sostiene que la intención y el significado son cruciales, la experiencia, la interacción entre los seres humanos y el medioambiente tiene que ver con las creencias, los valores y las intuiciones. El individuo depende de una comunidad para existir.

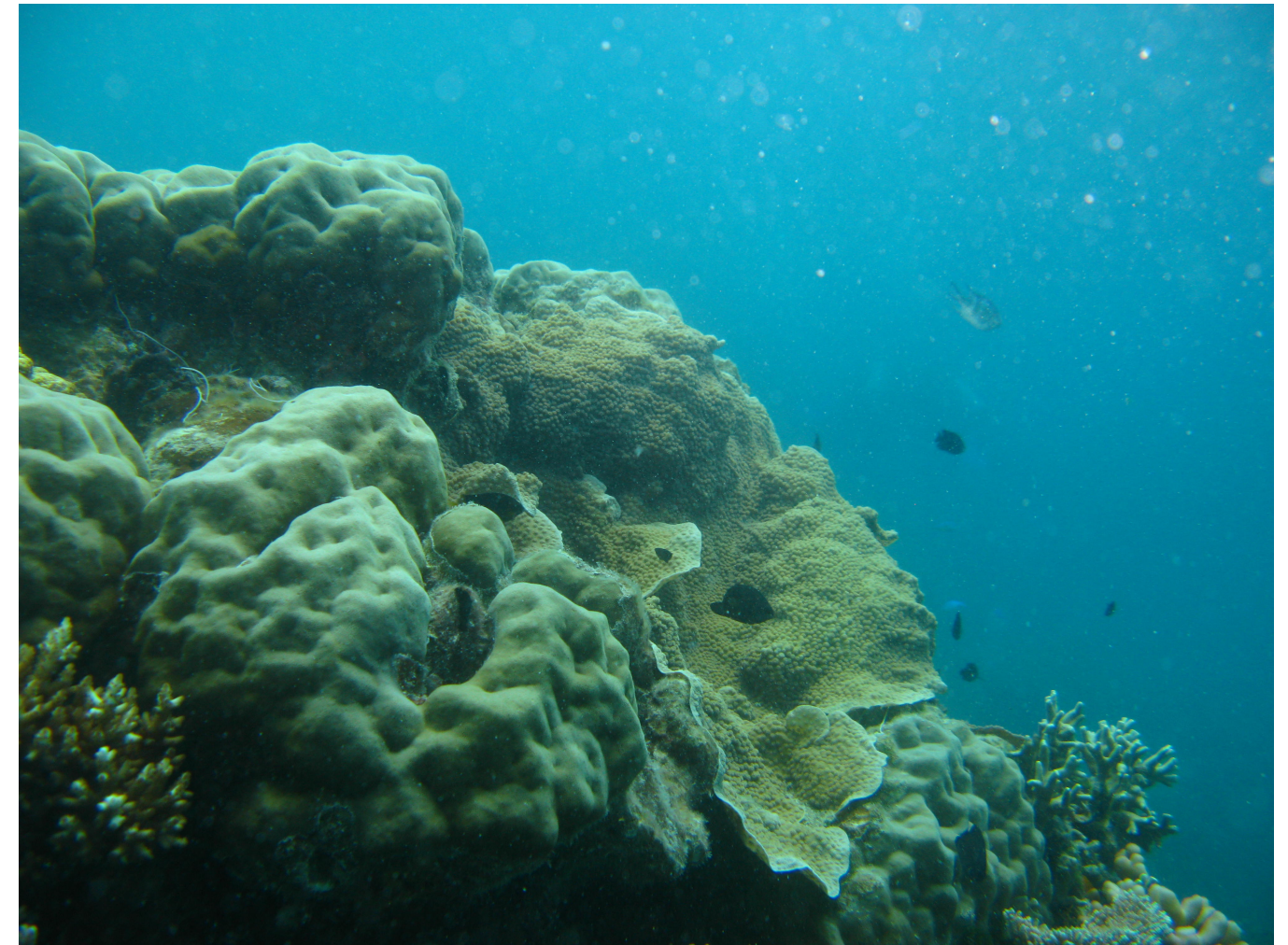
Frank Lloyd Wright, referente de la arquitectura orgánica, explica que la misma debería de relacionarse en tiempo y espacio con el lugar en dónde sucede. Lo natural es que que la arquitectura responda al contexto económico y social en dónde se crea. Los materiales utilizados para la construcción deben resultar en formas coherentes con su naturaleza, en vez de forzarlos a que tomen formas específicas. La naturaleza de los materiales y sus resistencias son menester para la construcción. La forma y la función de la arquitectura debería de ser una sola, lo orgánico están en el espíritu detrás de la expresión natural .



## LA GRAN BARRERA DE CORAL - AUSTRALIA

La Gran Barrera de Coral se encuentra ubicada en el Mar del Coral frente a la costa noroeste de Australia, Queensland. Es el mayor arrecife de coral del mundo. Se extiende 2000 kilómetros de Norte a Sur, y la superficie total abarca más de 350.000 km<sup>2</sup>. Ha sido declarada patrimonio de la humanidad por la UNESCO en el año 1981, ya que en ella habitan una variedad de especies significativa. Se considera a la Gran Barrera de Coral como el ser/animal vivo más grande del mundo, aunque en realidad la misma está compuesta por miles de colonias de corales. En la Tierra se manifiesta como una de las mayores construcciones naturales y vivientes.

Los arrecifes son las grandes ciudades del mar, estos son agrupaciones de alta densidad en donde los habitantes viven uno al lado del otro y comparten recursos para sobrevivir. Los corales son la fundación de estas ciudades y son la casa que habitan miles de especies. La diferencia de las fundaciones que habitamos los seres humanos, los corales son animales vivos. Los *Zooxanthellae* son las algas que viven en simbiosis con el coral. Se necesitan mutuamente para sobrevivir. Los *Zooxanthellae* se posan en el tejido del coral de forma tal de proveerse de nutrientes y la luz necesaria para crecer y reproducirse. Estos organismos son los que le dan los colores a los corales. Los fuertes cambios de la temperatura del agua pueden generar estrés en estos organismos, causando que la muerte de colonias enteras. Esto es lo que se conoce como *coral bleaching*. (blanqueo de coral).





## MANDELBROT

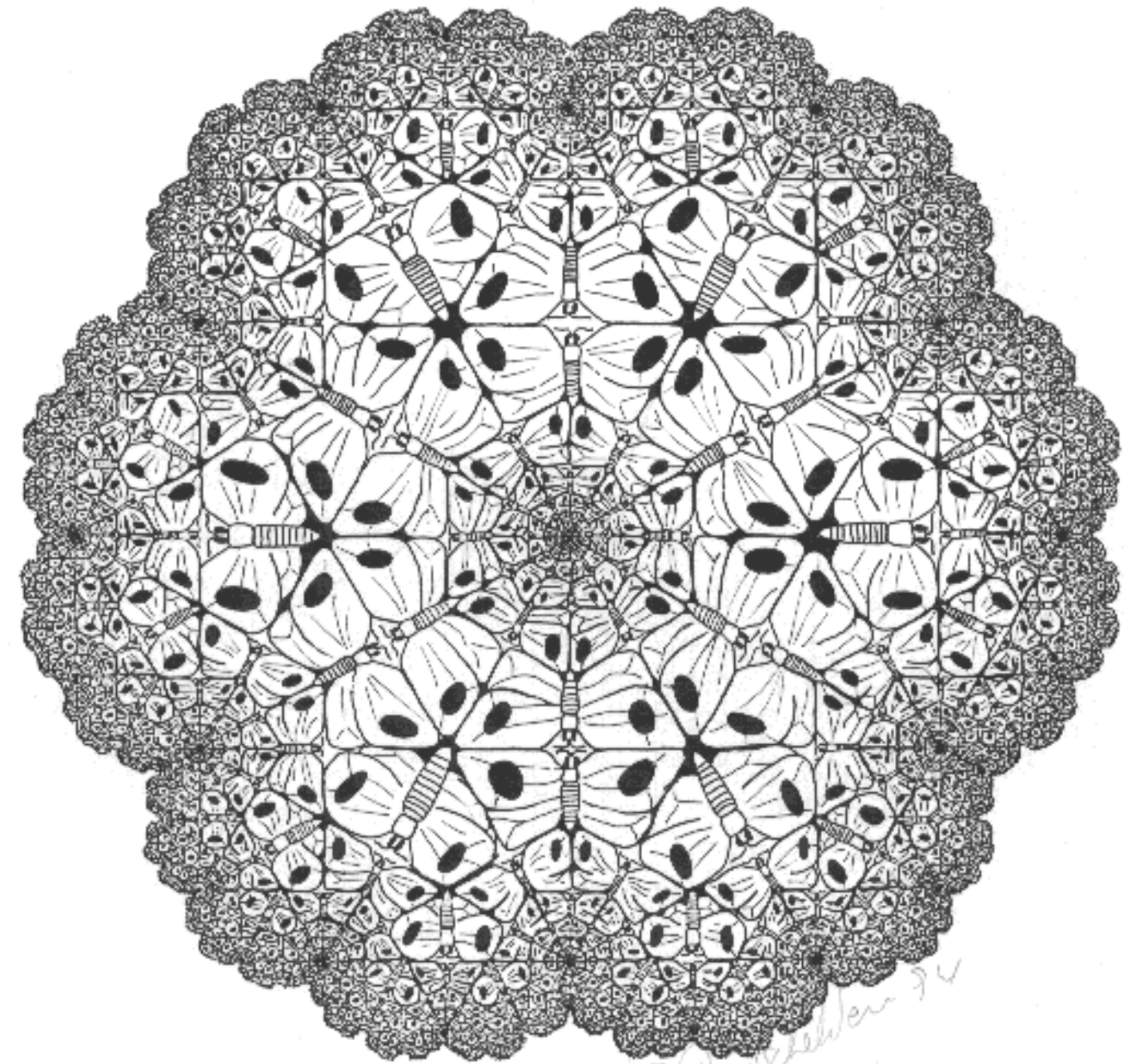
### *Geometría Tradicional vs. Geometría Fractal*

La geometría fractal puede imitar algunos patrones que se encuentran en la naturaleza, de características irregulares. Si bien se parecen a los escenarios naturales, estas son reproducciones artificiales. Elementos de la naturaleza como las montañas, las costas, las nubes, no podían ser descritas a través de las formas geométricas puras como las líneas, los círculos, las elipses y los cuadrados. Los fractales son generados por la computadora y son la reproducción de ciertas formas geométricas puras.

Las formas que se generan a través de este sistema geométrico son en realidad más sencillas de lo que aparentan. Esto se debe a que los detalles son deducidos de una serie de instrucciones que se le dan a la computadora para que pueda realizar el dibujo. Estas formas no se parecen a lo que se conoce dentro de la geometría clásica. La geometría fractal es distinta de la geometría Euclidiana. La cantidad de dimensiones que puede tener un fractal se limita a fracciones.

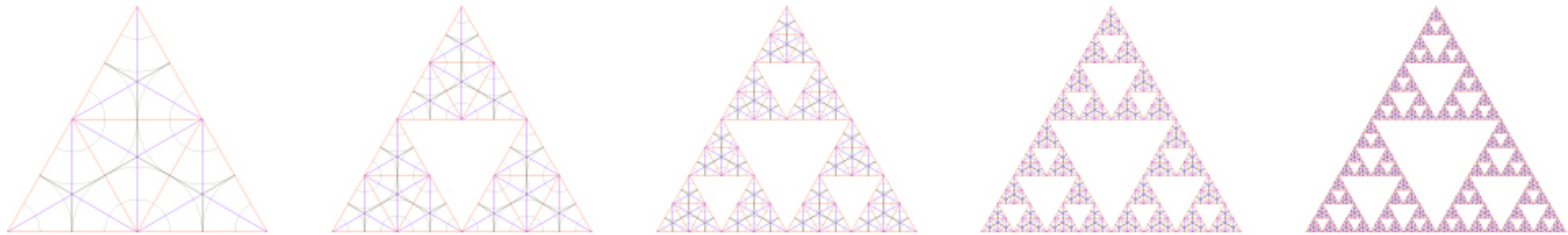
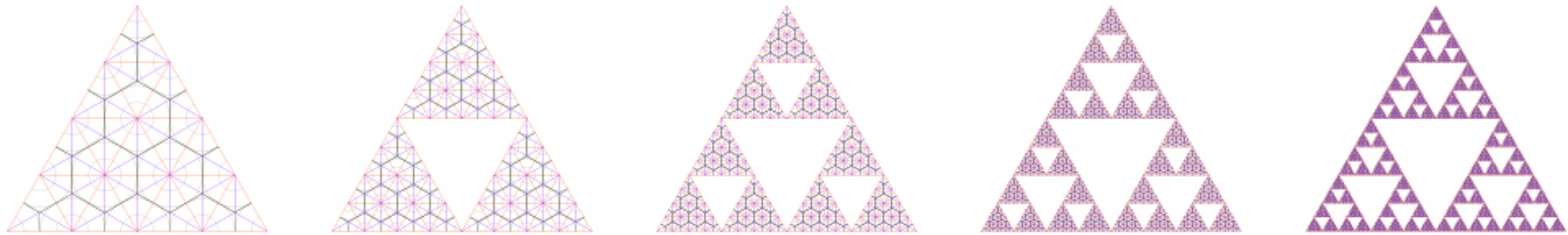
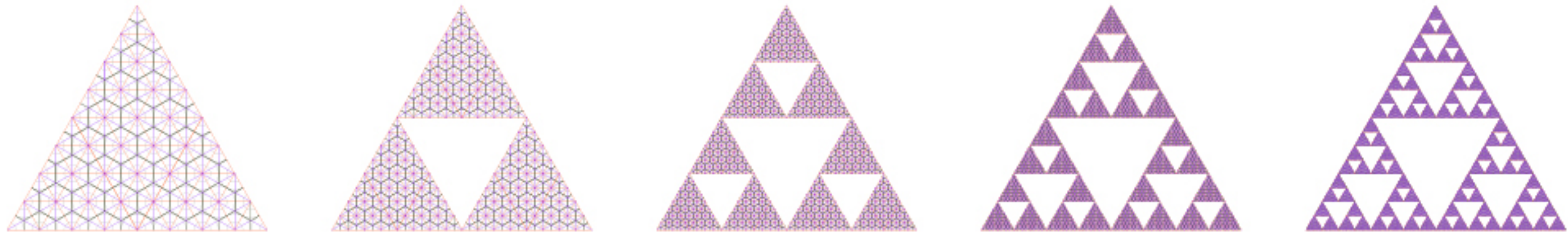
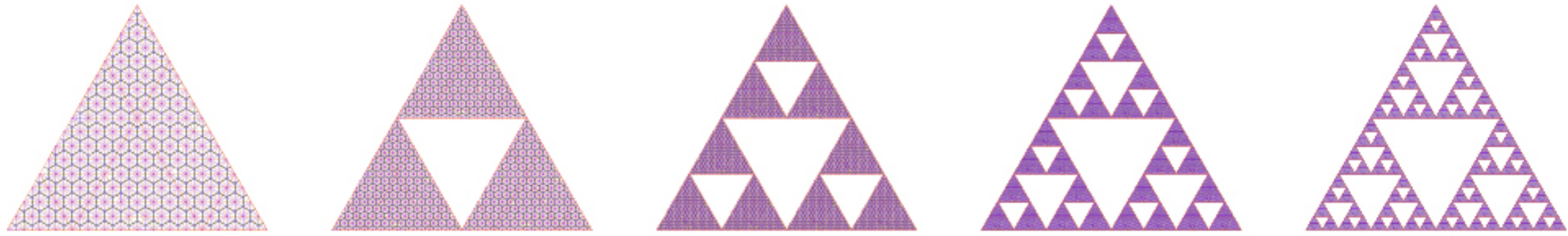
La etimología que refiere a la palabra “fracción” significa un número que se encuentra entre dos números enteros. Siguiendo este razonamiento, una sección fractal puede ser considerada como un estado intermedio entre formas Euclidianas. Las estructuras matemáticas que surgen en el siglo XX para explicar este tipo de objetos que han sido parte de la historia y la naturaleza a lo largo del tiempo han causado una reacción escandalosa. Los matemáticos que han desarrollado los sistemas de generación alegan que su riqueza es tal que puede ir más allá de las “simples estructuras que se ven en la naturaleza”<sup>1</sup>

Dentro de la geometría Euclidiana, se encuentran formas simples como el círculo, el cuadrado, la esfera y el cubo. Son simples ya que se necesita sólo de un parámetro para describirlas. Si existe un segundo parámetro, este guarda relación con la escala de la longitud. Las formas que necesitan varios parámetros para definir las se analizan dentro del marco de la geometría fractal.



