

Dedicado
A los que siguen buscando.

Agradecimientos:

A Lina Obregón, Luis Sañudo, David Vanegas y muy especialmente a Fernando Sierra (Elvis) por iniciar el estudio de la forma y la biónica en Colombia. A Juan Fernando Muñoz y nuevamente a David Vanegas por sus valiosos aportes y correcciones. A Luis Alfonso Ramírez por formar. A Martha Sofía Prada, por su apoyo constante. A los estudiantes que participaron en el proyecto, especialmente a Federico López, Oscar Cubillos, Camilo Martínez y Ana Lucía Mesa.

Elsie y Ever.

A mi hermana Diana, por ser mi primera maestra de diseño. A Teresa, Martha, Alveiro, Edison, Daniel, Sara, Sandra, Raio de sol, Óscar y Juancho, por estar.
Ever.

A mi familia: José, Catuchita, Juanse y a mi esposo Hernán, muchas gracias por estar ahí presentes, por ser mi punta de lanza en todo lo que emprendo, por creer en mis sueños y lo más importante, darme la confianza para cumplirlos. A Ever también muchas gracias, por haber sido mi alumno, mi compañero en este proyecto y por poderme dejar apreciarlo hoy, como un maestro.
Elsie.

xxx

Patiño Mazo, Ever. Arbeláez Ochoa, Elsie María.
Generación y transformación de la forma / Ever Patiño Mazo / Elsie
María Arbeláez Ochoa - Medellín: UPB, 2009.
xxx p.; 17 x 24 cm.
ISBN: 978-958-696-xxx-x

1. XXXX

© xxxx

© xxxx

© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

Generación y transformación de la forma

ISBN: 978-958-696-xxx-x

Facultad de Diseño

Primera edición, 2009

Gran Canciller UPB: Mons. Alberto Giraldo Jaramillo

Rector General: Mons. Luis Fernando Rodríguez Velásquez

Vicerrector Académico: Pbro. Jorge Iván Ramírez

Decano Escuela: Samuel Ricardo Vélez González

Director de la Facultad: Julián Antonio Ossa Castaño

Editor: Juan José García Posada

Portada, diseño y diagramación: Masif · www.ilovemasif.com

Fotografía solapa: Picnic · www.picnicfotografia.com

Corrección: Ana Cristina Aristizábal

Coordinación de producción: Ana Milena Gómez C.

Dirección editorial:

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2009

Email: editorial@upb.edu.co

www.upb.edu.co

Telefax: 415 9012

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 0590-18-03-09

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Generación y transformación de
LA FORMA

“Morfología, geometría, naturaleza y experimentación”

Ever Patiño Mazo / Elsie María Arbeláez Ochoa

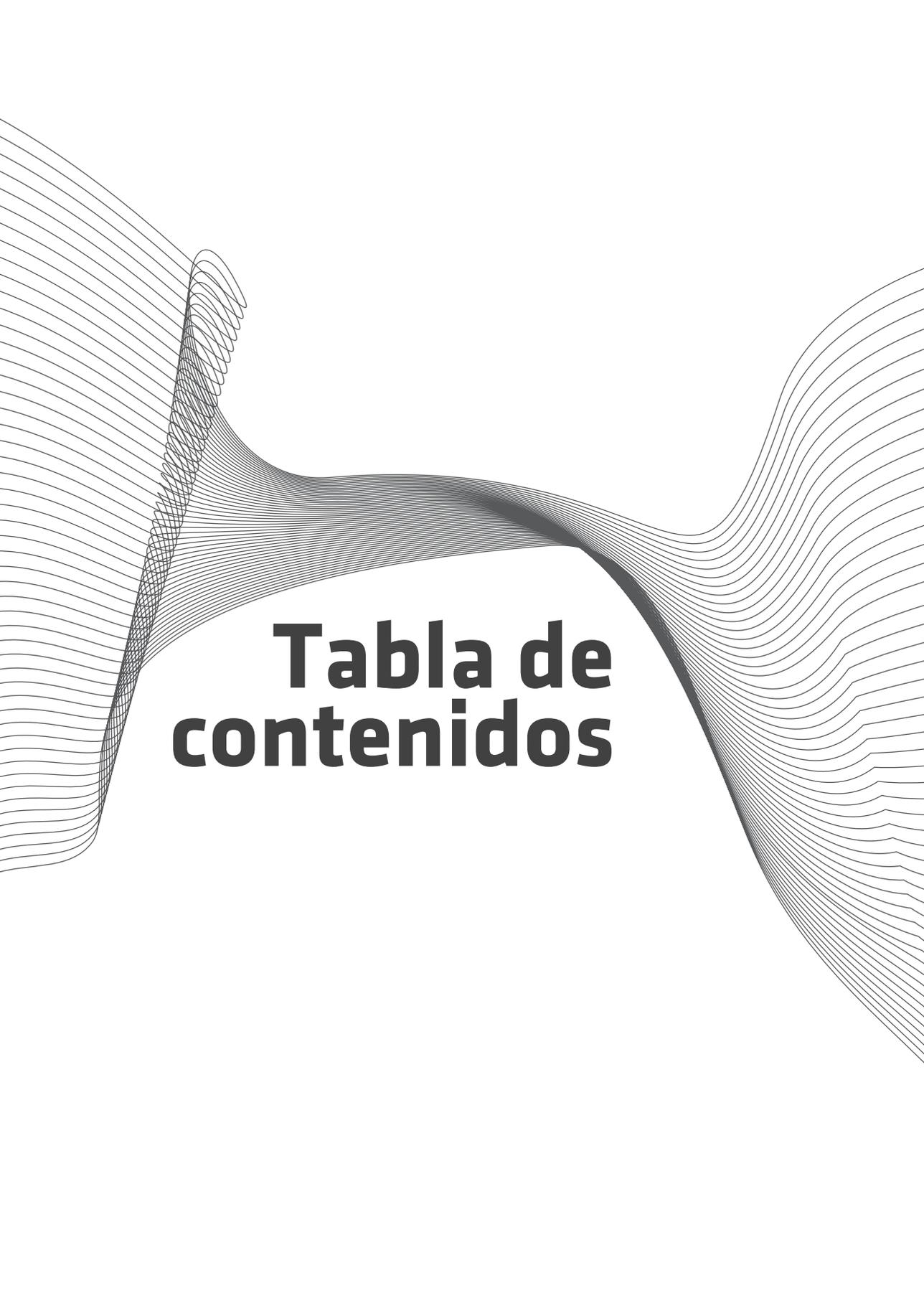
An abstract graphic composed of numerous thin, black, wavy lines that flow across the page, creating a sense of movement and depth. The lines are more densely packed in some areas, creating a darker, more textured appearance, while in other areas they are more sparse. The overall effect is a dynamic, organic shape that frames the central text.