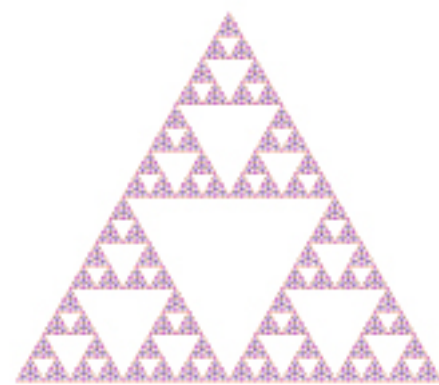
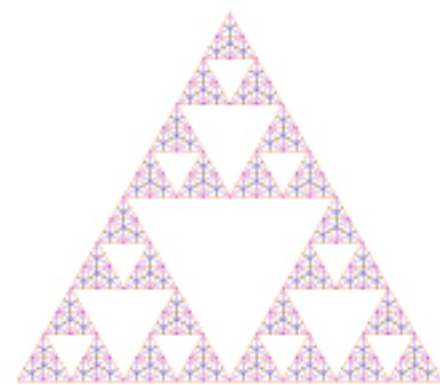
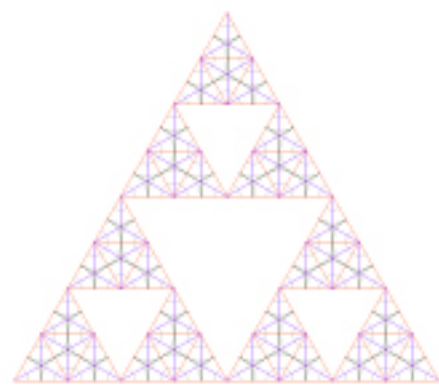
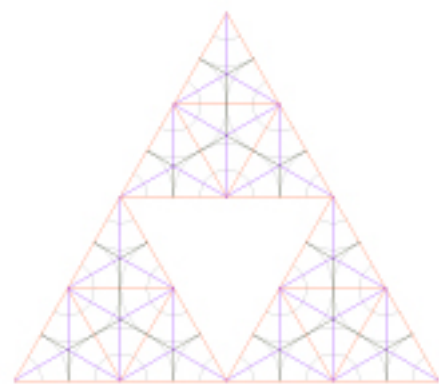
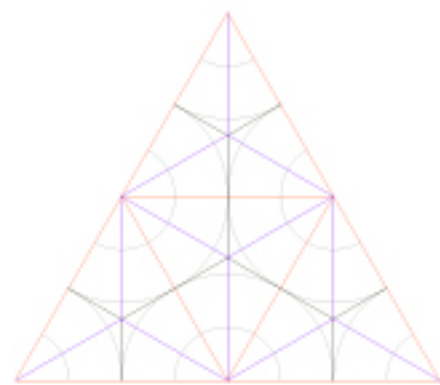
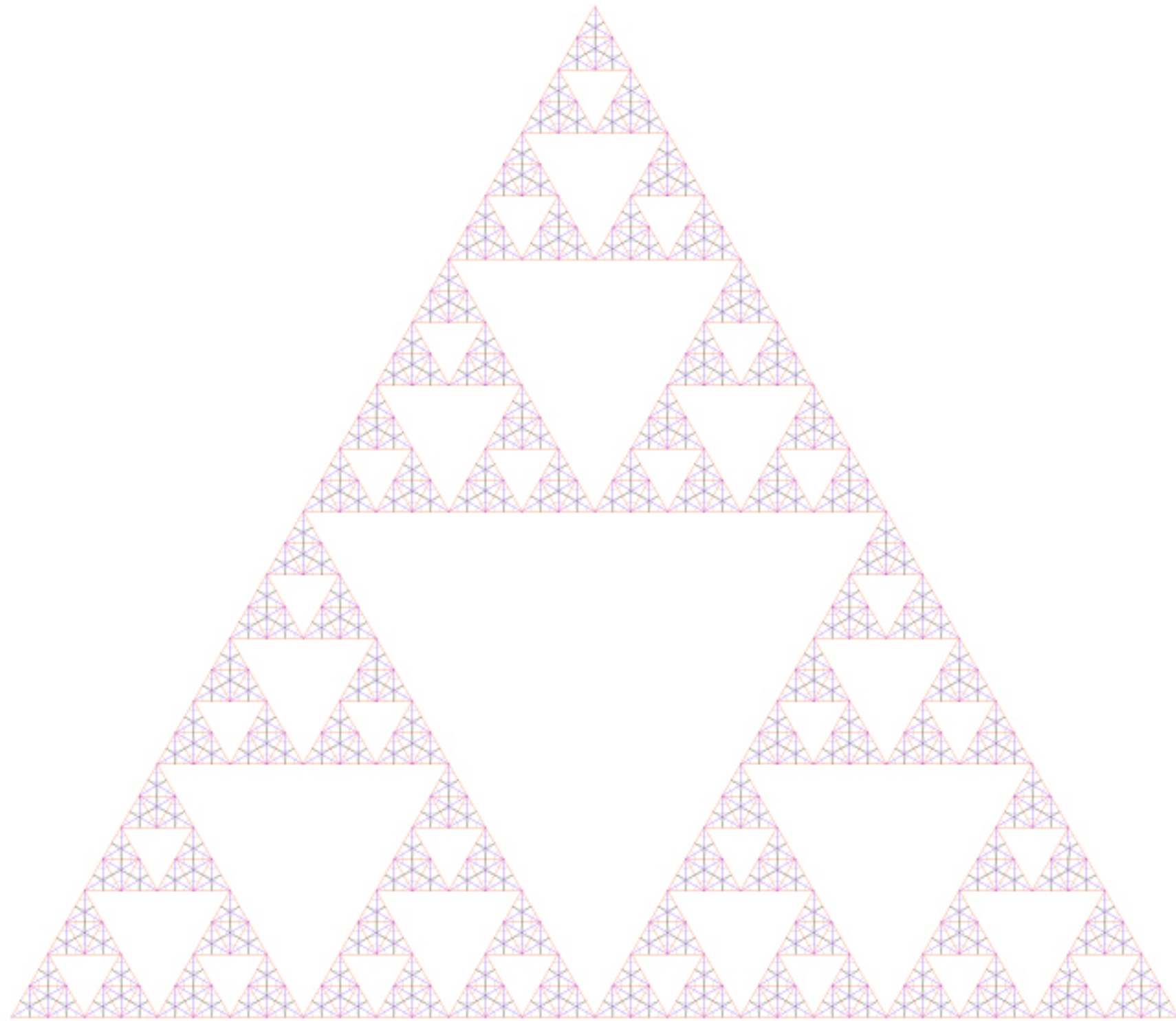
<sup>1</sup> Dyson, Freeman J. Science Journal.



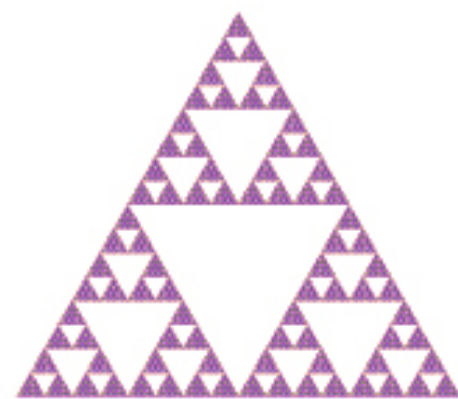
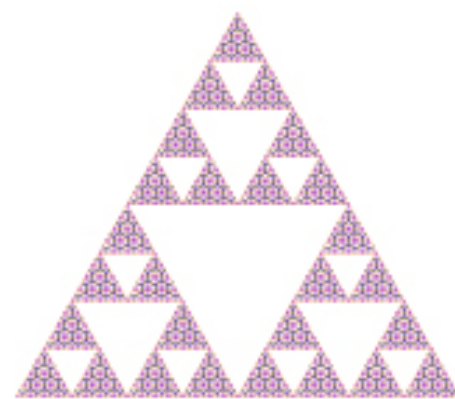
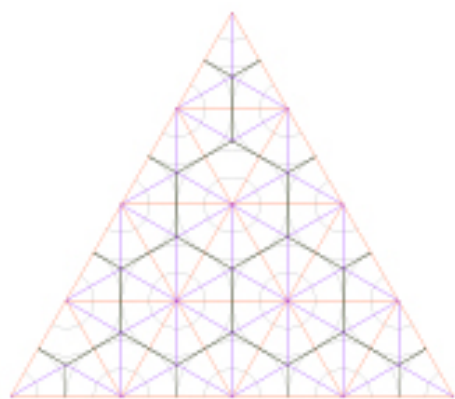
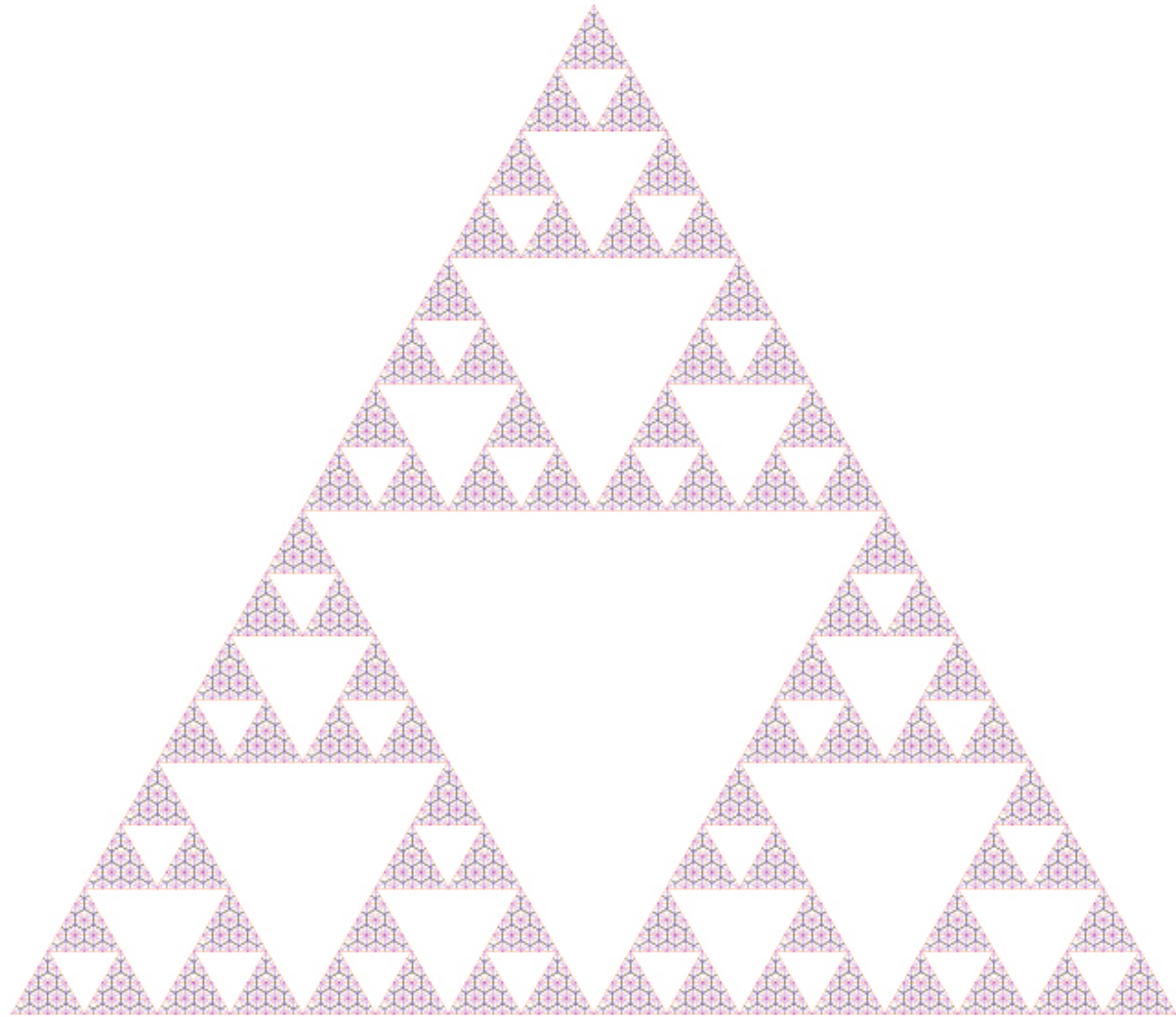


**SPIERINSKI** - el triángulo . Se ilustra la conocida serie de fractales diseñada por el matemático Spierinski. Los diagramas a continuación fueron dibujados para entender el crecimiento del coral. Se toma el hexágono como base dentro del triángulo en distintas escalas, y se adapta a la serie matemática. Se puede ver cómo afecta la escala y la densidad a los distintos diagramas de crecimiento fractal

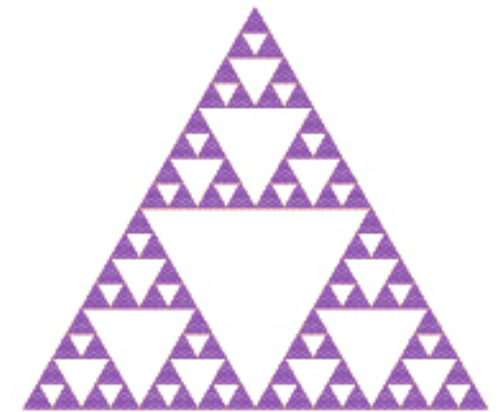
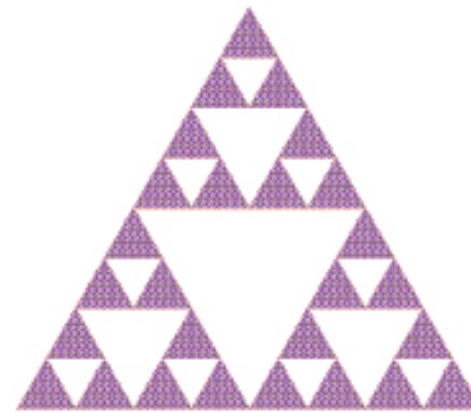
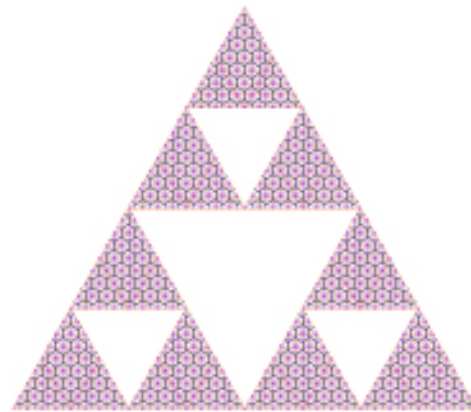
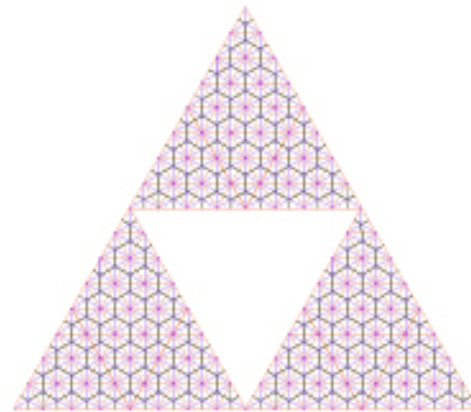
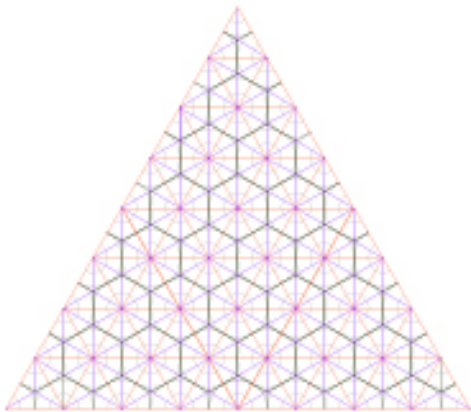
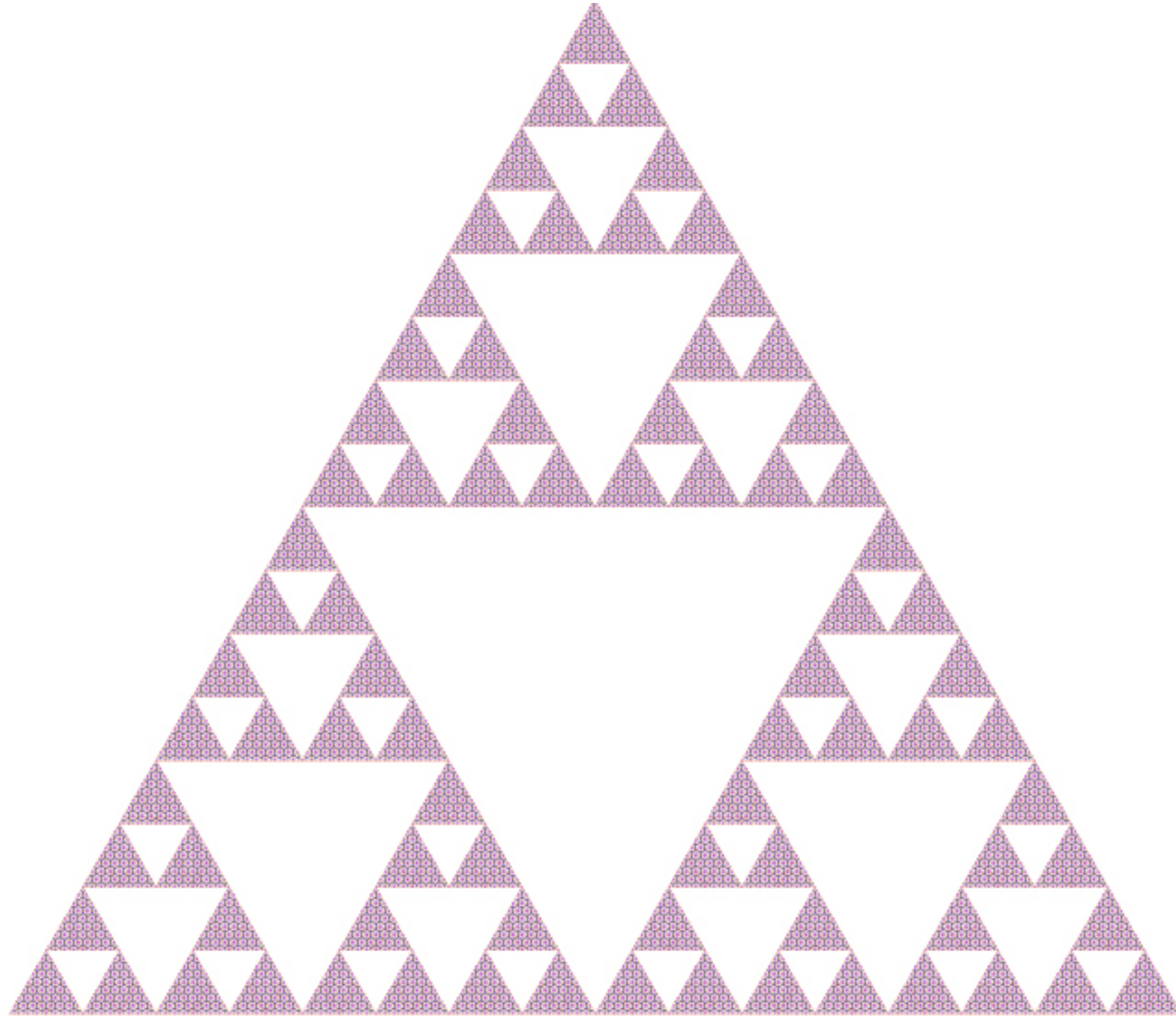




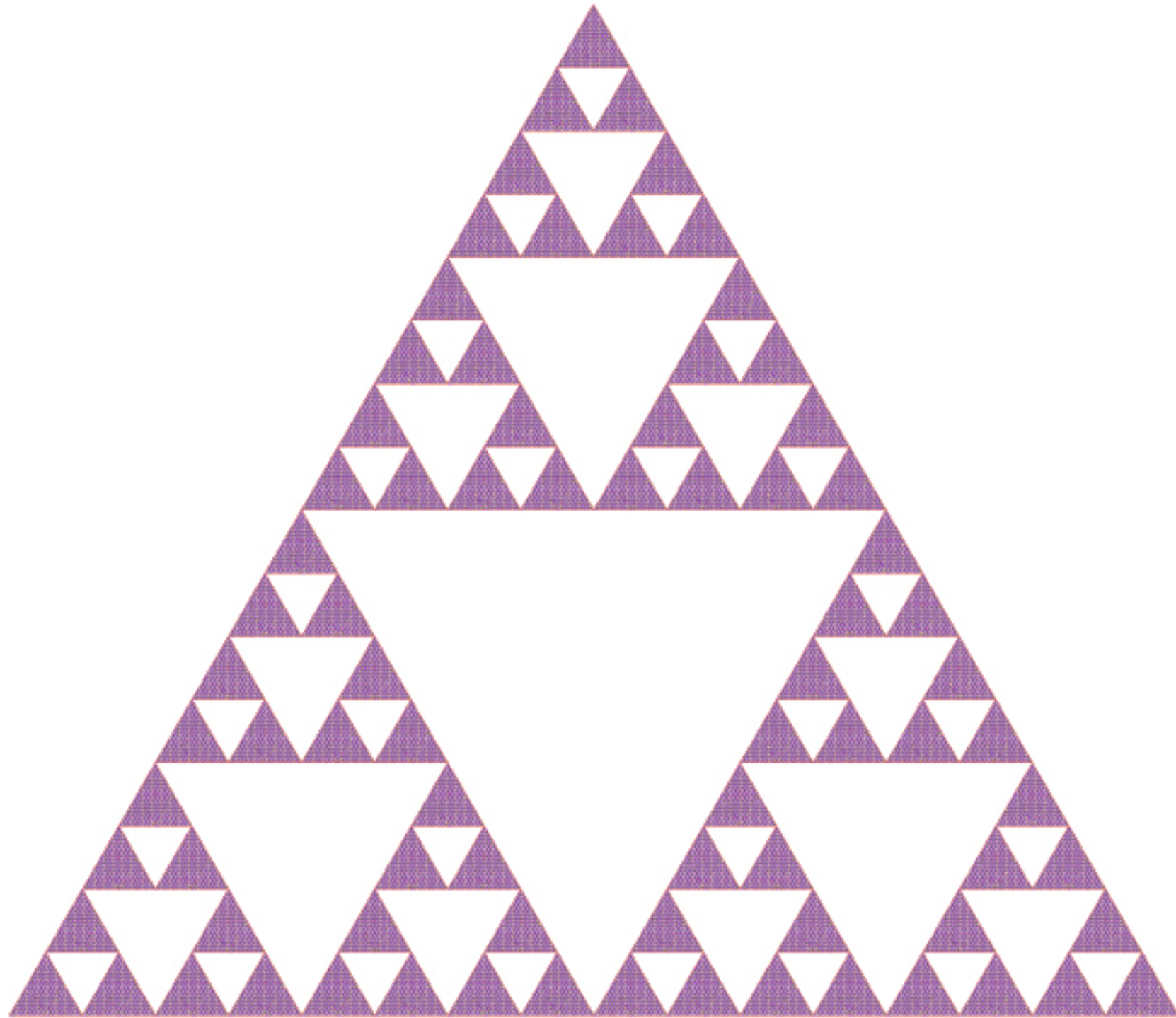
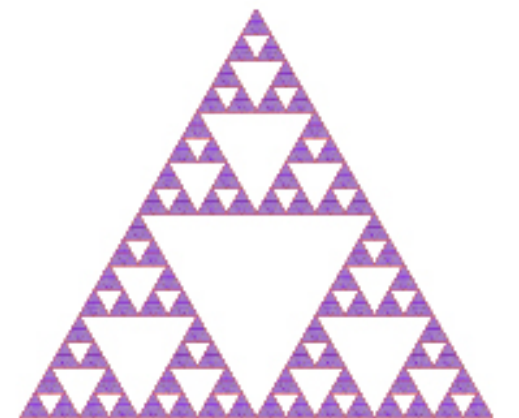
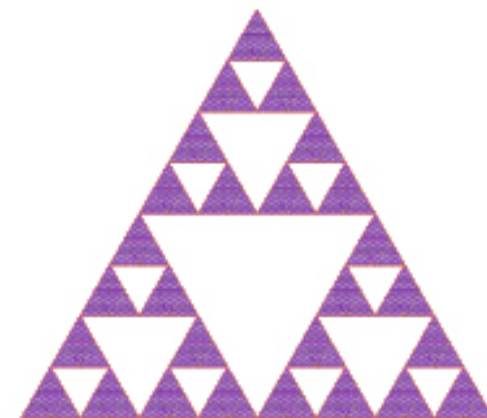
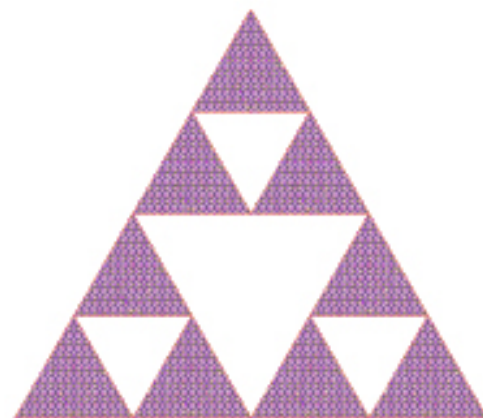
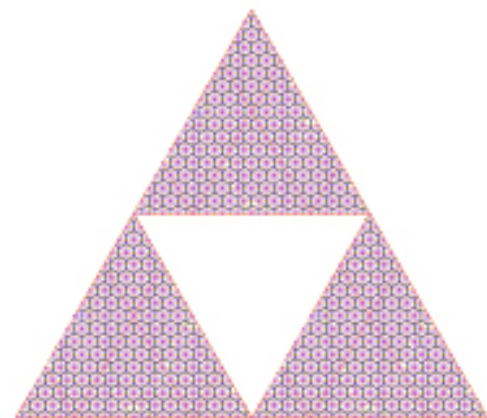
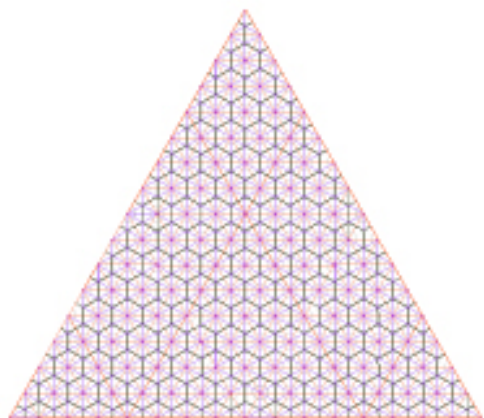




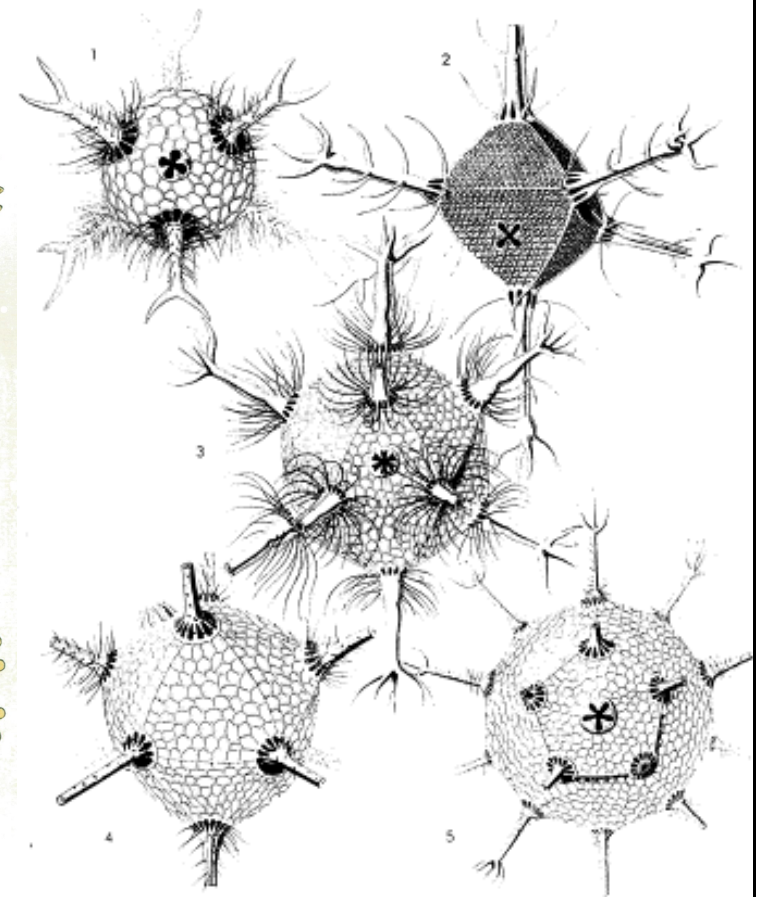
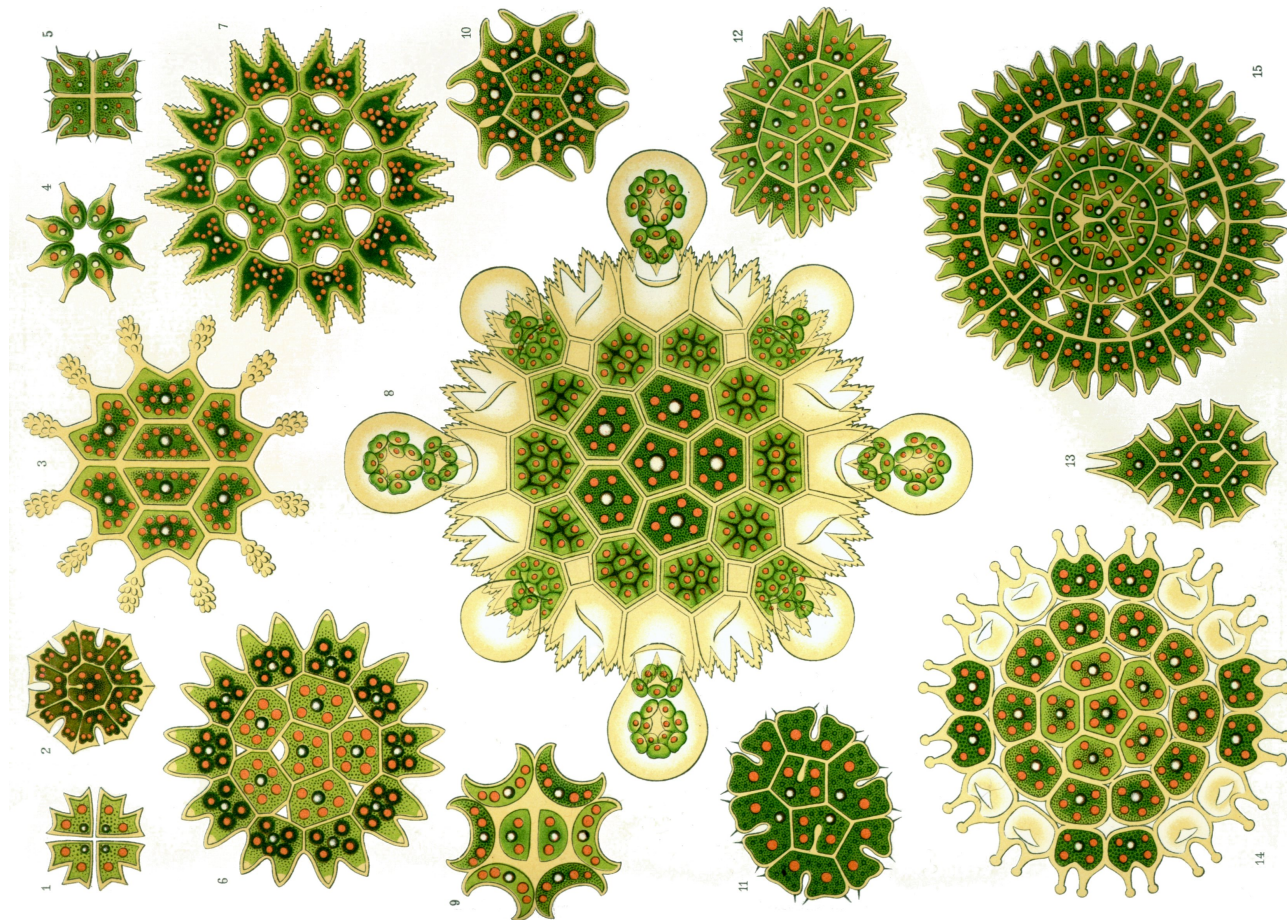
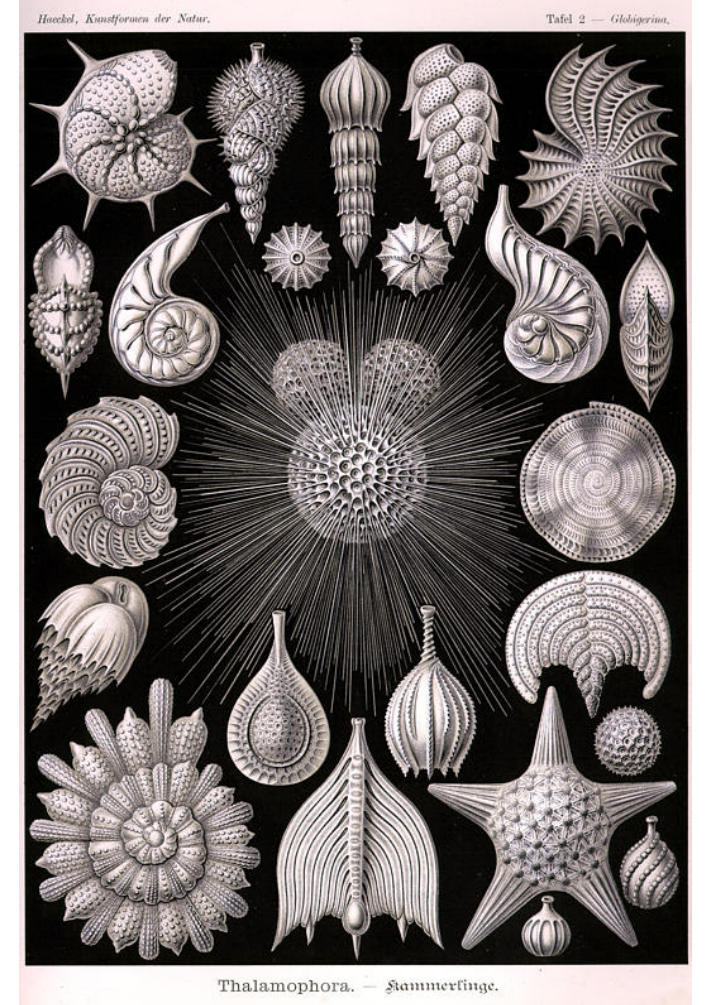
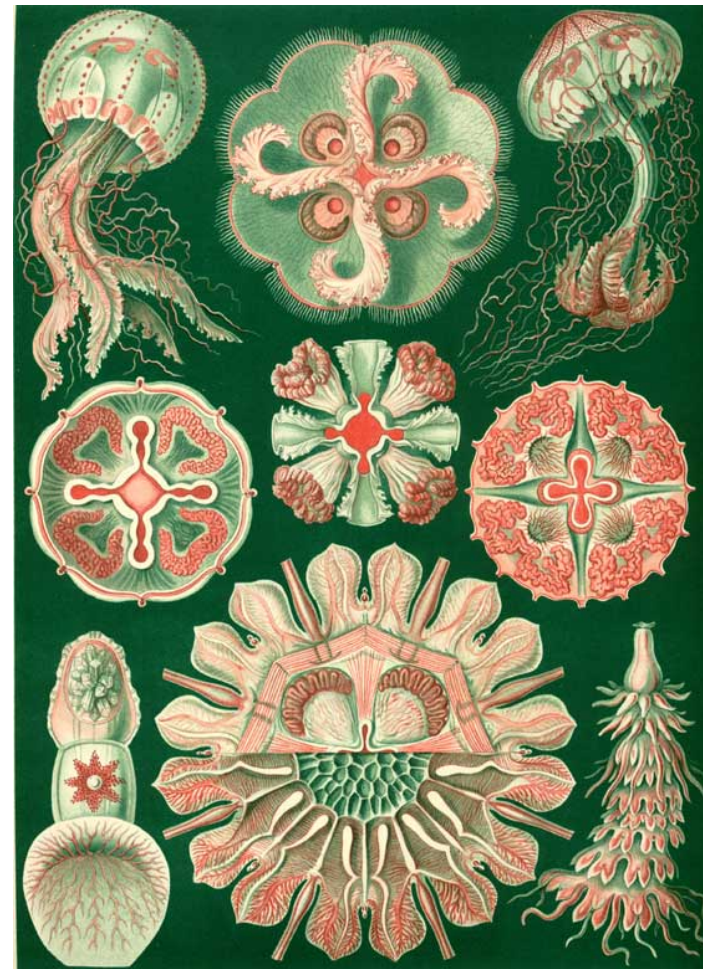
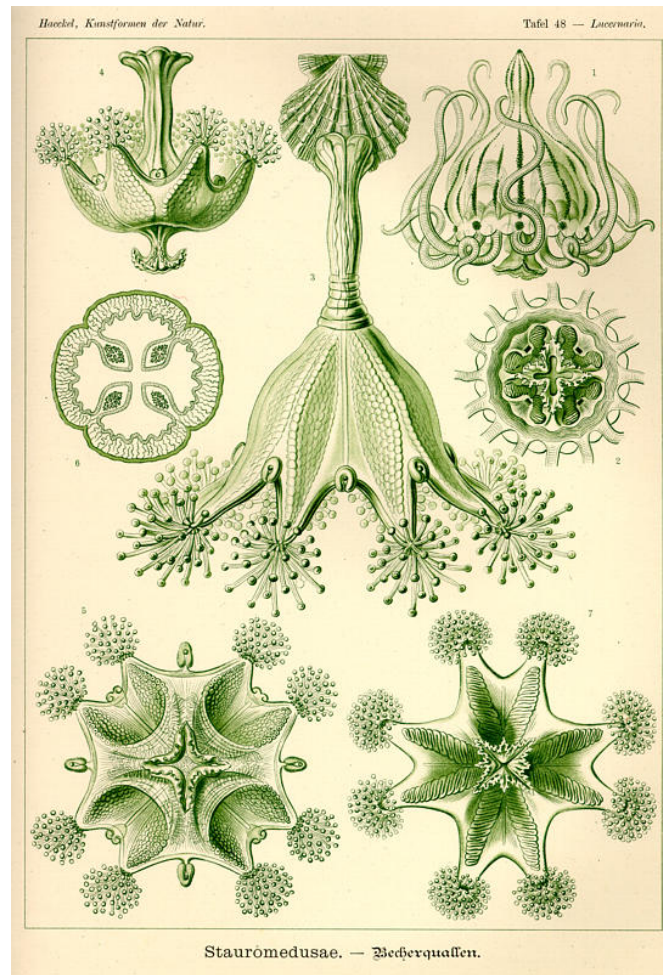












**ERNST HAECKEL (1834-1919)** fue un biólogo, naturalista, filósofo, físico y artista que descubrió, describió y nombró miles de especies, y las relaciono todas las formas vivas. Sus estudios sobre las formas de la naturaleza que se ven en sus ilustraciones tienen precisión microscópica y le suma su interpretación artística de los organismos.



## ARQUITECTURA MARINA

*Los algoritmos describen el crecimiento de los corales y sus consecuentes morfologías.*<sup>2</sup>

La forma y el crecimiento de los organismos marinos con estructura resistente, se define por su característica de ser organismos modulares. Este tipo de organismos se suele formar a base de unidades repetidas en forma de módulo. En el caso de los corales este módulo vendría a ser el pólipo dentro de una colonia de corales. El módulo tiene una forma distintiva, mientras que la colonia en su totalidad suele tener una forma indeterminada. El crecimiento indeterminado indica que bajo un mismo proceso de crecimiento se puede conseguir infinita variedad de formas como resultado de este mismo patrón. Este es el caso opuesto de los organismos unitarios, como los vertebrados y los insectos, en donde una etapa única se desarrolla en una estructura bien definida y determinada. En muchos casos, el proceso de crecimiento en los organismos modulares lleva a formas complejas, que suelen ser difíciles de describir en palabras. En la mayor parte de la literatura biológica, estas formas son descritas con términos vagos como “estructura de árbol con ramas finas”, “estructura de rama irregular”.

Otra característica presente en la mayoría de los organismos sésiles marinos es que el entorno físico del medioambiente en donde se encuentran suele tener un gran impacto en el proceso de crecimiento, lo cual condiciona la forma que va a adoptar el organismo. El crecimiento por acumulación de módulos permite que los organismos puedan amoldar su forma a su medioambiente; les permite tener plasticidad. En casos como los corales, las algas marinas, y las esponjas, la diferencia de exposición al movimiento del agua suele causar cambios significativos en sus respectivas morfologías. Un ejemplo de plasticidad es el coral rocoso *Pocillopora Damicornis*. En contextos protegidos, estas especies suelen tener una estructura de ramas finas. Cuando se lo expone a mayor movimiento de agua, el coral crece y se transforma para desarrollarse en una forma más compacta. Si no se conoce la relación que existe entre el medioambiente físico y los procesos de crecimiento, es difícil comprender la gran variedad de formas que se pueden encontrar en cada especie. Históricamente este tipo de diversidad ha generado confusiones, en ocasiones se han clasificado en forma errónea dos especies distintas que en realidad eran una misma especie, sólo que tenían diferentes formas

de crecimiento. Según lo define Ortmann en 1888, había un “chaos de forma”, luego de no poder clasificar un espécimen dentro de la especie correcta.

Los estudios sobre el crecimiento y la forma de las especies marinas han sido un tema tratado desde hace décadas. D'Arcy Thomson, en 1917, describe el los contenedores de pólipos, los coralitos en la superficie de la colonia de corales. En el trabajo que presenta Jackson en 1979, se presentan seis formas básicas que se distinguen entre los corales, de grupos taxonómicos diferentes. Presenta un modelo en donde las formas básicas se caracterizan por tamaño y forma, y luego hace un análisis de la implicancia ecológica que significa cada una de estas estrategias morfológicas. Fue Lindenmayer (1968) quien reconoce la propiedad característica de estos organismos: son construidos a base de unidades repetidas.

Existen formas de simular modelos que promueven un acercamiento al análisis de las formas de crecimiento de los corales. La pregunta es cómo la relación entre el gen y el espacio físico determina la morfología del organismo. Los conocimientos sobre cómo se transmite la información genética referente a la forma física es escasa. Lo más sorprendente de los arrecifes de coral es que se puede encontrar una gran diversidad de formas de crecimiento dentro de un mismo medioambiente físico.