Tabla de contenidos

INTRODUCCIÓN	10
1. LA MATERIA	14
MATERIA Y FORMA	18
ESTRUCTURA DE LA MATERIA	19
ESTADOS DE LA MATERIA	20
2. GENERALIDADES DE LA FORMA	22
LA SELECCIÓN	25
Selección fundamental	26
Selección natural	26
Selección cultural	27
CONFIGURACIONES	28
CONFIGURACIÓN LOCAL MICROSCÓPICA	28
Propiedades interiores	28
CONFIGURACIÓN GLOBAL MACROSCÓPICA	29
Propiedades exteriores	29
CONFIGURACIÓN LOCAL MACROSCÓPICA	30
Propiedades de la frontera	31
Variables básicas	32
CLASIFICACIONES DE LA FORMA	33
3. LA FORMA GEOMÉTRICA	32
POLIEDROS PLATÓNICOS	37
Tetraedro	38
Cubo	40
Octaedro	42
Dodecaedro	43
Icosaedro	45
Teorema de Euler	46
TRANSFORMACIONES GEOMÉTRICAS	47
Truncación	47
Estelación	47
Dualidad	47
SÓLIDOS ARQUIMÉDICOS	48
SÓLIDOS CATALANES	50
POLIEDROS KEPLER-POINSOT	51
OTROS POLIEDROS	51
SIMETRÍAS, REDES Y AGRUPACIONES	53
REDES	55
AGRUPACIÓN ESPACIAL	57
Agrupación lineal	57
Agrupación en Malla	58
Agrupación en tres direcciones	60
SUPERFICIES Y CUERPOS CURVOS	62
Superficies curvas no desarrollables	63
Superficies de revolución	64
Superficies curvas de traslación	65
Superficies regladas	66
Superficies complejas	67

4. MODELO DE BÚSQUEDA GEOMÉTRICA	68
UTILIZANDO EL MONOEDRO REGULAR	73
UTILIZANDO POLIEDROS REGULARES	74
UTILIZANDO POLIEDROS SEMIREGULARES	76
UTILIZANDO POLIEDROS IRREGULARES	77
UTILIZANDO MONOEDROS IRREGULARES	79
5. LA FORMA EN LA NATURALEZA	82
GEOMETRÍAS EN LA NATURALEZA	87
Línea recta	87
Polígonos	89
Poliedros	93
Círculo	95
Secciones de círculo, ondas y formas sinuosas	96
Óvalos y elipses	97
Espirales	98
Segmentos de espiral	101
Espirales tridimensionales	101
Cuerpos y superficies con una curvatura	103
Dobles curvaturas positivas	104
Dobles curvaturas negativas	106
Poliedros irregulares	108
PATRONES EN LA NATURALEZA	108
6. PRINCIPIOS DE CRECIMIENTO NATURAL PARA FORMALIZAR	110
PRINCIPIOS DE GENERACIÓN	113
Crecimiento desde el interior	113
Crecimiento diferencial periódico	114
Crecimiento diferencial irregular	115
Crecimiento direccional	115
PRINCIPIOS DE TRANSFORMACIÓN	115
Caos y azar	116
Fractales	116
Efecto ecofenotípico	116
PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL	118
Superficies mínimas	118
Sinérgica	119
Simetría	120
PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO VISUAL	120
Phi (ϕ), el número de oro	121

7. MODELOS DE BÚSQUEDA NATURAL	122
LÓGICA RECONSTRUIDA	126
ETAPAS METODOLÓGICAS	127
Nivel 1. Expresivo y perceptual	128
Nivel 2. Formalizador y perceptual	128
Nivel 3. De desarrollo y aprehensión	129
Nivel 4. Innovador y propositivo	129
Nivel 5. Emergente e integrativo	130
FUNDAMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA	132
Bases conceptuales	133
Bases metodológicas	133
Bases actitudinales y aptitudinales	134
MODELO DE SÍNTESIS	134
MODELO DE CRECIMIENTO	149
8. LA FORMA EN LA CONSTRUCCIÓN HUMANA	154
LA FORMA NATURAL CON TECNOLOGÍA HUMANA	159
9. MODELO DE BÚSQUEDA EXPERIMENTAL	164
DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	169
Aplicación de la metodología	171
DIFERENTES TÉCNICAS	182
LISTA DE FIGURAS	184
BIBLIOGRAFÍA	188
FUENTES DE INTERNET	190
REFERENCIAS DE LAS IMÁGENES	191

The background consists of numerous thin, black, curved lines that flow from the top and bottom edges towards the center, creating a sense of movement and depth. These lines form a large, irregular white shape in the middle of the page, which serves as a backdrop for the text.

Introducción



<<No invento nada. ¿Puede el manzano pretender haber inventado las manzanas? Me sirvo de las formas para llegar a lo que no tiene forma. Mis estatuas son poemas de la vida. En lugar de expresarme en versos lo hago con la escultura.>>

Aristides Maillol

Christopher Alexander defiende que la forma es el fin último del diseño. Si esto es cierto, el estudio y la comprensión que el diseñador adquiera de las formas inmersas en el mundo tridimensional material le permitirán dominar y modificar las morfologías, para adaptarlas y utilizarlas en cualquier problema o proyecto específico de diseño.

El presente texto hace parte de los resultados del proyecto de investigación que lleva el mismo nombre: Generación y transformación de la forma, de la línea de investigación de morfología experimental del Grupo de estudios en diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana, cuyo objetivo fue estudiar la forma tridimensional desde dos perspectivas pertenecientes a la dimensión material. Es decir, para efectos prácticos de profundización, se dejaron a un lado las dimensiones social y cultural, ambas relevantes en el estudio del diseño, para poder así explicar de manera específica bajo un método empírico analítico los orígenes de la forma material, describir su transformación y proponer las técnicas de experimentación para generarla y transformarla.

La primera perspectiva parte de las características generales de la materia, y de las propiedades que permiten que la forma se genere y se transforme. Y la segunda, está centrada en la manera como la naturaleza viva, construye, muta y selecciona, adaptando sus morfologías a la necesidad de seguir viviendo.

El texto comprende entonces, en primer lugar, un compendio de teorías que sustentan esta búsqueda y fueron parte del marco de referencia; y en segundo lugar, los resultados de la investigación, que son análisis y caracterizaciones de la forma; una serie de metodologías y técnicas desarrolladas que permiten sintetizar las formas y contribuyen a la elaboración de propuestas en relación con nuevas estructuras basadas en los principios constructivos encontrados.

La frase de Aristides Maillol enuncia la manera como se definió el camino para desarrollar la investigación. No se partió de un análisis abstracto, sino por el contrario, desde la definición y el estudio de las formas ya existentes, con sus principios constructivos y transformadores; fue lo que permitió encaminar el eje teórico y metodológico del proyecto. Esto quiere decir que se utilizan las formas: como habitadoras del Universo inerte o como hijas de la naturaleza viva para llegar a lo que no tiene forma, a lo que aún está en una idea y que pronto va a ser proyectada.

Eje temático

Para empezar a hablar de la forma, habría que comenzar por el principio, por el Big Bang originado hace unos 15.000 millones de años con la explosión que arrojó desde su centro fragmentos de materia que estaba altamente condensada, dando lugar al Universo, y a toda la materia prima de lo que habita en él. (Ver figura 1)



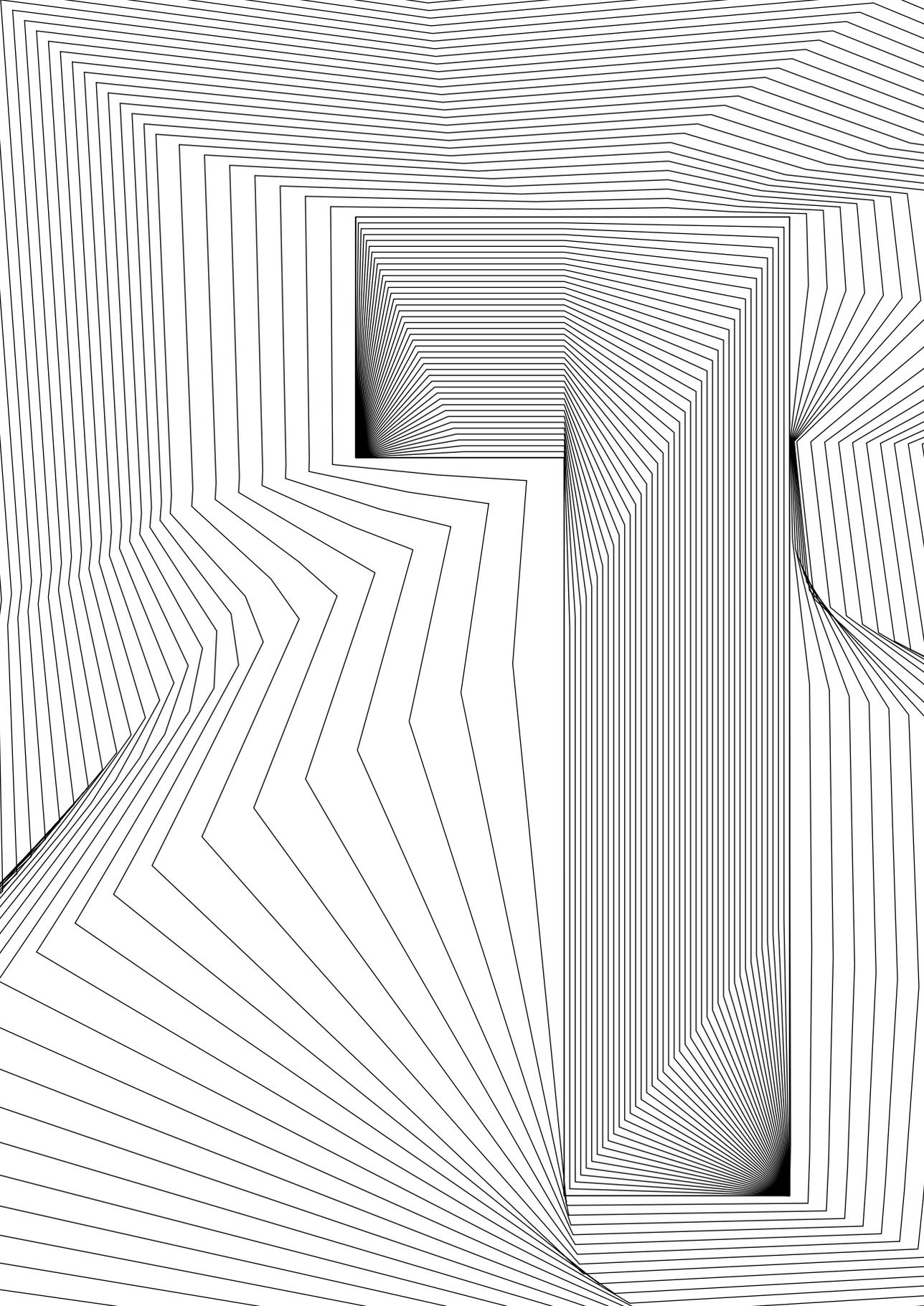
Fig. 1. Representación del Big Bang y del universo en expansión.