Los patrones de crecimiento indeterminado son fundamentales, gracias a esto hay diversidad de formas que viven sobre la Tierra. Las colonias son formas de agrupación frecuentes. Hay que tener en cuenta que la mayoría de las formas de crecimiento son el resultado de la simbiosis entre varios organismos, ya sea colonias de una única especie, o la simbiosis de varias especies. La mayoría de los corales rocosos viven en simbiosis con el alga, el *zooxantellae*. La simbiosis es responsable de suplementar energías al organismo y determina la forma de crecimiento.

Si bien las formas de los organismos son distintas, se pueden encontrar similitudes en la forma genérica. Esta observación la hace Jackson en 1979, cuando reconoce formas recurrentes en distintos grupos taxonómicos. Es difícil determinar a que grupo taxonómico pertenece una determinada especie sólo por su forma general. El hecho de que existen formas similares de crecimiento encontrados en grupos taxonómicos bien diferentes, sugiere la idea de que hay una razón más profunda que determina por qué diferentes organismos suelen resultar sólo en

<sup>2</sup> Kaandorp, J. A. “The Algorithmic Beauty of Seaweeds, Sponges and Corals”. Springer.



unos pocos “estilos”. Por otro lado, tiene que existir una forma de caracterizar y comparar estas formas cuantitativamente. Se debería de poder comparar las formas de los organismos.

## FORMA Y CRECIMIENTO

D’Arcy Thompson en su libro “*On growth and form*”<sup>3</sup> quiere mostrar cuál es la aplicación de la matemática a las formas orgánicas, cómo ayuda a comprender la forma y el crecimiento de las mismas. Utiliza, entre otros, el ángulo de Miraldi, la sucesión de Fibonacci, la espiral logarítmica y la proporción áurea. Sostiene que no existe asociación de las construcciones de la naturaleza con la física, las leyes matemáticas o la geometría pura. Se rehúsa a comparar los seres vivos con la materia inorgánica. Si bien existe una similitud entre la morfología del caracol y el espiral, no se describe a través de las ciencias. Cada nido de abeja y tela de araña muestran ciertos problemas fisiológicas instintivos e inteligentes. Lo que llama la atención es la belleza peculiar que muestran en la manera en que se forman y se adaptan los hábitats naturales, como la flor para la abeja y el Berry para el pájaro.

Sobre los corales, explica que su morfología, si bien varía en su forma final, siempre mantiene una relación entre la superficie y el volumen. Hay un balance constante entre la superficie y la masa que desarrolla el coral en su crecimiento. El estudio de la forma de los tejidos complejos no se trata de ver las propiedades de una única célula solitaria, sino de la combinación de muchas células que están en contacto una con la otra (agregado de células). En el punto de contacto entre células se genera la tensión superficial. Estos esfuerzos resultan en lo que se conoce como “área mínima”. Como ha explicado Joseph Plateau<sup>4</sup>, se trata de un mínimo relativo, un área que se aproxima al mínimo absoluto en función de lo permitido por las circunstancias y las exigencias del material.

La partición de células y las consecuentes formas se deben a la presión ejercida por las láminas curvas. Dos burbujas de jabón pegadas de igual tamaño se dividen por una lámina

<sup>3</sup> Thompson, Darcy. “On Growth and Form”. Canto, Cambridge University Press, 1961.

<sup>4</sup> Las Leyes de Plateau describen la estructura de burbujas de jabón. Estas leyes fueron formuladas en el siglo 19 por Joseph Plateau, físico belga que experimenta sobre el tema. Muchos patrones en la naturaleza se basan en estas leyes.

interna plana. Esta pared divisoria y las dos láminas curvas que envuelven cada una de las burbujas deben estar sometidas a la misma tensión superficial y tener ángulos de 120°. La pared que divide las dos burbujas es plana únicamente cuando divide dos células iguales y simétricas. En el caso de que una burbuja sea mayor que la otra, la pared que divide se vuelve curva. Esto se debe a que las dos burbujas ejercen presión hacia adentro (presión que es inversamente proporcional al radio), y la pared que divide a ambas debe ejercer una presión igual a la diferencia entre estas dos presiones para generar equilibrio. Por esto, solo en el caso de que ambas burbujas sean iguales, van a ejercer la misma presión y la partición que divide a ambas es plana.

En el caso de tener tres burbujas en contacto, al ser del mismo tamaño van a estar divididas por tres planos que se juntan en ángulos de 120°. Cuando se juntan cuatro burbujas estas se pueden acomodar de dos formas, con cuatro particiones intersectándose en ángulo recto, o con cinco particiones que se encuentran, tres y tres, en ángulos de 120°. El segundo ejemplo es análogo del caso de tres burbujas juntas. El segundo caso, con cinco lados divisorios, es la forma de agrupación de mayor estabilidad.

En la ley de áreas mínimas, Ernest Lamarle<sup>5</sup> dice que para que un sistema líquido de láminas finas se encuentre en equilibrio estable, la suma de las áreas dentro de las láminas debe ser mínima. El área dentro de cada una es mínima dentro de sus condiciones que lo limitan y que la curvatura de cualquier lámina es constante a lo largo de todo el área. Plateau afirma que las láminas que se encuentran en cualquiera de los bordes son tres, los bordes que se encuentran en cualquier esquina son cuatro, y por último, tres o cuatro láminas que se juntan en un borde lo hacen en ángulos iguales. La superficie de un panal de abejas tiene entre célula y célula tres paredes divisorias, que se unen en ángulos de 120°.

En ala de un aguacil se ve un sistema complejo de venas, costillas que cruzan paralelas entre si, y entre medio hay numerosas venas finas que constituyen una malla de células secundaria. La trama que se genera entre las costillas primarias suele ser hexagonal, excepto en los bordes, que la última célula se intersecta con la costilla en ángulo recto.

<sup>5</sup> Lamarle, Ernest. “Sur la stabilité des systèmes liquides en lames minces”, Mém. Acad. R. Belg. 35,36 (1864-7)



Las células internas de un panal de abejas se sitúan en forma simétrica y todas están sometidas a la misma cantidad de presión y tensión. Las células que se encuentran en el borde del sistema mantienen su curvatura. Todos los lados se encuentran en ángulos igual es de 120°. La capa externa del sistema se lo denomina, como en la botánica, capa “epidérmica”. En esta instancia se las células que constituyen la pared epidérmica están sometidas a tensiones diferentes, por lo cual ya no necesitan estar particionadas específicamente en ángulos de 120°. Si se incrementa la tensión superficial en la capa exterior (o epidérmica) los ángulos van a aproximarse a 90°, y los bordes de las células van a dejar de ser esféricas para ser rectas.

Las células que componen la masa interna tienden a formar poliedros que llenen el espacio, incluso de doce o catorce lados. Sachs dice que lo que determina el comportamiento de las células y su forma es la posición y la fuerza a la que están sometidas dentro del sistema.<sup>6</sup>

### **SIMETRÍA HEXAGONAL**

Los principios que determinan el desarrollo de la simetría hexagonal son ciertas no sólo para células en la biología, sino que se aplica a cualquier cuerpo de tamaño uniforme y cuya forma original es de contorno circular, cerrado en el plano. Como consecuencia se da un patrón hexagonal. En un sistema donde esferas iguales están en contacto una con la otra, lo lógico es que cada uno de estos círculos esté en contacto con seis otros círculos a su alrededor. Si todo el sistema se encuentra bajo un esfuerzo uniforme - ya sea de presión por el crecimiento interno de la célula o por una presión aplicada desde afuera - los seis puntos de contacto entre los círculos del diagrama van a transformarse en líneas que representan superficies de contacto en las esferas. Como consecuencia, los círculos se convierten en hexágonos regulares e iguales entre sí.

### **PANAL DE ABEJAS**

El panal de abejas es un caso similar al del coral, es una de las conformaciones hexagonales más estudiadas. Se trata de una sumatoria de cilindros iguales, de sección circular,

comprimidos hasta formar prismas hexagonales regulares. Se compone de dos filas de cilindros que se alternan entre si, por presión mutua entre las células, se convierten en prismas hexagonales. Los ángulos en el plano son de 120°. El sólido regular cuyo cuerpo completa el espacio es el dodecaedro rómbico. La célula del panal es una figura incompleta, ya que es la mitad de esta figura.

Lo interesante de este agrupamiento, según resalta Pappus el Alejandrino, es que hay tres figuras que pueden llenar el espacio: el triángulo, el cuadrado y el hexágono. De todos modos, las abejas utilizan el hexágono para conformar sus estructuras, ya que es el que tiene más ángulos y puede soportar la mayor cantidad de miel. Esta teoría de “economía de espacio” es refutada por la hipótesis de Erasmus Bartholin, quien sugiere que las células hexagonales son sólo el resultado de presiones iguales, del esfuerzo de cada abeja por hacer que su círculo sea el mayor de todos. Miraldi sostiene los dos principios de simplicidad y belleza matemática como guías.

Réaumur sugiere que la configuración mínima es para lograr la economía del material de las paredes de cera que contienen las células. Esto significa que, en el plano, esta agrupación de hexágonos resulta en el mínimo borde, y en el espacio, la figura del dodecaedro rómbico es la que utiliza la mínima superficie para esa área. Esta estructura es la forma que, con menos cantidad de cera, puede contener la máxima cantidad de miel.

## CORALITO

El esqueleto de un pólipo individual de coral, se denomina coralito. La estructura de la colonia coralina es el resultado del conjunto de coralitos individuales, que se agrupan en estructuras diversas que varían en su forma. Es un tubo que contiene placas verticales que giran en forma radial desde el centro. El tubo en sí es el muro del coralito y las placas son la el septo costa. Los tubos se unen entre sí por placas horizontales y otras estructuras, conjunto que se denomina coenosteum. Algunos pólipos tienen finas láminas de esqueleto adicional, alrededor de la pared del coralito, esto se llama epiteca.

La pared está formada por cinco elementos de esqueleto, que varían en su proporción en diferentes tipos de corales, de acuerdo a la familia o género al cual pertenecen. Estos elementos son

- (a) septo-costae (which become thickened within the wall)
- (b) coenosteum (which forms a sponge-like structure)
- (c) synapticulae (which are horizontal rods forming a lattice between the septo-costae)
- (d) sterome (which form a non-porous layer within the wall)
- (e) epitheca (which forms a thin non-porous layer on the outside of the wall)

El coralito está compuesto de aragonito, que es una forma cristalina de carbonato de calcio, producido y secretado por el pólipo coralino.

### Estructura del coralito

Cáliz: Abertura del coralito.

Septo: Es una fina placa en forma de esqueleto, que funciona como un tabique. El septo se organiza en forma radial desde el centro del cáliz hasta el muro interior que define el coralito

Dientes septales: El margen superior de los septos puede ser afilado y liso, con salientes puntiagudos o en forma de agujas. Esta característica sirve, en ocasiones, para identificar corales.

Palus: Denominados "lóbulos paliformes", son protuberancias verticales, normalmente redondeadas, que se extienden desde el margen interior de los septos, hasta el centro del cáliz, adyacentes a la columela. En muchos casos sirven para identificar especies de corales.

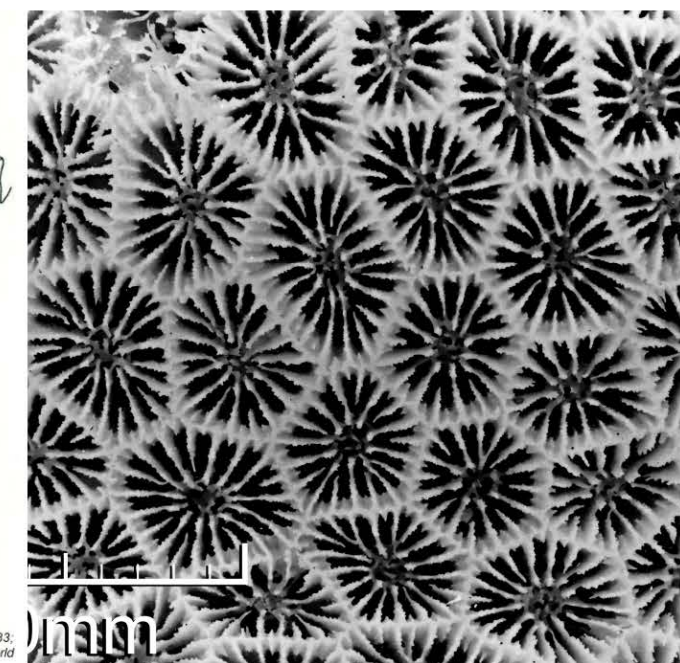
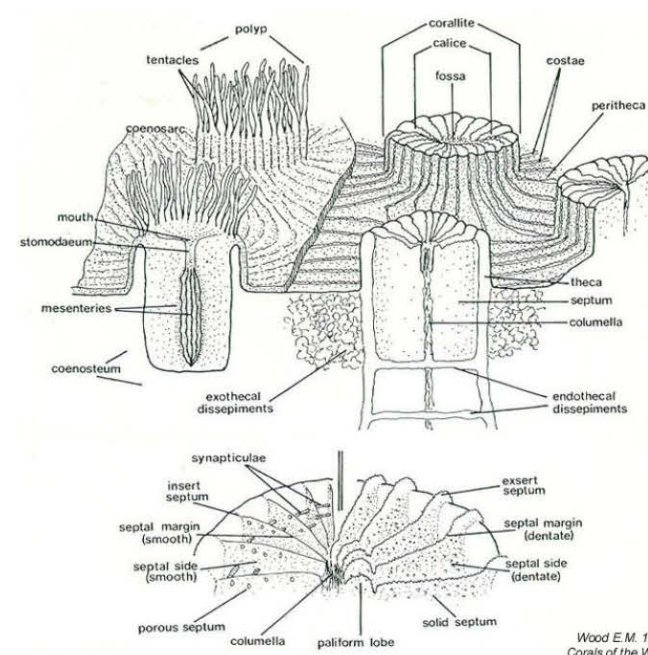
Columela: Estructura esquelética vertical, en forma de columna, en el centro del coralito de

algunos géneros de coral. Formada por proyecciones interiores de los septos que se entrelazan y fusionan.

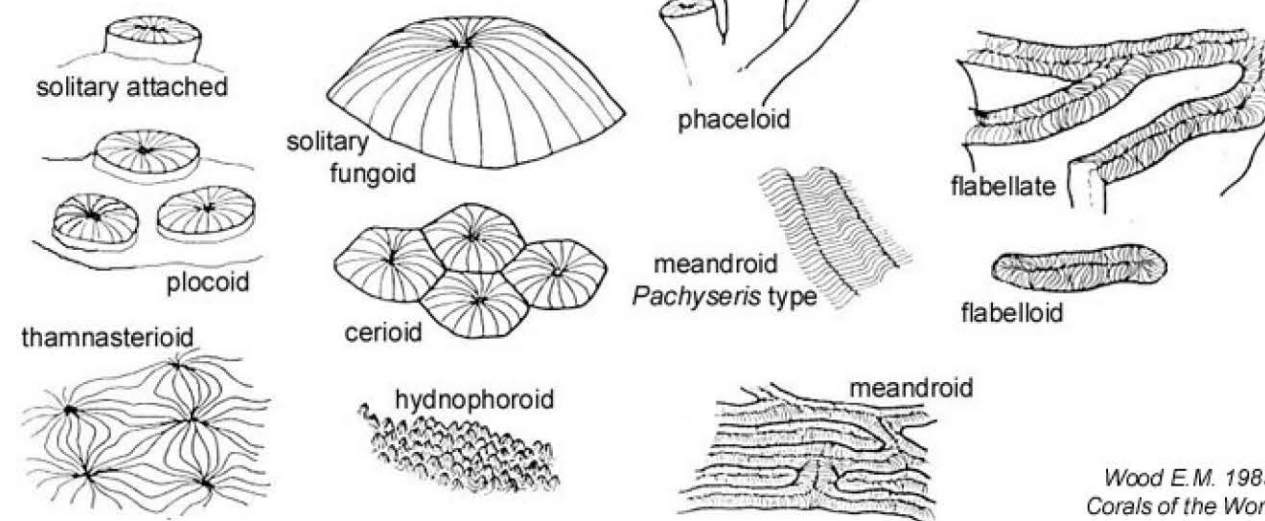
Teca: Denominada comúnmente "muro" o "pared", es la parte exterior del coralito.

Costa: Fina placa esquelética que sobresale desde la teca hacia el exterior del coralito.

Septocosta: En el corallum, o esqueleto, de las colonias, la fusión de los septos y los costa entre los coralitos individuales adyacentes.

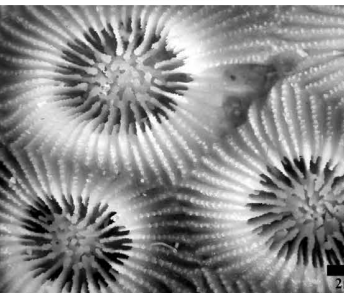
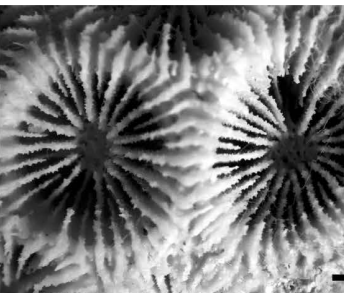
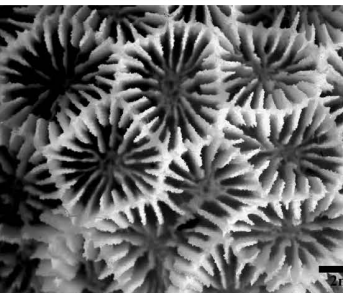
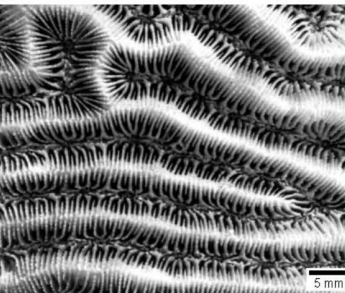
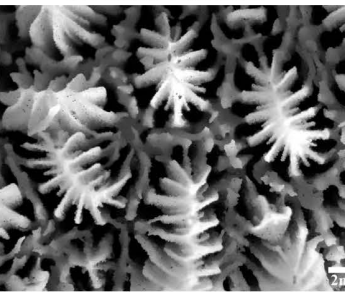
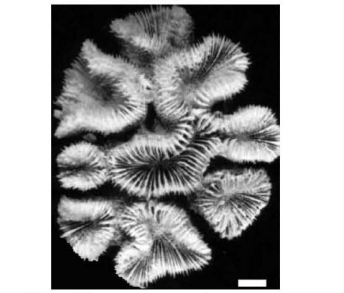
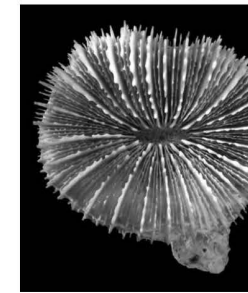
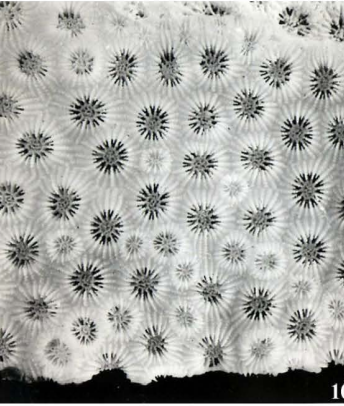

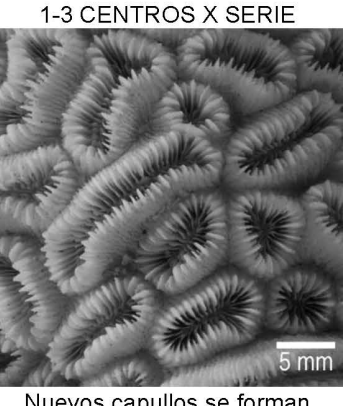
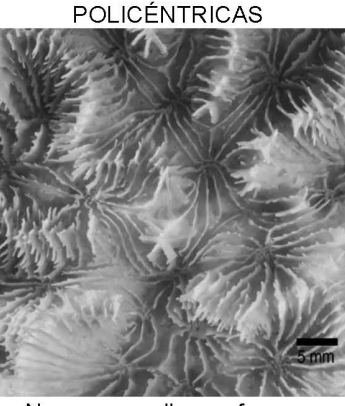
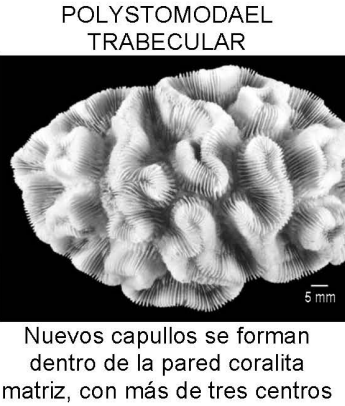