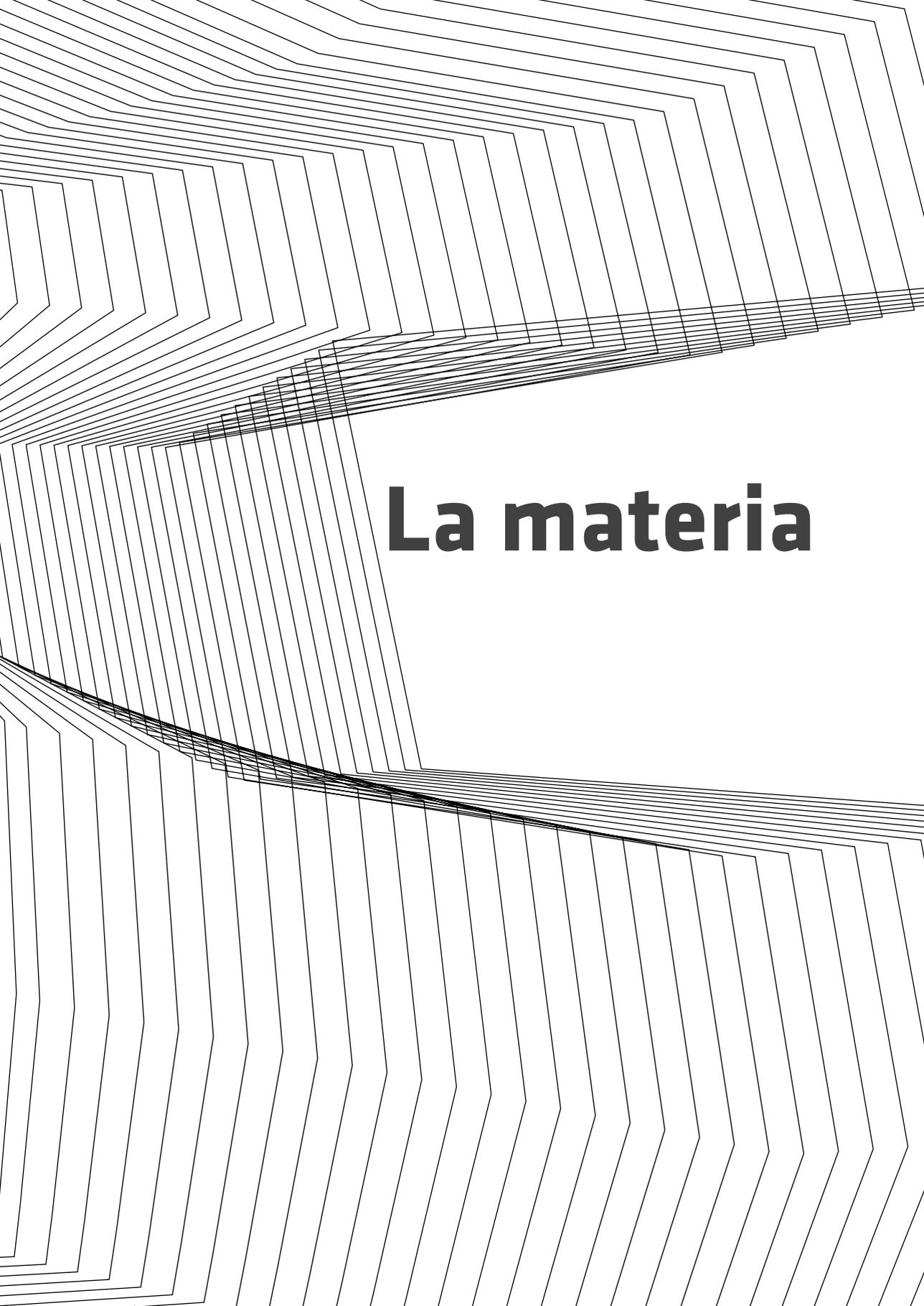
Abordar este concepto sería una tarea larga y compleja para un diseñador, y el querer explicar esta gran explosión y desentrañar las causas de lo existente, del origen de la materia, del átomo y de la vida, intentando abordar y relacionar planteamientos de gran complejidad, tanto científicos como filosóficos, religiosos y antropológicos, sería una misión bastante ambiciosa.

Es por esto que el texto obviaré este origen y comenzará hablando del concepto de materia, sus características y su potencialidad de generar todas las formas posibles. En segundo lugar, se definirá el concepto forma para determinar sus propiedades. El eje teórico de esta parte será la geometría, principal herramienta que posee el diseñador para dominar y estudiar las morfologías. Se mostrará cómo a partir del manejo de herramientas de variación geométrica y transformaciones topológicas y formales, el proyectista puede intervenir la configuración del espacio tridimensional para extraer de allí nuevas formas.

Posteriormente, se analizará la forma en la naturaleza desde una concepción enteramente geométrica, sin dejar de lado los estudios de D'arcy Thompson, Jorge Wagensberg y Frei Otto, pero adaptándolos a clasificaciones funcionales que el proyectista pueda utilizar. Se verán cuáles son los principios que la naturaleza utiliza para construir y cómo el diseñador los puede utilizar a través del uso de técnicas y metodologías que se desarrollaron en la investigación.

Por último, se tratará el tema de la forma en la construcción humana, relacionándola siempre con todo el eje temático que se ha seguido hasta el momento, tomando nuevamente los principios de la naturaleza, pero esta vez enunciándola como una metodología experimental que puede utilizar el diseñador para manipular las influencias físicas, tal y como hace la naturaleza, para que modifiquen y moldeen las formas que el propone.



The background of the page is a complex, abstract geometric pattern. It consists of numerous thin, black lines that overlap and intersect to create a sense of depth and movement. The lines are arranged in a way that suggests a three-dimensional space, with some lines appearing to recede into the distance while others appear to come forward. The overall effect is a dynamic, almost architectural composition that frames the central text.

La materia



La materia, como todo lo que habita en el Universo, ha cambiado, ha mutado y se ha transformado; dicha evolución respondió en su momento a razones religiosas, filosóficas o científicas. Para ahondar en este terreno y clarificar el porqué de las transformaciones, tenemos que hablar de una de las civilizaciones que más ha influido en el mundo contemporáneo: la cultura griega.

El concepto de materia tiene sus orígenes en el siglo VI antes de Cristo, en el primer período de la filosofía griega, en el momento donde todas las ciencias occidentales tuvieron su nacimiento, entre ellas la física. Para los sabios de la escuela de Mileto no había distinción alguna entre ciencia, filosofía y religión, para ellos lo único realmente importante era conocer la naturaleza esencial de todas las cosas, a esa constitución real la llamaron *Fisis*. El término física se deriva de esta palabra griega y en su primer momento se ocupó, entre otras cosas, de discutir acerca de la materia.

Los sabios de Mileto consideraron que al no haber diferencias entre ciencia, filosofía y religión mucho menos las iba a haber entre espíritu y materia. Ellos creían imposible tratar estos dos conceptos por separado; toda materia existente en el Universo estaba provista de algún tipo de vida, la cual fue dada como una aliento divino en el momento de su creación. Y por su planteamiento, los griegos más modernos los llamaron Hylozoístas en son de burla, que significa los que creen que la materia está viva.

Luego en la escuela de Elea se empezaron a trazar las primeras líneas divisorias que irían más tarde a fundamentar gran parte del pensamiento occidental. La unidad que los sabios de Mileto encontraban en todo fue reemplazada por la dualidad, una tendencia que finalmente terminó por dividir al espíritu de la materia y por consiguiente, al cuerpo del alma. El concepto siguió tomando fuerza hasta que en el siglo V, con Demócrito, se empezó a hablar por primera vez del átomo, en ese momento la unidad más pequeña de materia indivisible.

Se pensaría que ya con todo ese terreno abonado los pensadores lograron avanzar mucho más en el entendimiento de la materia, pero no fue así. Tardó casi unos dos mil años para que el concepto de materia fuera otra vez estudiado realmente con una perspectiva científica. Después de ganar adeptos la idea de la separación entre mente y materia, la atención de los filósofos se volcó hacia el estudio del espíritu, gracias a la gran influencia que tuvo el Cristianismo durante toda la Edad Media, el estudio del mundo material careció de toda importancia y atención.