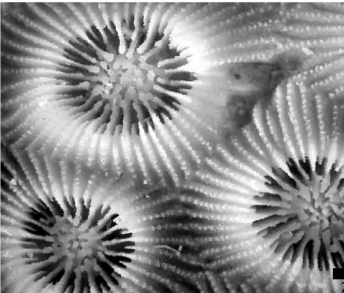
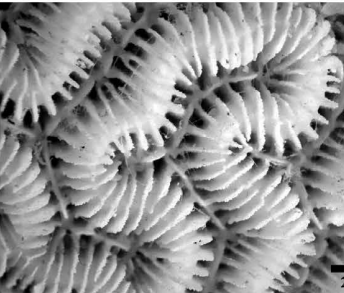
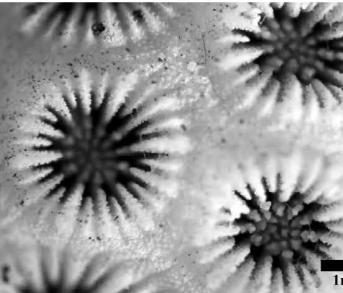

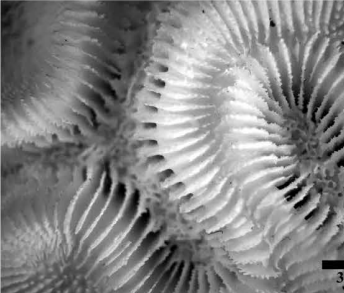
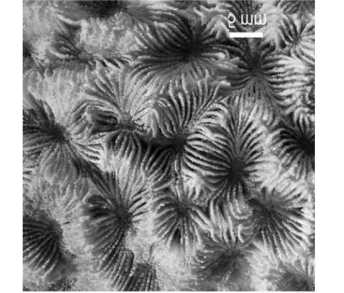


### Structural diversity in corals (the basic types)

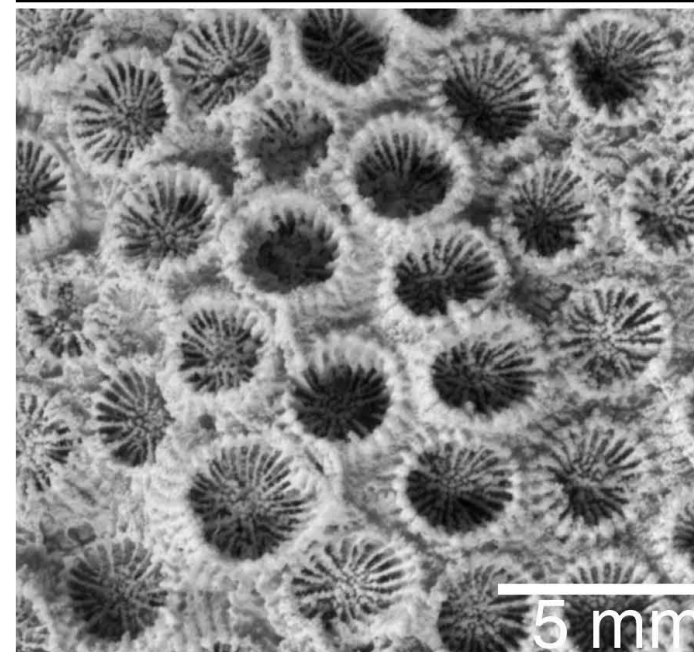
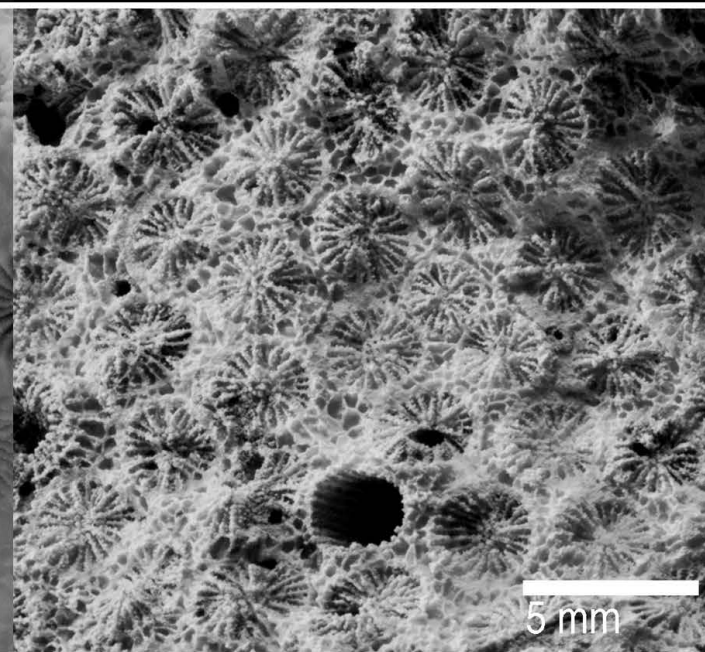
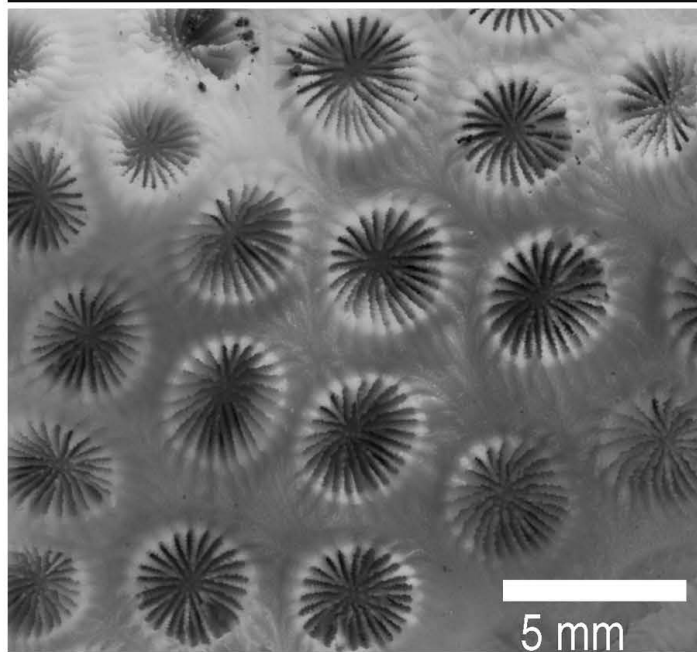
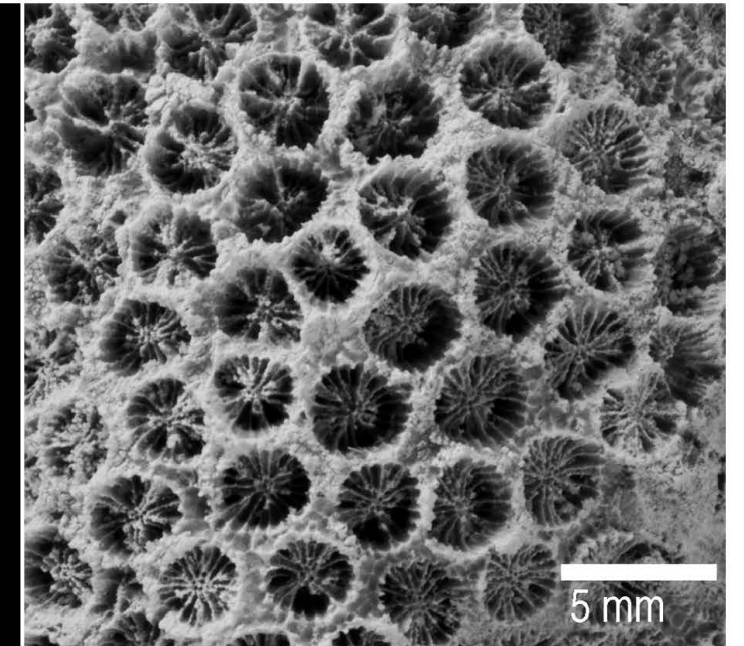
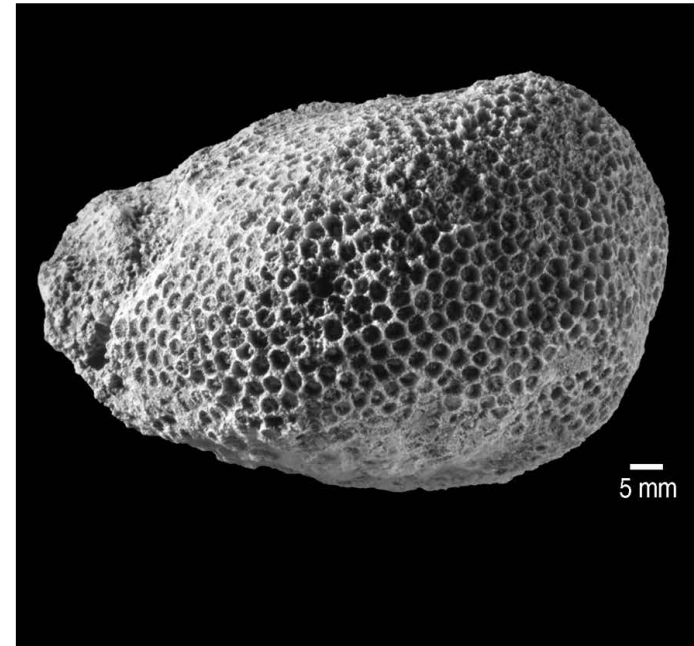
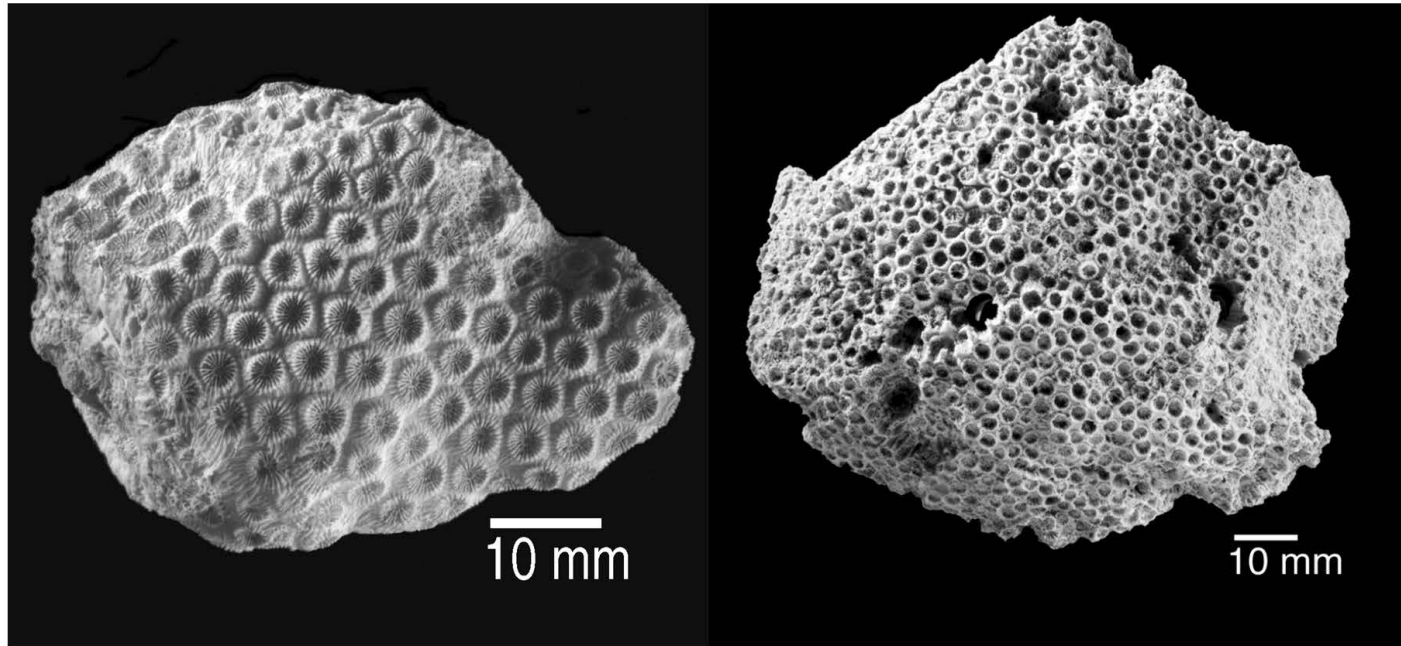


Wood E.M. 1983;  
Corals of the World

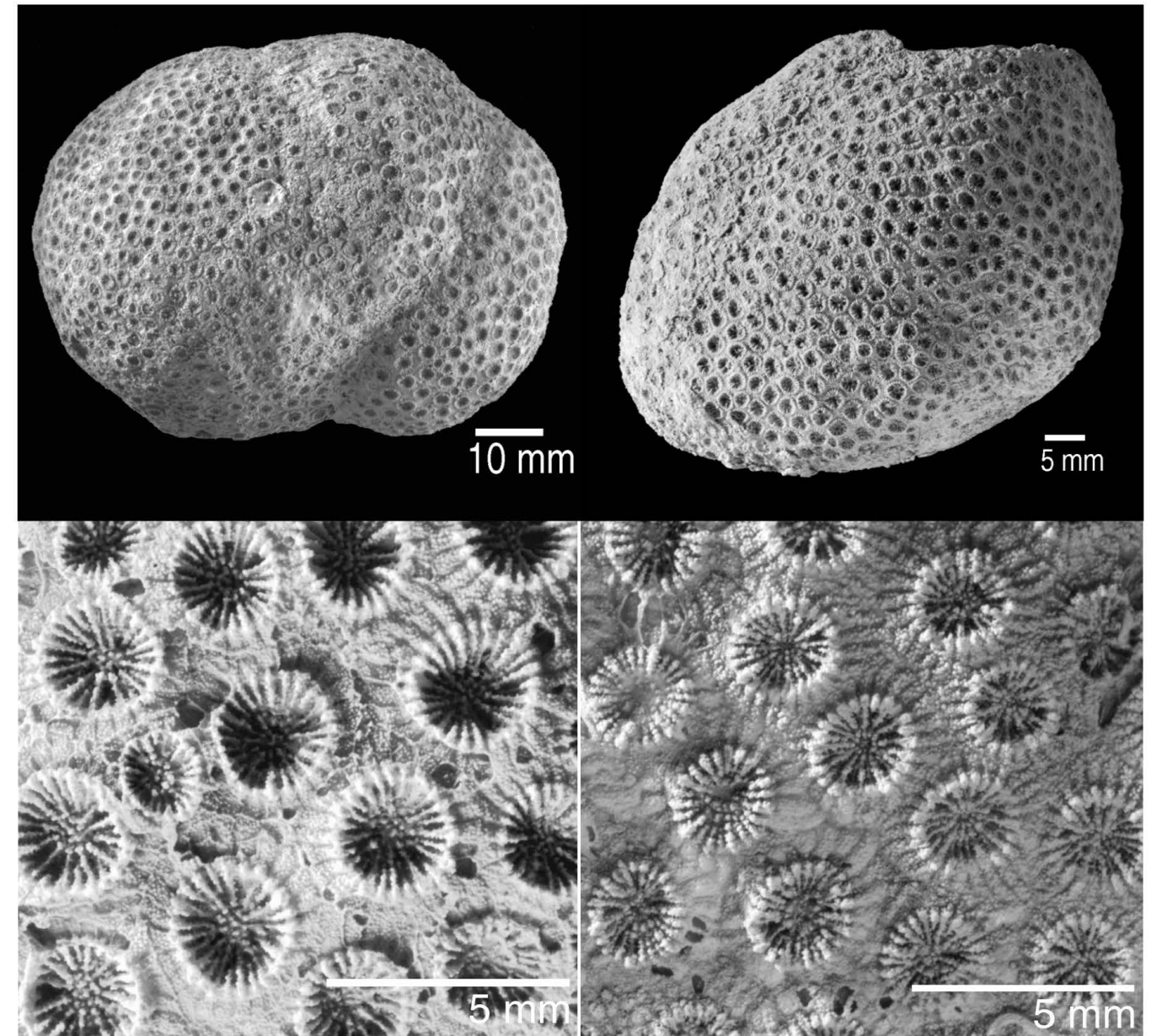
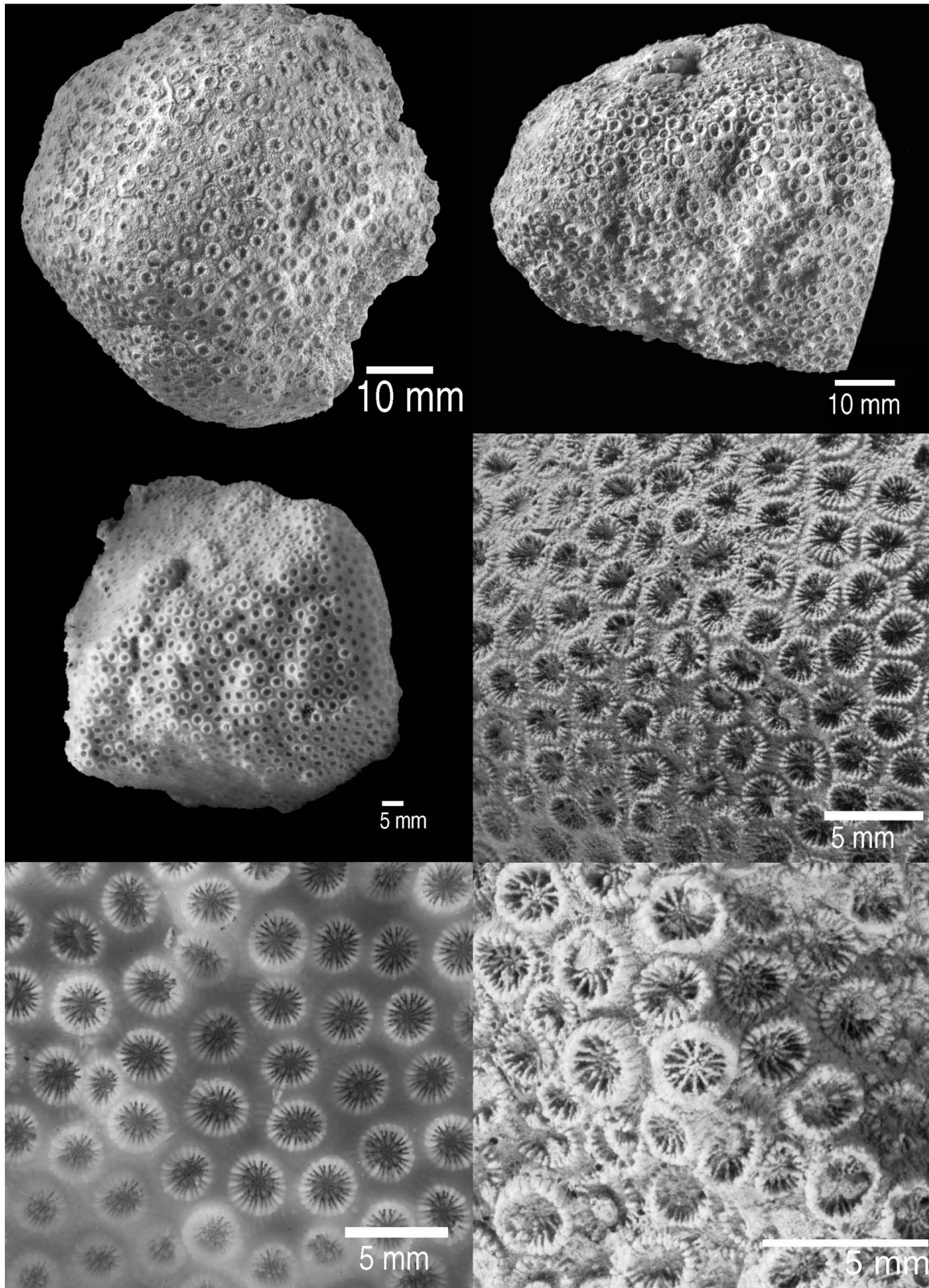


<p><b>FORMA DE LA COLONIA</b> La forma general en que se acomodan los coralitos dentro de una colonia (superficie de células)</p>	<p><b>PLOCOID</b></p>  <p>Coralitos separados por un eje</p>	<p><b>SUPLACOID</b></p>  <p>Coralitos a veces se separan por eje</p>	<p><b>CERIOD</b></p>  <p>Coralitos Yuxtapuestos</p>	<p><b>MEANDROID</b></p>  <p>Coralitos organizados en series</p>	<p><b>HYDNOPHOROID</b></p>  <p>Los centros de los coralitos se organizan alrededor de montículos</p>	<p><b>PHACELOID</b></p>  <p>Coralitos separados por un espacio vacío</p>	<p><b>SOLITARY</b></p>  <p>Coral formado por un individuo</p>
<p><b>TIPO DE CONSTRUCCIÓN</b> La posición de una célula nueva en relación a la pared coralina (superficie de células)</p>	<p><b>EXTRAMURAL</b></p>  <p>Nuevos capullos se forman afuera de la pared coralita matriz</p>	<p><b>INTRAMURAL -3 CENTROS X SERIE</b></p>  <p>Nuevos capullos se forman dentro de la pared coralita matriz, uno o dos centros por serie</p>	<p><b>INTRAMURAL 1-3 CENTROS X SERIE</b></p>  <p>Nuevos capullos se forman dentro de la pared coralita matriz, entre uno y tres centros por serie</p>	<p><b>LÁMINAS INTRAMURALES POLICÉNTRICAS</b></p>  <p>Nuevos capullos se forman dentro de la pared coralita matriz, con más de 3 centros por serie, y placas laminales se extienden entre los centros</p>	<p><b>INTRAMURAL POLYSTOMODAEAL TRABECULAR</b></p>  <p>Nuevos capullos se forman dentro de la pared coralita matriz, con más de tres centros por serie y forman ejes que se extienden entre los centros.</p>	<p><b>CIRCUMMURAL</b></p>  <p>Nuevos capullos se forman dentro de la pared coralita con centros acomodados alrededor de Colinas discontinuas o montículos.</p>	
<p><b>FORMA DE LA COLUMNA</b> La forma generica del eje central que estructura el coralito (superficie de células)</p>	<p><b>ESPONJOSO</b></p>  <p>La columna se forma por túberculos internos sueltos entremezclados, en el interior del septum.</p>	<p><b>LAMINAR</b></p>  <p>La columna está formada por una placa, normalmente libre en su parte superior</p>	<p><b>PAPILOSA</b></p>  <p>La columna está formada por un grupo de costillas verticales giradas o varas similares.</p>	<p><b>DÉBIL</b></p>  <p>La columna se desarrolla débil.</p>			
<p><b>CONTINUIDAD DE LA COLUMNA</b> Continuidad de la columna entre los coralitos (solo en corales intramurales)</p>	<p><b>CONTINUA</b></p>  <p>La columna se extiende entre los coralitos, los centros no se distinguen</p>	<p><b>DISCONTINUA</b></p>  <p>La columna no se extiende entre coralitos, los centros si se distinguen</p>					









Coral: *Solenastrea* - Milne Edwards and Haime, 1848  
 Tipo de especie: *Astrea turonensis* Michelin. *Solenastrea Bournoni*.

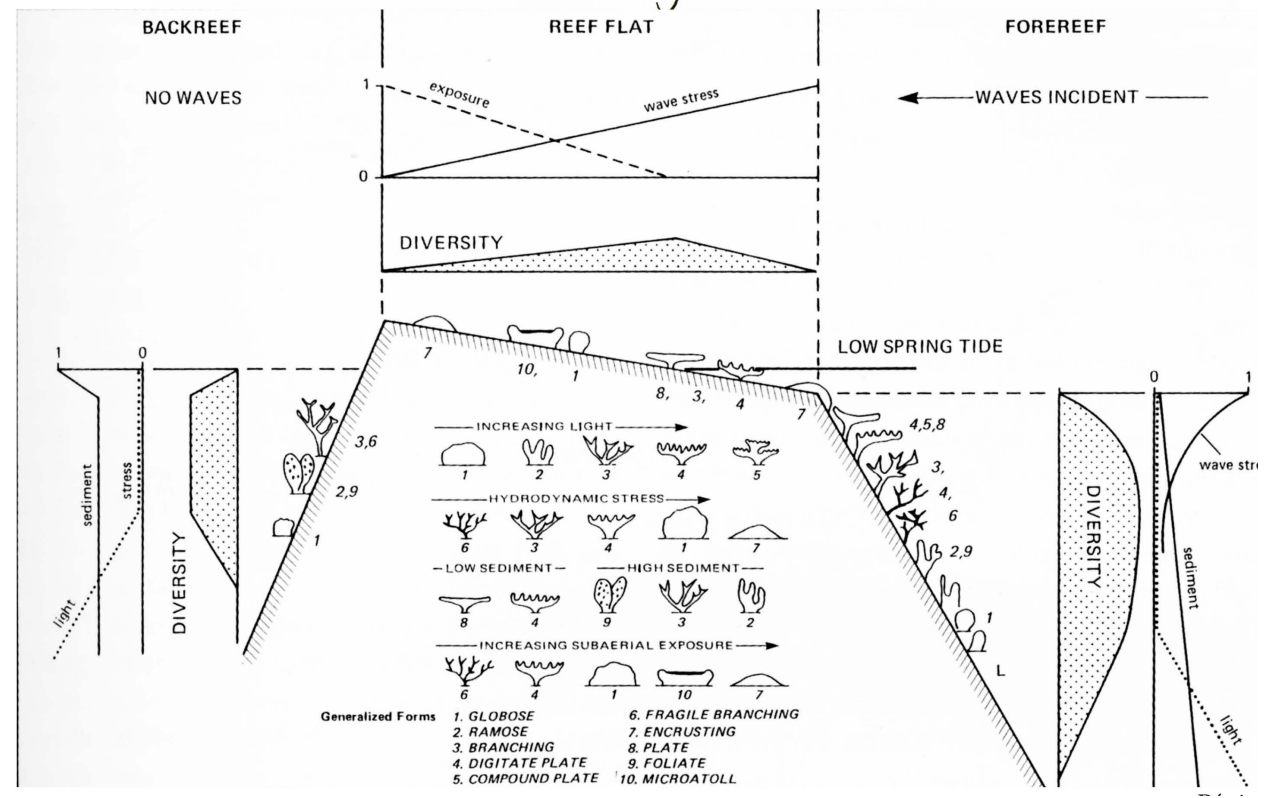
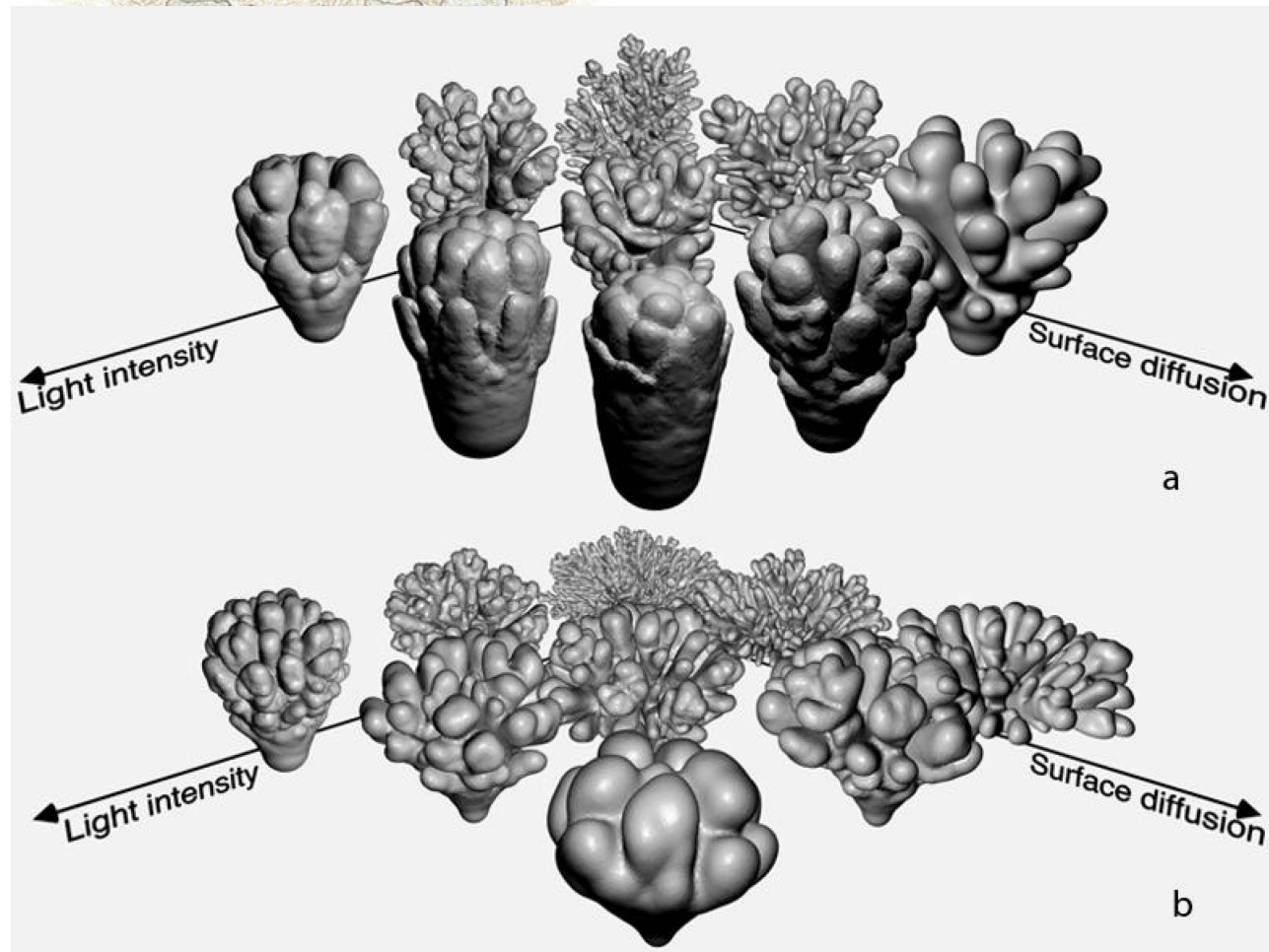
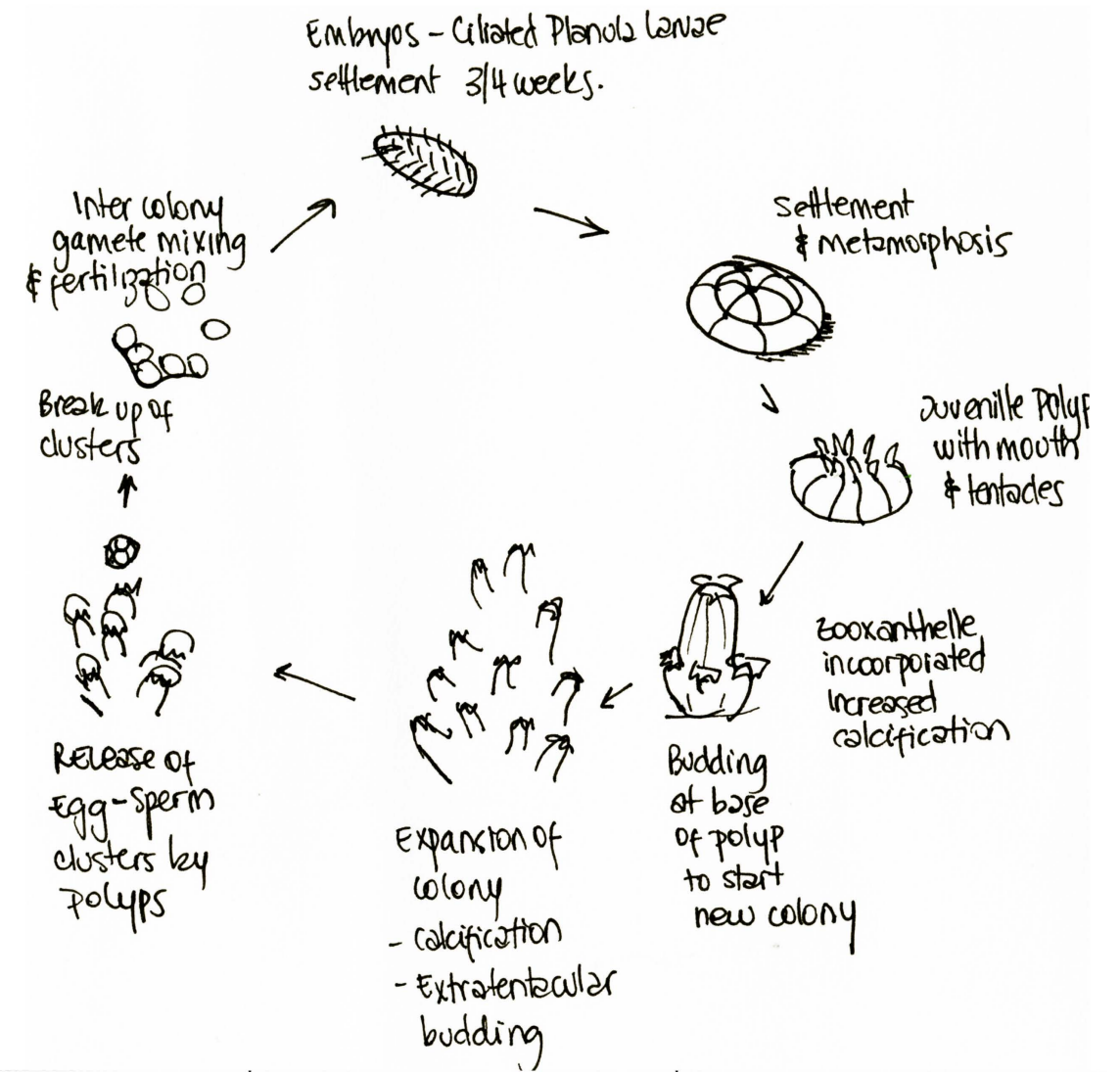
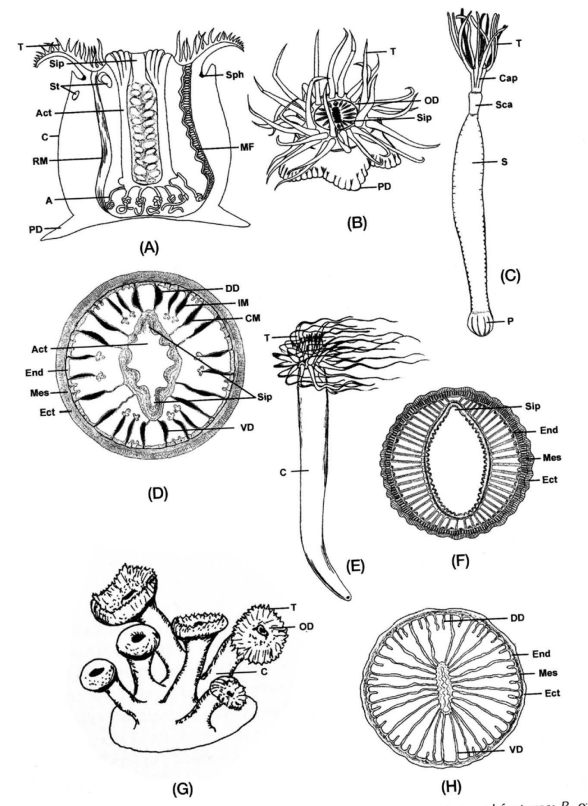
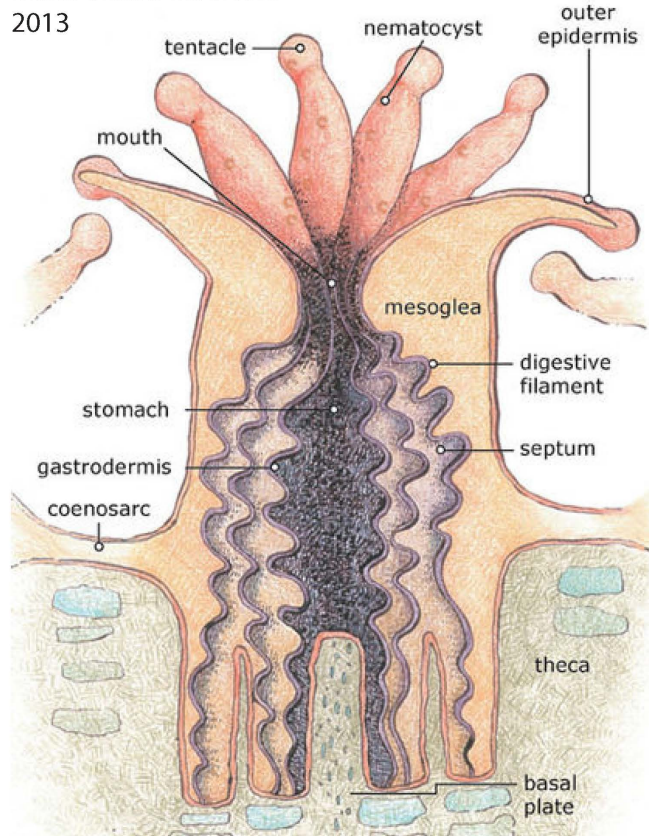
Descripción morfológica del género

- Forma de la colonia: plocóide
- Tipo de construcción: extramural (afuera de la pared del par coralito)
- Calice o ancho de valle: pequeño (1.5-5mm)
- Forma de la colonia: masiva
- Lóbulos del tabique: ausentes
- Lóbulo paliform: presente (Pilares verticales dentro de los márgenes internos del septo)
- Pali: ausente
- Estructura de eje: trabícula (travesaño/viga)
- Estructura de pared: *Parathecal* (Pared coralina formada por compartimentos)
- Estructura de pared: *Septothecal* (Pared coralina formada por el engrosamiento del septo)

Imagen 1 a 5: Muestran una Colonia de corales tipo *Solenastrea Bournoni*.  
 Imagen 6 a 10: Muestran los Calices (Célula del coral) de corales tipo *Solenastrea Bournoni*.



Analogía Orgánica  
 María Chiara Gibertoni  
 2013





## ESTRUCTURAS LAMINARES

### CÁSCARAS - HEINZ ISLER

Heinz Isler nace en Zúrich el día 26 de Julio de 1926. El ingeniero civil concluye sus estudios con un trabajo sobre estructuras laminares. A lo largo de su carrera sigue investigando las cáscaras y realiza numerosas obras con financiamiento de empresas.

Isler diseña su primer edificio en 1956, que consiste en un techo de cáscaras esféricas, con aberturas de 5m de diámetro en el centro. Para tales aberturas no consigue que le fabriquen claraboyas de ese tamaño, la mayor era de 1,60 metros de diámetro. Consigue fabricarlo con poliéster reforzado. La idea atrae a un hombre de negocios Eschmann, y su compañía vende las licencias para producirlo. Esto permite a Isler avanzar con sus estudios en su propio taller.