Sólo fue hasta la llegada del Renacimiento que la ciencia logró liberarse del pensamiento aristotélico y eclesiástico para adentrarse en el conocimiento de la naturaleza. En el siglo XVII la filosofía de Descartes llevó hasta el extremo el concepto dual de la realidad; logró una división fundamental de dos reinos separados e independientes: mente y materia. <<Esta división cartesiana permitió a los científicos tratar la materia como algo muerto y totalmente separado de ellos mismos, considerando al mundo material como una multitud de objetos diferentes, ensamblados entre sí para formar una máquina enorme>>¹.

Fue sobre esta visión del mundo que Isaac Newton construyó las bases de la física clásica, en la cual todos los cuerpos estaban hechos de una sustancia material indestructible. En la física moderna, gracias al desarrollo de la Teoría de la Relatividad se resolvió el interrogante de la materia indestructible. Se demostró que la masa no tiene que ver nada con ninguna sustancia y que en realidad es una forma de energía; de esta forma, la materia se puede dividir una y otra vez, pero nunca obtendremos trozos más pequeños, sólo crearemos nuevas partículas que surgen de la energía del movimiento que posee el proceso. Esto se debe a que nunca se llega a una unidad indivisible tras dividir la materia; cuando dos partículas que finalmente logramos subdividir hasta la máxima expresión colisionan, generalmente se rompen en pedazos, pero estos pedazos no son más pequeños, son de nuevo partículas de la misma clase. En palabras de Fritjof Capra: <<Las partículas subatómicas son al mismo tiempo destructibles e indestructibles>>.

¹CAPRA, Fritjof. El tao de la física. Editorial Sirio, S.A. Málaga, España. 1983. Pág. 30.

Materia y forma

La materia es, en primera instancia, de lo que está hecho algo o con lo cual se hace algo. Tiene la potencialidad de generar todas las formas posibles. La forma no se opone en ningún motivo a la materia sino que la complementa; la segunda precede a la primera, la determina y la influencia. Un significado un poco más profundo de la materia es aquello de lo que está constituido algo. Esta definición descarta en algunos casos a la primera que es de lo que están hechas las cosas. El ADN no es el material del que esta hecha la célula, es su código genético, el código constitutivo de la forma que en este caso es la célula. Es muy diferente a los materiales de los que está hecha la célula o de lo que es la madera para la silla, por ejemplo. Por tanto, la materia no es solamente principio de elaboración, o sea el material, sino que es también principio de constitución.

Lo que el objeto es se lo debe a su forma, la forma es entonces el resultado final de diseño. La forma debe su existencia a la materia, siendo esta última el receptáculo de la primera. Quiere esto decir que sin materia no habría forma, pero la pregunta que nace inmediatamente es: ¿Toda materia está constituida como forma? Si toda materia tiene alguna forma, no habría dualidad alguna entre forma y materia pues serían prácticamente lo mismo. Para responder a esa pregunta es necesario hablar de los diferentes tipos de materia. Estudiando más adelante los estados de la materia constataremos que, si bien no hay forma sin materia, la materia puede existir sin forma, ambas son en algunos casos dos características aisladas.

Otro punto por tratar es lo que sucede en sí con la materia; aunque determina estructuralmente a los objetos y en general, a las cosas materiales, también debe poseer como tal una estructura interna que posibilite la configuración que da estabilidad al sistema final. La estructura que posee la materia puede ser ordenada o desordenada, pero en ambos casos es determinante en algunas de sus propiedades y por tanto, de la forma que se le dé. Para que la materia configure la forma, tiene que cumplir su función que es, en primer lugar, poseer una estructura que permita que no se desparrame por el espacio, y en segundo lugar, debe ser capaz de dotar de estructura a la forma. La forma es en definitiva, materia en función.

Estructura de la materia

Así como la forma, tomada macroscópicamente, posee una estructura de las mismas características, la materia o el material que permite dicha formalización también la tiene, y en este caso lo que posee la estructura es la configuración microscópica. Esa organización que permite dicha estructura está formada por átomos que se unen en moléculas, y éstos a su vez en elementos, los cuales terminan por conformar el material.

El átomo está formado por tres partículas subatómicas: protones, neutrones y electrones. Desde esta minúscula conformación ya se están enrutando las propiedades del material, las cuales establecerán la función que va a soportar la forma final. Por ejemplo, los electrones, particularmente los más externos, determinan la mayoría de las propiedades eléctricas, mecánicas, químicas y térmicas de los átomos y, por consiguiente, el ordenamiento y las características de la estructura atómica terminarán delimitando las prestaciones que tendrán no sólo el material sino la forma que se le va a dar a éste.

El átomo por sí solo no se presenta materialmente; ha de enlazarse en conjunto. El enlace entre átomos posibilita la disminución en la energía potencial que cada unidad utiliza, esto significa que el átomo es mucho más estable enlazado que libre. Aquí nuevamente entran a jugar las condiciones que le pone lo micro a lo macro; el tipo de enlace también está directamente relacionado con el tipo de material que se va a conformar. Los enlaces químicos entre átomos pueden dividirse en dos grupos: enlaces fuertes o primarios y enlaces débiles o secundarios.

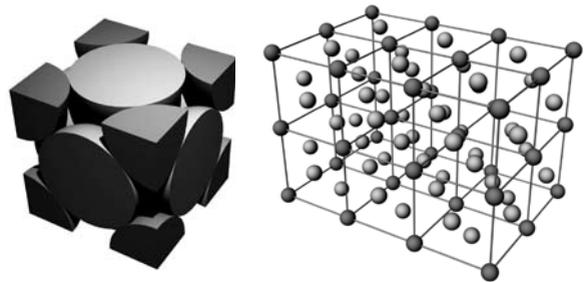


Fig. 2. Estructura cristalina cúbica centrada en las caras y red espacial de un sólido cristalino.

El enlace metálico, un tipo de enlace atómico primario, por ejemplo, se presenta en los metales sólidos, lo que posibilita que los átomos se empaqueten relativamente muy juntos en una estructura cristalina, determinando el tipo de ordenación sistemática, el número de átomos y su ubicación.

En la figura 2 se aprecia la estructura del aluminio, una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, eso significa que los átomos se organizaron de tal forma que en cada celda con forma de cubo se puede encontrar un equivalente de 4 de ellos. Los ocho octavos de los vértices cuentan como un átomo y las otras seis mitades suman los otros tres, dando un total de cuatro átomos por celda unidad. Luego, estas celdas se ubican en una red espacial, característica de un sólido cristalino.

Estados de la materia

Podría pensarse que el sólido es el único estado relevante y necesario para el estudio de la forma, pero dentro de los estados en los que se puede encontrar la materia hay otros dos característicos, que si bien por sí solos no poseen forma, pueden llegar a influenciar y permitir que determinada configuración sea adquirida, y son los estados líquido y gaseoso (existen otros dos estados no tan comunes, que son el plasma y los condensados Bose-Einstein, los cuales no trataremos ahora).

La diferencia entre los estados sólido, líquido y gaseoso está básicamente dada por el espacio entre los átomos, y ese espacio está determinado por la intensidad de las fuerzas interatómicas entre las moléculas, intensidad que la mayoría de las veces está relacionada con la temperatura, lo que quiere decir que para pasar de un estado a otro es necesaria la agitación o el aquietamiento térmico, que posibilita el flujo o la inmovilización de las partículas.

Los cuerpos en estado sólido poseen las moléculas unidas por la acción de intensas fuerzas cohesivas que permiten que haya un mínimo espacio entre ellas, permitiendo una forma y un volumen definidos (ver figura 3). Los átomos buscan la configuración con la energía más baja posible; como ha disminuido el espacio entre las partículas y por ende su vibración, los átomos buscan unirse hasta encontrar dicha configuración. La configuración también determina el tipo de sólido; si los átomos se unen de una manera ordenada, se dice que el material es cristalino, como el aluminio que vimos anteriormente o como la mayoría de los metales;

	Sólido	Líquido	Gas
Configuración partículas			
Volumen	Definido	Definido	Indefinido
Forma	Definida 	Indefinida 	Indefinida 
Compresibilidad	Incompresible	Incompresible	Compresible

Fig. 3. Características de los estados de la materia

si los átomos se disponen de una manera totalmente desordenada, sin seguir ningún tipo de patrón, estaríamos ante un material no cristalino o amorfo, como los polímeros y los vidrios inorgánicos.

A medida que las fuerzas cohesivas vayan disminuyendo y empiecen a ganar terreno las fuerzas de repulsión, el sólido irá fluyendo hasta volverse líquido. La forma estable del sólido se rompe generalmente por el cambio térmico, llevando a las moléculas a distanciarse y a vibrar aun más, por eso es que se pueden mover con cierta libertad. En este caso, las fuerzas interatómicas disminuyen, permitiendo que las partículas fluyan pero que se conserven con cierto grado de unión.

Los líquidos tienen forma indefinida pero volumen definido; esto hace que se comporten como los sólidos ante cargas de compresión, oponiéndose significativamente ante tales esfuerzos. Esta propiedad de ser incompresibles, los ha llevado a ser utilizados en aplicaciones donde es necesario transmitir energía a partir de soportar presiones, como gatos hidráulicos, frenos de automóviles y sistemas de retroexcavadoras. La fluidez formal los lleva a ser influenciados por fuerzas externas, como la gravedad actuando en el mar, la tensión superficial actuando en una gota, la piedra rebotando en la superficie de un lago, o el vaso conteniendo un poco de agua.

Si la temperatura sigue subiendo, las fuerzas de repulsión siguen aumentando. En los gases la vibración entre moléculas ha aumentado hasta tal punto que las logra distanciar casi por completo, se encuentran prácticamente en libertad ya que no hay una fuerza que las cohesione. Esta despreciable atracción entre partículas los lleva a tener volumen indefinido y forma indefinida. El volumen indefinido quiere decir que se pueden comprimir, disminuyendo la separación de las moléculas

en una situación fluida. El balón de fútbol, la lata de aerosol o la suspensión de un auto, aprovechan esta propiedad de compresibilidad.

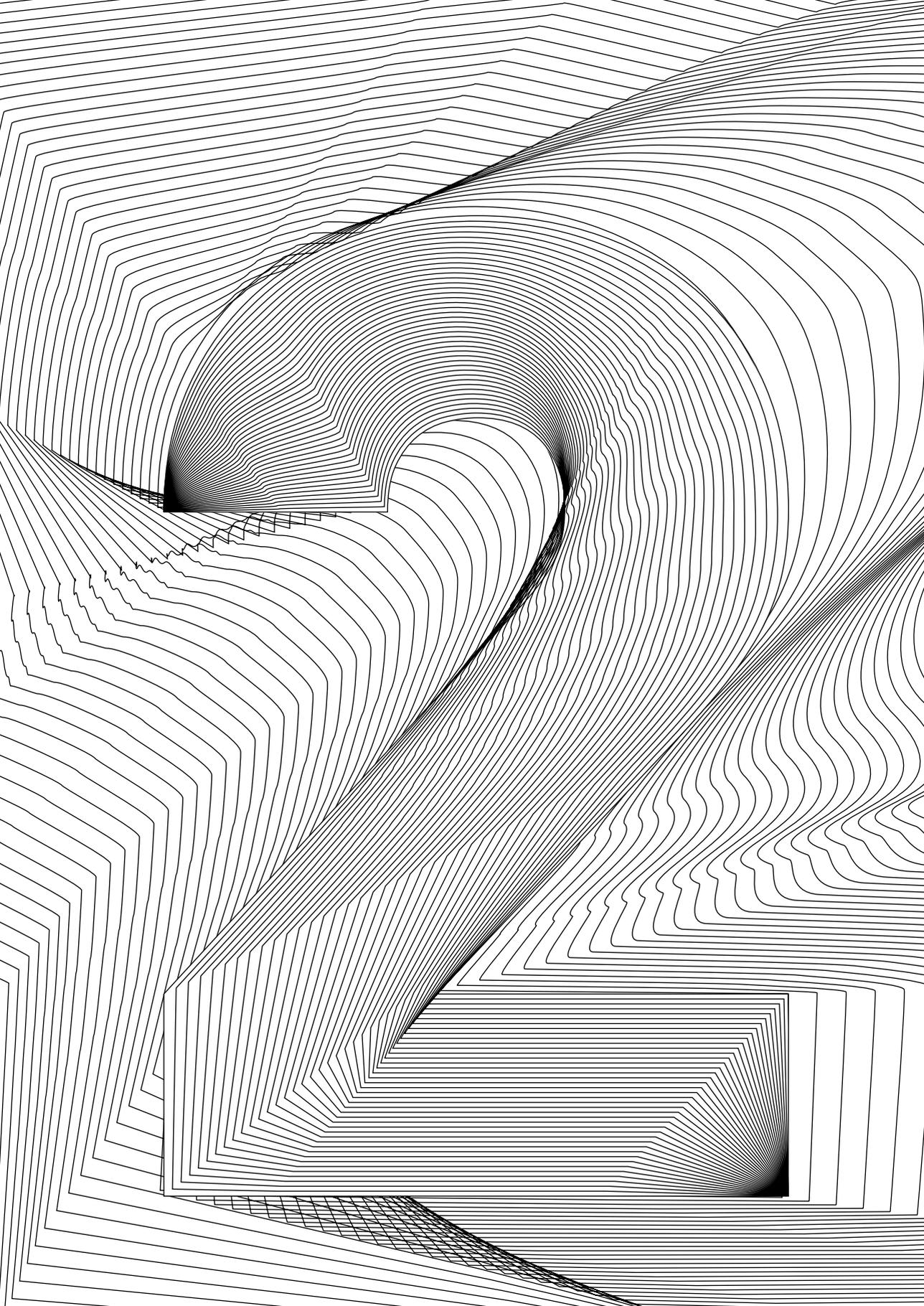
Hay diferentes combinaciones entre los tres estados, uno toma el lugar del medio o entorno, y el otro toma el lugar de 'contenido':