En 1959, Isler publica una investigación en el Primer Congreso de la Asociación Internacional de Estructuras Laminares, que se llevó a cabo en Madrid, a cargo de Eduardo Torroja. El objetivo del congreso era presentar nuevos desarrollos sobre este tópico. La presentación de Isler se titula "Nuevas formas para las cáscaras", que contiene un poco de texto y nueve ilustraciones. En aquel texto, Isler describe tres procedimientos posibles para encontrar la forma de una cáscara: (1) la forma libre de una colina, donde la tierra le da la forma; (2) la membrana bajo presión, donde una membrana plástica inflada da la forma; (3) la tela colgante dada vuelta, donde un pedazo de tela define la forma de la superficie, tal como un cable colgante define la línea funicular.

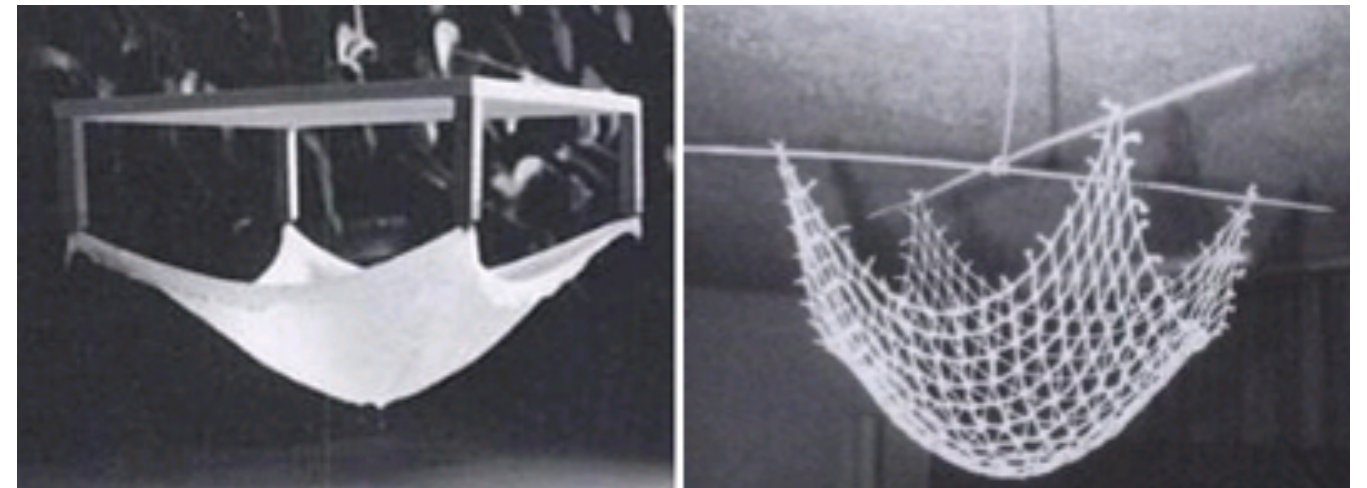
El desarrollo de las posibles formas para las cáscaras realizado por Isler influencia la obra de Félix Candela, quien diseña una cubierta para el Restaurant de Manantiales en México de tan sólo 40mm de espesor. Este episodio hace que Isler quiera explorar cuán finas deben ser las cáscaras para lograr ese carácter de lámina delgada. Explora la forma y las curvas que hacen a la proporción de estas cubiertas.

Los lineamientos que guiaban el diseño para Isler se sintetizan en: simplicidad y modestia de los medios, la pureza del concepto, la precisión y la pureza de los experimentos físicos. Su preocupación por el medio ambiente se ve reflejado en su dedicación a buscar estructuras que sean lo más eficiente que fuera posible y que produzcan el menor impacto medioambiental.

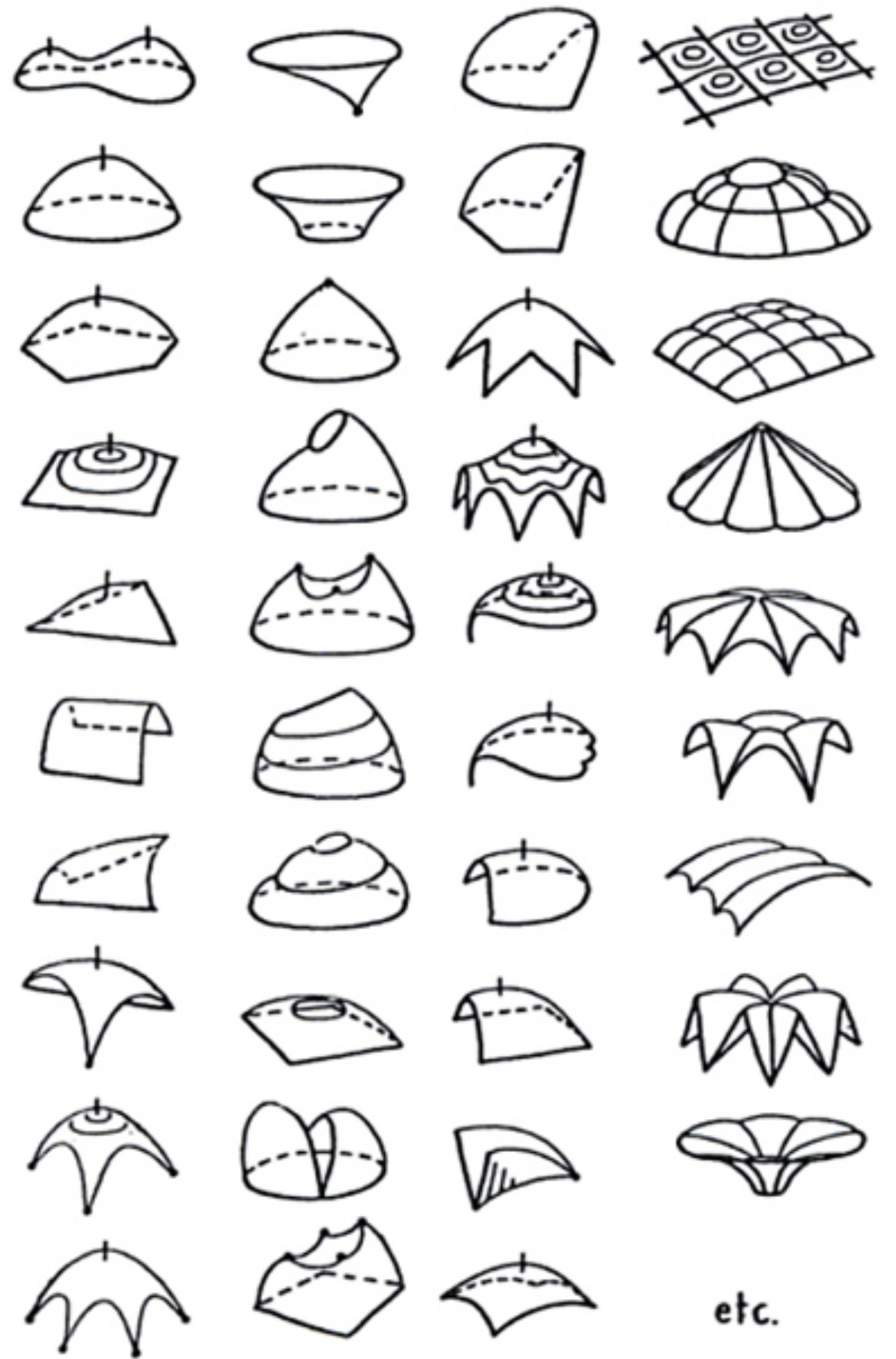
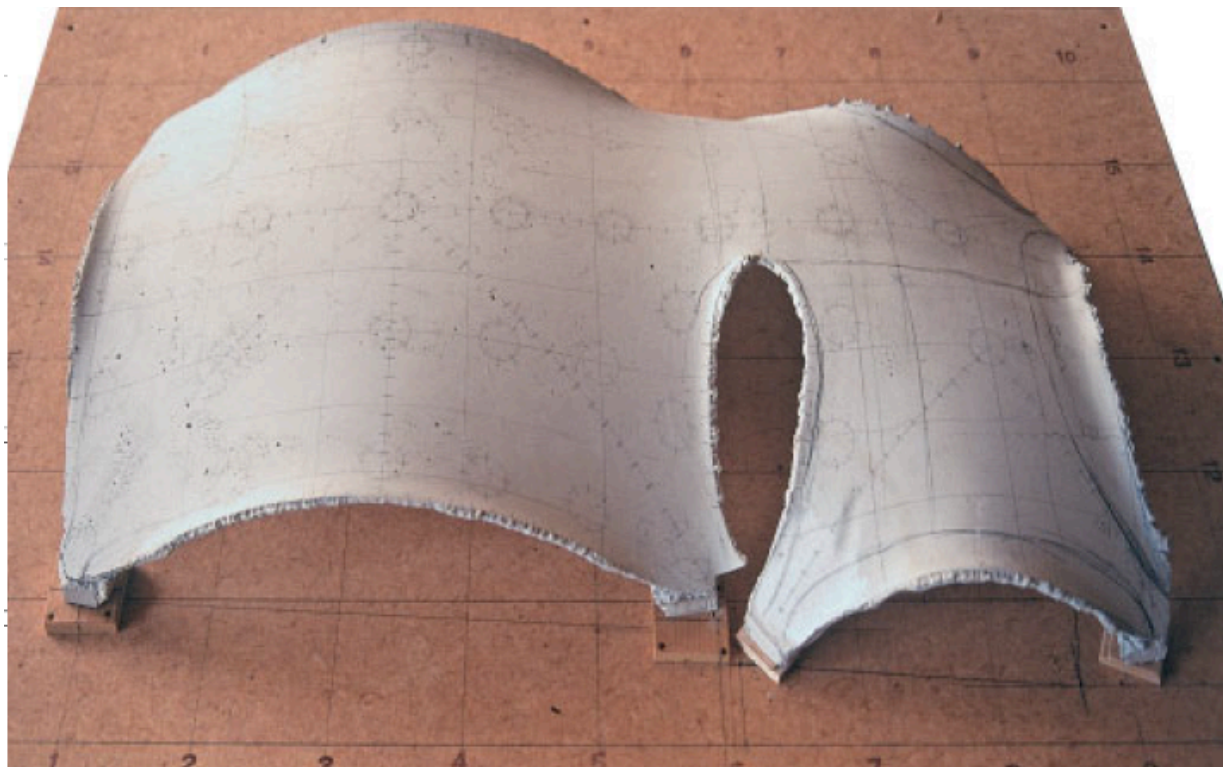
Hay un compromiso en sus estructuras laminares de cumplir con el objetivo utilizando todo lo mínimo.

Se usa el mínimo volumen: no se "encierra" más espacio del necesario. El cerramiento utiliza la mínima superficie posible, lo que equivale al menor gasto de energía. Utiliza la mínima cantidad de material, reduce el peso y mantiene las dimensiones pequeñas. Bajos esfuerzos de tensión conducen a un bajo mantenimiento de la estructura y a una mayor duración de la misma. Isler sostiene que uno debe intentar reducir el número de componentes del edificio. Una cáscara como cubierta debe ser resistente al clima e impermeable. De modo tal que no se necesita de una capa especial y así se evitan las juntas con todos sus problemas. Una cáscara pierde 3mm de su espesor en los primeros diez años, pero luego se mantiene estable durante décadas. La idea de minimizar el número de elementos en las estructuras laminares se lleva al límite; no hay vigas ni tabiques, es un elemento monolítico que cubre todas las necesidades.

Sus métodos de diseño son el producto de décadas de trabajo. Luego, con el uso de programas de computación se facilitó la búsqueda de forma para este tipo de estructuras.









## FORM FINDING THRUST NETWORK ANALYSIS

Lo que se denomina como “*Thrust Network Analysis*”<sup>7</sup>, Block lo define como una nueva metodología para generar diagramas y superficies abovedadas que funcionen solo a la compresión. Este método encuentra soluciones funiculares bajo cargas de gravedad, dentro de una determinada envolvente. Se utiliza geometría proyectiva, teoría dual y optimización lineal, lo que hace de este un método intuitivo de gráficos que provee soluciones a los problemas en tres dimensiones. El método es aplicable para el análisis de bóvedas estructurales históricas así como para el diseño de bóvedas nuevas.

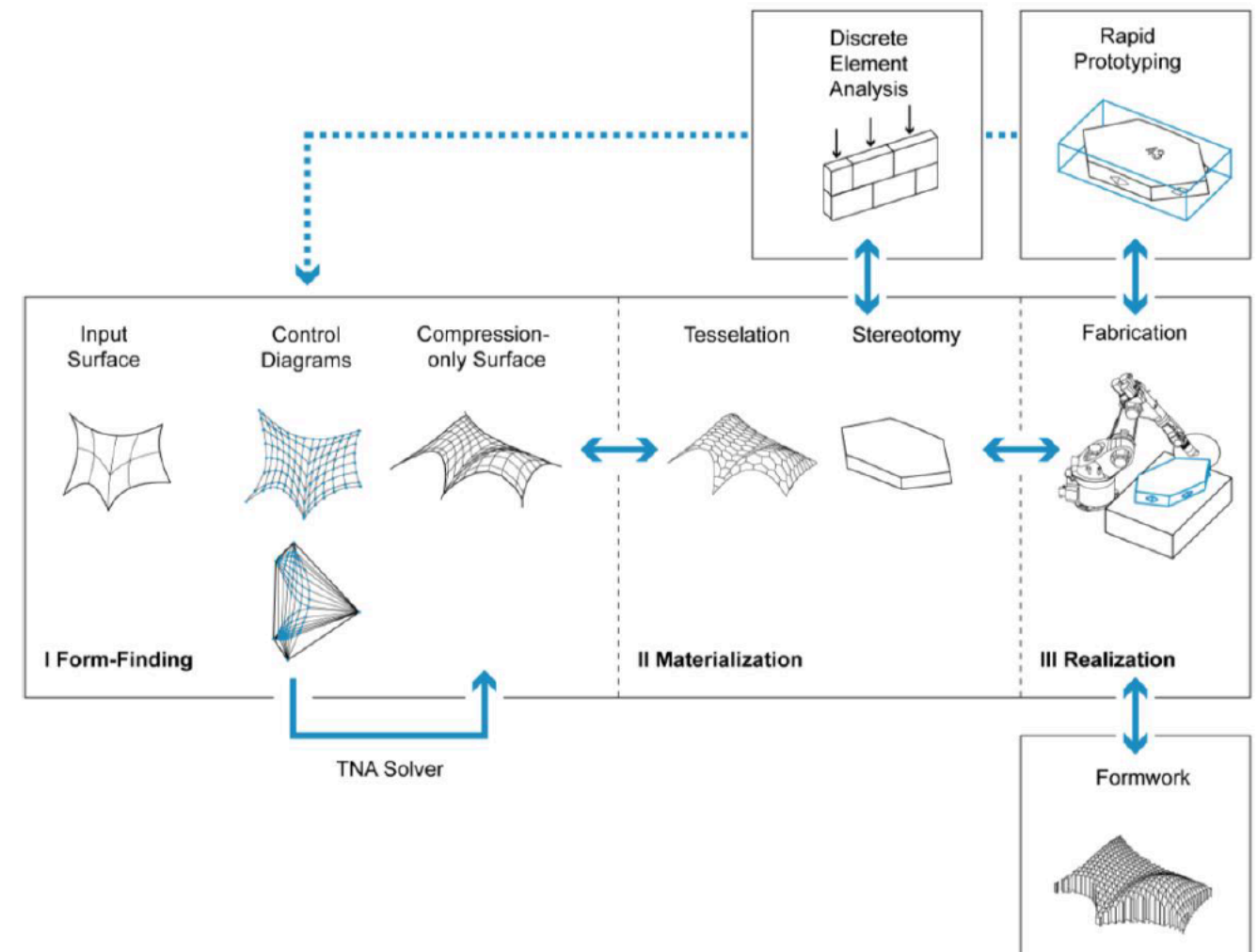
“Graphic Statics” es un método para explorar infinitas posibilidades de soluciones de equilibrio para el diseño de estructuras funiculares. La limitación que presenta es que soluciona sólo problemas en dos dimensiones. El nuevo método utiliza diagramas recíprocos para mantener las fuerzas de los diagramas en dos dimensiones. Para que esto funcione, se debe mantener una representación gráfica e intuitiva de las fuerzas en el sistema, una exploración interactiva de las posibles soluciones de equilibrio dentro del mínimo y máximo de thrust.

Hay un grado alto de indeterminación en la solución a los problemas tridimensionales, en donde el usuario debe poder identificar y controlar las variantes del sistema de equilibrio, y verificar las incógnitas a través de la optimización del problema.

Block resalta en su investigación, cómo en la actualidad, los progresos en computación y particularmente en los sistemas CAD (*Computer Aided Design*) hacen posible el modelado de formas tridimensionales muy complejas. Estos desarrollos importantes en la tecnología y en la computación dan como resultado una amplia exploración del diseño arquitectónico, haciendo posible la generación de nuevas y complejas formas, al margen de si estas son estructuralmente estables.

Se hace hincapié en que las soluciones estructurales alcanzadas para hacer posibles estas nuevas formas suelen utilizar una gran acumulación de material. Según explica, esto se debe a que hay una falta de pensamiento estructural durante el proceso de diseño. Lo que suele suceder en la práctica, es que se promueve un proceso arquitectónico que está desconectado

de las estructuras, en donde se ignora los requerimientos estructurales. Se requiere de un ingeniero que se presenta hacia el final del proceso, para poder hacer posible la materialización del proyecto. Este tipo de proceso unidireccional resulta en estructuras pesadas, con exceso de material y detalles que no concuerdan con la totalidad. Hoy en día, es responsabilidad del diseñador tomar conciencia del medio ambiente y hacer que sus construcciones no utilicen más recursos naturales de los que necesitan.



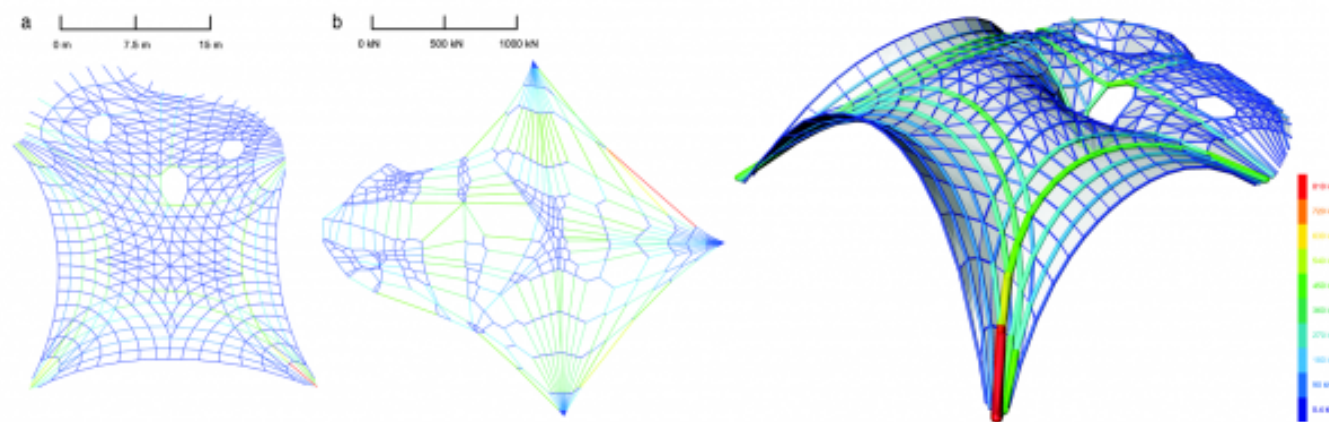
<sup>7</sup> Block, Philippe. “*Thrust Network Analysis – Exploring Three-dimensional Equilibrium*”. 1 de Mayo de 2009. Tesis de Doctorado en Filosofía de la Arquitectura: Tecnologías Constructivas.



## RHINO VAULT

El plug-in rhinoVault<sup>8</sup>, de Rhinoceros® surge para investigar la búsqueda de formas estructurales, utilizando “Thrust Network Approach”, para crear de forma intuitiva y explorar estructuras sometidas sólo a la compresión. Se utilizan diagramas recíprocos, una forma rápida e intuitiva, con las mismas ventajas que técnicas como “Graphic Statics”, pero abarca el problema en tres dimensiones. El sistema es transparente y comprensible, posibilita la generación de formas interesantes con una comprensión sobre los principios estructurales que la componen.