- El medio gaseoso puede contener gases, líquidos y objetos sólidos.
- El medio sólido puede contener en forma de cavidades, gases, líquidos y otros objetos sólidos.
- El medio líquido puede contener otros líquidos de diferentes densidades o de una misma densidad tendiendo a la mezcla; puede contener objetos sólidos y gases que tienden a salir.

Luego de haber reseñado, en términos generales, los principios básicos de la materia, podemos abordar los conceptos de la forma, teniendo cuidado en no desvincularlos del objeto de disertación, pero haciendo más énfasis en las propiedades y características de la forma, para así acercarnos al eje del discurso: la morfología.

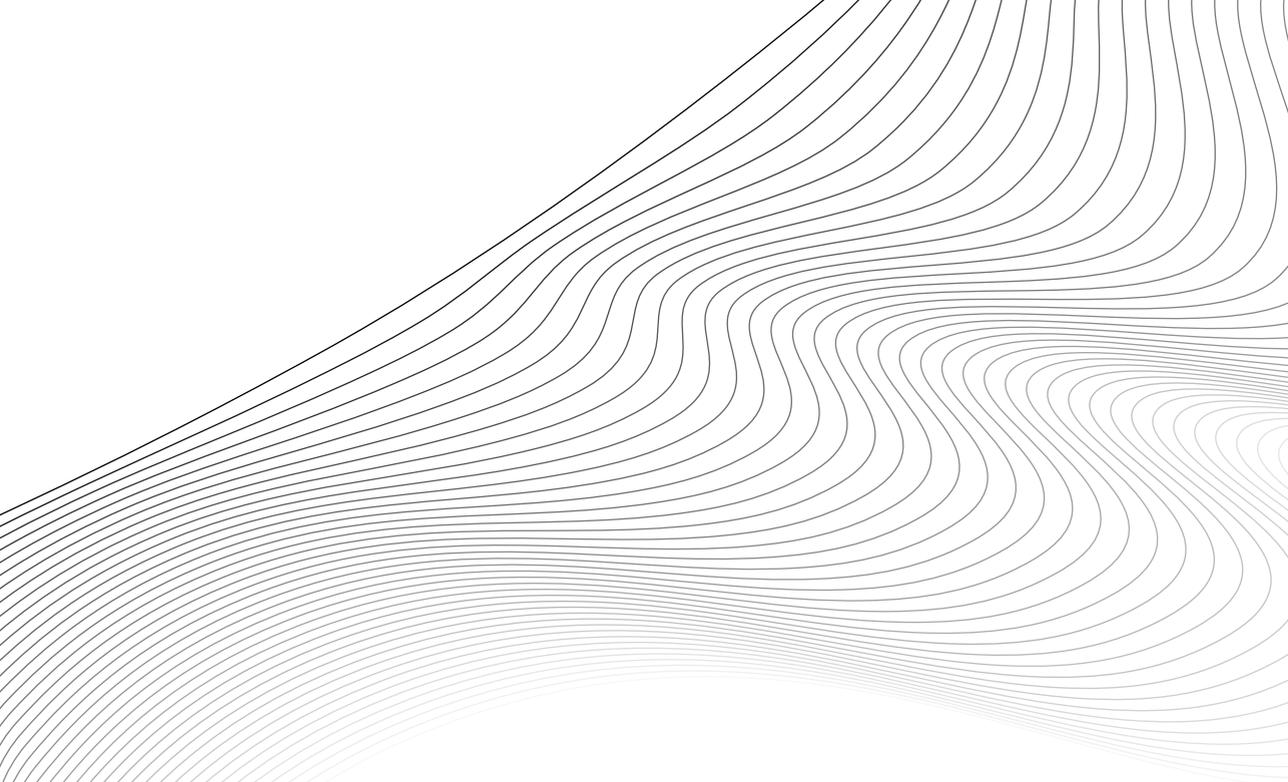
		CONTENIDO		
		Sólido	Líquido	Gas
MEDIO	Sólido			
	Líquido			
	Gas			

Fig. 4. Diferentes combinaciones entre medios y contenidos de los estados de la materia.





Generalidades de la forma



Habíamos planteado la relación existente entre el concepto básico de materia en función y la forma. Para que pueda haber forma ha de tener algún tipo de función; en la materia inerte la materia está en función de cohesionarse; en la materia viva (aunque podría ser un abuso del lenguaje, pues tanto la materia viva como la inerte están hechas de los mismo) la materia está en función de sobrevivir, y en la materia conformada por el hombre, tiene una función de utilidad especializada y particular. Por tanto, la materia está conformada en un espacio tridimensional; es la forma la que le da el soporte último a la función de la materia.

Aunque nuestro planteamiento intenta iniciar un camino hacia una teoría de la forma dirigida a arquitectos, ingenieros, diseñadores o artistas; persistirá en abordar la relación de la forma con la dimensión material y su función, esencialmente. El diseño se ha interrogado bastante acerca de qué es primero: ¿La forma o la función? Por supuesto, no ha habido una explicación convincente que sustente la mejor respuesta. El arquitecto Frank Lloyd Wright, hito de la arquitectura del siglo XX, promovió fuertemente la frase célebre: «La forma sigue a la función», en reacción a las influencias de lo decorativo en las artes aplicadas; desde entonces, muchos funcionalistas han querido enmarcar el diseño y la arquitectura en esa única dirección, sustentando que la forma que va a tener un objeto, obedecerá a las necesidades de la función.