En el año 1996, Eladio Dieste resalta que las estructuras son resistentes gracias a su forma y no como resultado de una acumulación de material. Según Dieste, no hay nada más noble y elegante, desde el punto de vista intelectual, que resistir por medio de la forma.



## 3D CONCRETE PRINTING

El equipo de profesionales bajo el nombre de “Freeform Construction” en la universidad de Loughborough<sup>9</sup> está a cargo del desarrollo de procesos por adición en grandes escalas, para la manufactura de las piezas de un edificio. El trabajo ya ha sido plasmado en lo que se llama “3DCP”, un proceso de manufactura por adición, capaz de producir objetos arquitectónicos en escala real para ser utilizados en la construcción. Ahora se está trabajando en técnicas de refuerzo, los materiales y la robótica necesaria para aplicar el material.

Esta búsqueda responde a una necesidad que tiene la Arquitectura Moderna, que demanda tecnología constructiva más compleja en el diseño de edificios. Como las tecnologías constructivas actuales no pueden responder a las necesidades del diseño, se necesitan nuevos desarrollos facilitar la construcción a través de la tecnología. Hay técnicas de manufactura, que funcionan por adición, capaces de construir objetos físicos a partir de instrucciones que envía la computadora en forma directa. Esto quiere decir que se pueden crear formas complicadas que no se pueden lograr a través de los procesos convencionales de manufactura. Las máquinas que trasladan las instrucciones codificadas al objeto real, en general son usadas para producir componentes pequeños y para hacer el prototipo de productos nuevos, como parte del proceso de diseño.

Estas máquinas pueden ser utilizadas para resolver algunos de los problemas en la construcción más compleja, si se escalan para producir en masa las partes del edificio con la utilización de un material apropiado. La impresión de hormigón es uno de los procesos que hace esto posible, ya que el material es distribuido en forma precisa por medio del control de la computadora. Se puede utilizar para paneles revestimiento de doble curvatura, piezas estructurales complejas, componentes arquitectónicos, entre otros.

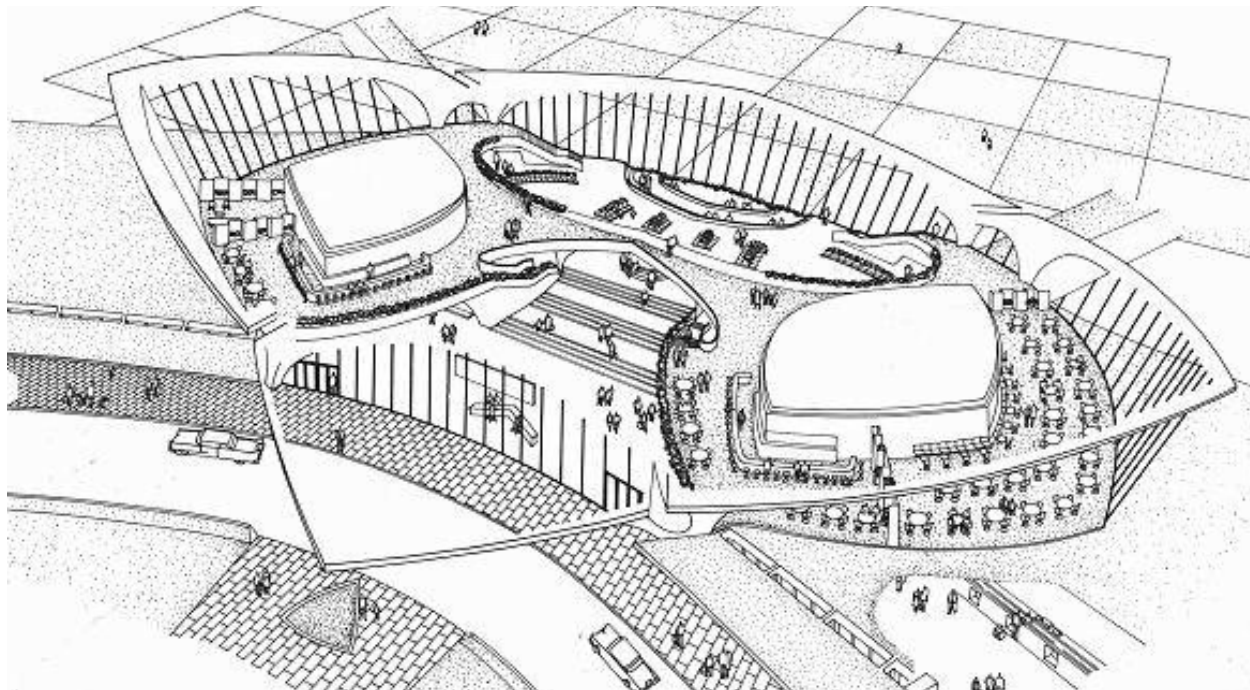
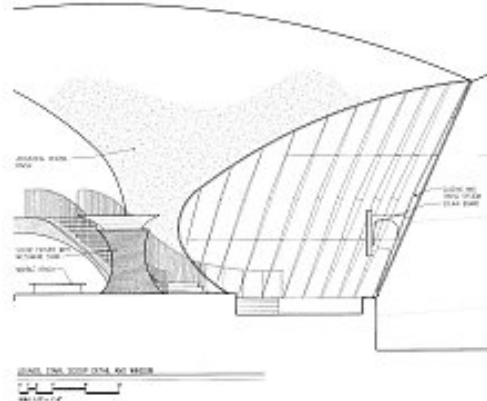
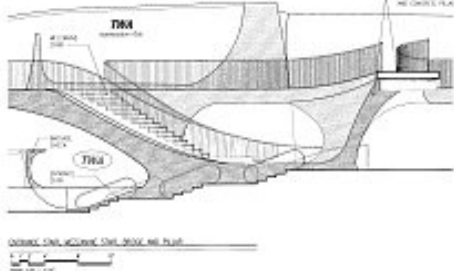
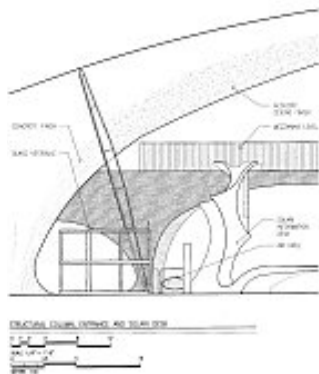
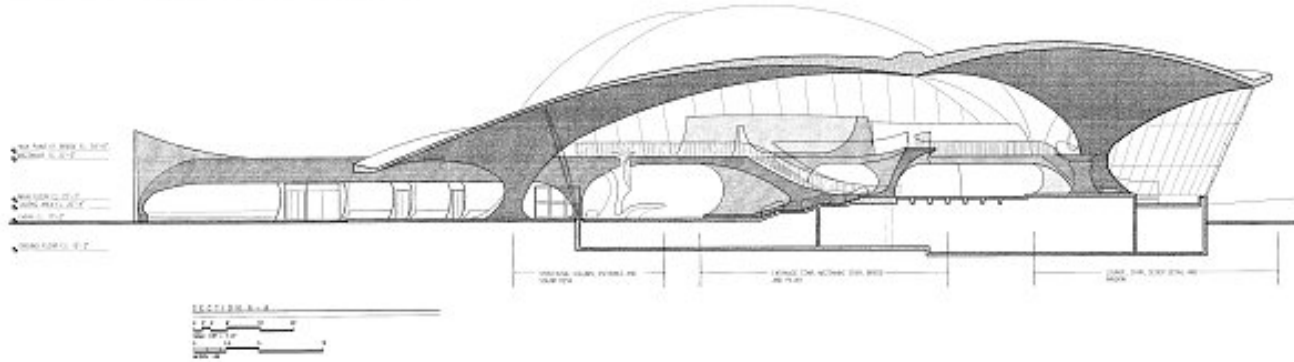
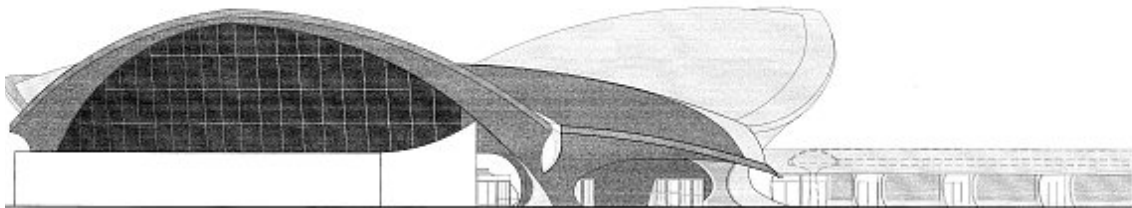
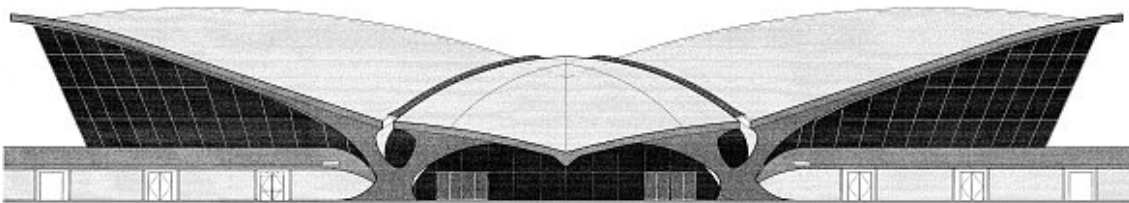
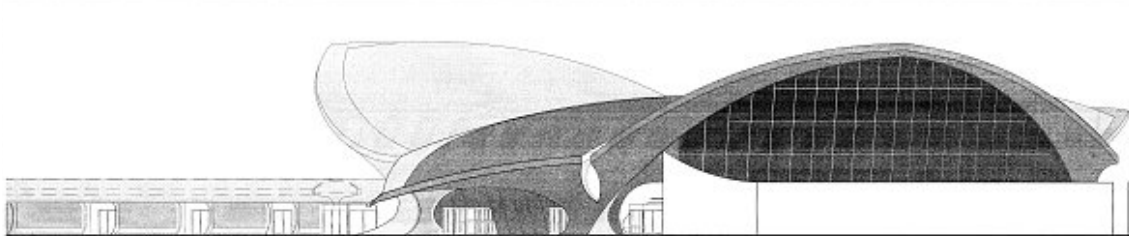


<sup>8</sup> <http://block.arch.ethz.ch/tools/rhinovault>

<sup>9</sup> Loughborough University. [http://www.buildfreeform.com/publicity\\_media.php](http://www.buildfreeform.com/publicity_media.php)



EERO SAARINEN – TWA TERMINAL





## **BIBLIOGRAFÍA**

THOMSON, D`Arcy. *On Growth and Form*. Cambridge University Press, 1961.

KAANDORP, JAAP A.. KÜBLER, Janet E. *The Algorithmic Beauty of Seaweeds, Sponges and Corals*. University of Amsterdam. 2001.

KAANDORP, JAAP A.. *Fractal Modelling. Growth and Form in Biology*. University of Amsterdam 1994.

BALL, Philip. *Shapes. Nature`s Patterns, a tapestry in three parts*. Oxford University Press, 2009.

BALL, Philip. *Branches. Nature`s Patterns, a tapestry in three parts*. Oxford University Press, 2009.

BALL, Philip. *Flow. Nature`s Patterns, a tapestry in three parts*. Oxford University Press, 2009.

BILLINGTON, David P. *The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering*. Princeton University Press, 1983.

BEUKERS, Adriaan. HINTE, Ed van. *Lightness. The inevitable renaissance of minimum energy structures*. Rotterdam, 2005.

BAIRD, Eric. *Alternative Fractals. A visual guide to fractal geometry and design*. 2011

UNIVERSITY OF IOWA: <http://nmita.iowa.uiowa.edu/database/corals/coralmnu.htm>



ANALOGÍA ORGÁNICA  
MARIA CHIARA GIBERTONI 2013  
PROYECTO ARQUITECTÓNICO





## ANALOGÍA ORGÁNICA - MEMORIA

EL PROGRAMA plantea el diseño de una galería para la exposición de esculturas. Se sitúa en Punta Ballena, Uruguay, sobre la playa de Solanas; dentro de la urbanización diseñada por Bonet. La ubicación alejada de la grilla ortogonal de la ciudad permite mayor libertad para la búsqueda formal y la materialidad. El edificio se relaciona en forma directa con la naturaleza, la playa, el mar y la vegetación. Con fácil acceso desde la ruta Interbalnearia, el edificio tiene una ubicación privilegiada frente al mar. Punta del Este recibe miles de turistas por año, especialmente en verano, por lo cual parecía interesante pensar un espacio destinado al arte y eventos culturales al que pueda concurrir la gente. La galería consiste de un gran espacio de 100 metros de frente hacia el mar, delimitado por una cubierta.

LAS ESTRUCTURAS DE LA NATURALEZA son las formas utilizadas para ser análogas con la arquitectura. El coral tiene su módulo que es el pólipo, es la parte. Este crece en relación al entorno y se adaptaba a las circunstancias de su medio ambiente. Como reflexión, se elige un módulo que va a ser la parte que compone el todo. En sí, al igual que en la naturaleza, la unidad sola tiene una forma determinada, pero la idea es que la sumatoria de un mismo módulo tiene un crecimiento indeterminado, por ende resulta en formas impredecibles. Se busca colonizar el terreno a través de la repetición del módulo

EL HEXÁGONO es el módulo que se eligió como síntesis del estudio de las estructuras coralinas. El hexágono va a ser la pieza que domina y coloniza todo el terreno. Se toman los parámetros y la lógica que se vio en los patrones de la naturaleza para generar patrones que organicen la arquitectura. "El hexágono pavimenta". El hexágono es una forma primaria definida, pero la sumatoria de hexágonos puede resultar en morfologías muy variadas.

LA BÚSQUEDA DE FORMA dirigió el proceso de diseño. Fue el gran desafío del proyecto encontrar el por qué de la forma. En varias etapas se hicieron distintas aproximaciones a la forma, que si bien eran interesantes, eran difíciles de construir. Gracias a la incorporación al proyecto de la metodología "Form Finding" es que logré encontrar una forma responde a las exigencias estructurales, es consecuencia de la misma. Utilicé la nueva metodología para generar diagramas y superficies abovedadas que funcionen solo a la compresión. Este método encuentra soluciones funiculares bajo cargas de gravedad, dentro de una determinada envolvente, un proceso de manufactura por adición, capaz de producir objetos arquitectónicos en escala real para ser utilizados en la construcción.

LA CÁSCARA es una estructura laminar, liviana, cuya forma está diseñada para que los esfuerzos sean de compresión. Esto fue posible a través de la utilización un software RhinoVAULT para Rhinoceros,



una herramienta que permite la búsqueda de forma de manera intuitiva para el diseño de estructuras laminares de compresión. Este plugin para Rhino me permitió investigar y crear, de forma intuitiva, las estructuras sometidas sólo a la compresión. El software fue una herramienta primordial para el estudio y la investigación de las nuevas posibilidades formales que presentan las formas comprimidas.

Se trabaja con dos diagramas de dos dimensiones, uno de forma y uno de fuerzas. El diseño se adapta a través de la forma, manipulando ambos diagramas en forma bidireccional y de manera interactiva. Al modificar el diagrama de forma, se modifica el de fuerza, y lo mismo sucede a la inversa. Lo importante es que estos dos diagramas deben estar en equilibrio. Una vez que se logra esto, se calcula el equilibrio vertical, lo cual resulta en un diagrama de fuerzas tridimensional; este representa la forma de la estructura comprimida. Este es una manera de proyectar este tipo de estructuras complejas tridimensionales de forma intuitiva.

El diagrama de forma define el perímetro y el diagrama de fuerza (que representa el camino de las fuerzas en el diseño de la planta) define las fuerzas horizontales que componen la estructura, y cómo se distribuyen en forma proporcional. Como en el trabajo de cáscaras de Isler, se utiliza el concepto de la utilización mínima de material. Las estructuras laminares tienen esta característica de por sí, se

utiliza el mínimo de materia, el mínimo peso, para cubrir el máximo volumen y recorrer grandes luces. Como sólo se somete a esfuerzos de compresión la estructura requiere poco mantenimiento y tiene una duración más larga. La idea de reducir el número de elementos se sintetiza en un construir un único elemento monolítico que abarca la totalidad del edificio.

**LA PIEZA** que se diseñó para el techo es de forma hexagonal. Es una pieza de hormigón armado, prefabricada, que mide 1,20m en planta y 30cm de espesor. Se utilizan más de 2000 piezas para la construcción del techo. Este módulo compone la cubierta, como el ladrillo arma una pared. Es un sistema de mampuesto, una suerte de manualidad artesanal. El hexágono es el módulo unitario que arma la estructura. Por más de que las piezas sean grandes, si se pone en relación con la escala total del edificio, su tamaño minúsculo. El techo se lee como un conjunto orgánico, no se observa la pieza por sí sola, sino como parte de una gran masa.

El hexágono está cerrada en la cara que da al exterior del edificio con un cerramiento de fibra de vidrio. Este plástico es liviano, tiene alta resistencia, durabilidad y bajo mantenimiento. Al ser translucido posibilita la entrada de luz natural al edificio. Por su peso es más fácil de transportar que el vidrio y permite la conexión con la pieza de hormigón antes de la colocación en el sitio, ya que no es frágil como el



vidrio. El prefabricado de hormigón está diseñado para recibir el cerramiento plástico, las piezas contemplan cómo va a ser la unión de las dos partes en el ensamblaje previo a la construcción.

En la cara interna de la pieza se coloca un sistema de parasol de madera que sigue el diseño hexagonal. Esta es una pieza única que se inserta en todos los hexágonos que están orientados hacia el noreste, que están más expuestos a los rayos solares. Es importante incorporar este elemento donde es necesario para controlar la entrada de luz natural en el edificio.

Así pues, se construye la cimbra para el armado de la cubierta y se trae el módulo ya ensamblado desde la fábrica, listo para colocar.

Otra forma de construir estas piezas es a través de la impresión 3d en hormigón. Es una alternativa constructiva que abre un nuevo abanico de posibilidades formales que antes eran impensables. Si bien la tecnología todavía está en desarrollo y aún no se ha utilizado para grandes estructuras arquitectónicas, es lógica su aplicación. Posibilita que se puedan hacer piezas todas distintas ya que el software dicta por medio de sistemas cad la forma exacta para imprimir.

**LAS INSTALACIONES** de la galería se distribuyen a través de un piso técnico. El aire acondicionado no era posible colocarlo en el cielorraso, la colocación del piso técnico era la solución más eficiente. El

piso técnico tiene un espacio de 30cm, para poder pasar todas las instalaciones del aire acondicionado que distribuyen el acondicionamiento para aclimatar el interior del edificio. Normalmente se utilizan en el piso paneles con forma cuadrada en planta; en este caso se usan pisos con forma de hexágono y terminación de parquet.

La cáscara, como cubierta, debe ser resistente al clima e impermeable, de modo tal que no se necesite una capa especial, y así se evitan todos los problemas que traen las juntas. En relación a la forma de la cáscara se plantea que la misma tiene una especie de canaleta en las caras que tienen arcos, para llevar las aguas pluviales por la pendiente hacia las canaletas de borde. Este tipo de detalles también son utilizados en la TWA de Saarinen. Otro aspecto a tomar en cuenta para el desagüe de aguas pluviales es la pendiente que se le da a la terminación de la pieza hexagonal. El plástico que cubre la misma tiene forma de sección de esfera para que la pendiente hace que el agua no se estanque y pueda circular naturalmente por la pendiente del techo hacia las canaletas del piso.

La instalación eléctrica está pensada para que circule por el piso técnico. La iluminación artificial del edificio y de las obras es a través de spots de LED aplicados en el piso siguiendo la trama de los hexágonos, y lámparas de pie que normalmente son utilizadas para la iluminación de exteriores.