En la naturaleza, la ambigüedad entre forma y función es inexistente; decir que la forma es el resultado de la función, o que la función es el resultado de la forma, como únicos caminos, sería minimizar la complejidad de su construcción. Desde lo natural, ambos son dos elementos indisolubles, paralelos; la forma influencia tanto a la función como la función a la forma, ambos se van modificando en busca de la optimización de los recursos. El resultado de dicha relación no es la forma ni la función, sino en sí el proceso, el camino que permitió la realimentación de ambos en busca de la supervivencia.

La selección

<<Podemos hablar así: todo lo que existe es el resultado de una selección>>.

Jorge Wagensberg

En general, las formas que existen han superado pruebas que les han permitido existir. La superación de esas pruebas de permanencia ha hecho que la naturaleza viva pueda sobrevivir, que la naturaleza muerta esté y que la construcción del hombre se pueda dar. Esos obstáculos no han sido más que un proceso de selección, donde se obtiene una ganancia, que es el perfeccionamiento de la función y la forma.

Es bien sabido que el primero en plantear la explicación para la evolución de las especies fue el biólogo británico, Charles Darwin. En 1859, Darwin presentó su teoría a la comunidad científica y académica con la publicación del libro *El origen de las especies*. Su teoría demostraba que todos los seres vivos eran el resultado de la evolución de un antepasado común, cuya necesidad de sobrevivir a las diferentes condiciones, y lo que él llamó selección natural, lo fueron variando, hasta generar nuevas especies.

En las formas vivas, la selección natural es el proceso por el cual los individuos pueden seguir viviendo; pero, ¿qué pasa con las formas inertes? Desde la percepción del proyectista podría ser mucho más interesante e importante saber cómo selecciona el hombre los objetos que deben existir. Para responder a estas preguntas, tomaremos la clasificación que propone Jorge Wagensberg en su libro *La rebelión de las formas*, en el que el autor expone tres tipos de selección: la selección fundamental, la selección natural y la selección cultural. Las tres cumplen con la misma función básica: permitir que la forma siga existiendo.

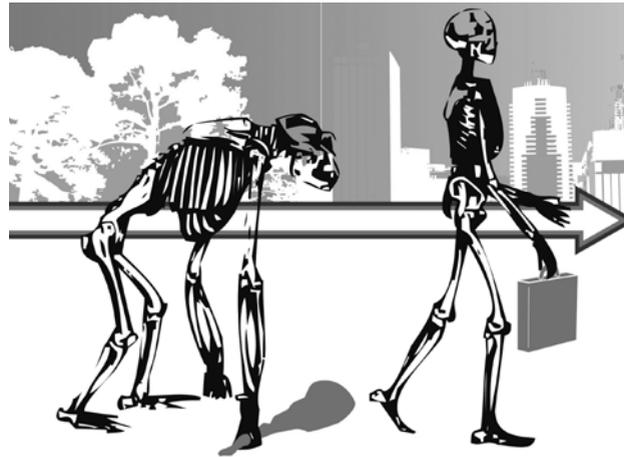


Fig. 4. Diferentes combinaciones entre medios y contenidos de los estados de la materia.

Selección fundamental

Con el Big Bang nació la materia, y con ella, una serie de reglas que la regulan y la restringen. Cuatro son las fuerzas fundamentales que gobiernan a este mundo: la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil, la fuerza electromagnética y la fuerza de gravedad; si pensamos en la edad del Universo podemos asegurar que las partículas que constituyen esta realidad fundamental tienen cierta estabilidad para que puedan haber existido por tanto tiempo. La gravedad, por ejemplo, permite que una piedra siga estando aprisionada contra la tierra, y no rebote por ahí como globo de piñata, tropezándose, fracturándose e intentando no seguir siendo piedra.

La selección fundamental, cuyo objetivo es posibilitar que las formas sigan estando, actúa en todo lo creado, pero a medida que la complejidad de los individuos aumenta y las partículas se van juntando con otras para formar átomos, y estos forman moléculas y se configuran luego en elementos para formar vida, disminuye la influencia que dicha selección puede efectuar en ellos. Es decir, las fuerzas fundamentales actúan en un oso hormiguero, pero ellas no fueron tan relevantes en la evolución de la trompa del animal, que le permite conseguir su comida y por tanto, sobrevivir. Tampoco lo son, las fuerzas nucleares de los átomos en la emergencia del caparazón de la tortuga, y mucho menos el electromagnetismo en el comportamiento de un grupo de personas.

Selección natural

A medida que las formas se vuelven complejas, ocurre lo mismo con el tipo de selección que actúa en ellas. La materia viva, en su especificidad, está hecha de materia inerte pero el permanecer no significa lo mismo en una que en otra. Ahora, el seguir permaneciendo significa seguir vivo y el seguir vivo adquiere mayor complejidad porque es una vida de vidas que se entrelaza; por ejemplo, con sus órganos el ser humano es un conjunto de sistemas, y estos a su vez tienen tejidos que están formados por pequeñas células con vida propia, que pueden hacer, si así lo decidieran, colapsar toda la red de relaciones.

La principal restricción no son ya las fuerzas fundamentales sino el entorno general que rodea al individuo. La selección trabaja en ese entorno, en el cual las interrelaciones con otros seres vivos son necesarias y muchas veces impredecibles, lo que aumenta las probabilidades de dejar de vivir. Se presentan relaciones simbióticas, de competencia y reproducción, y quizá la más temida, la relación entre presa y depredador.

La selección natural, por tanto, tiene que favorecer a aquello que permita seguir viviendo, y que le permita a una aleta modificarse y en futuras generaciones convertirse en pata para salir a la firmeza de la tierra y buscar nuevas provisiones. Si la materia inerte era capaz de resistir el entorno, la materia viva es capaz de modificar su relación con el entorno; se adapta, para ya no sólo soportar sino evolucionar y cambiar en búsqueda de su supervivencia propia y la de su especie. Wagensberg explica la relación con el entorno del siguiente modo: <<Por ejemplo, si la temperatura del entorno sufre fluctuaciones demasiado amplias (sube demasiado o baja demasiado), el ser vivo no sólo resiste (como haría una piedra), es decir, no sólo mantiene su identidad aunque sufra grandes variaciones térmicas. También es capaz de una o dos cosas más: mantener su propia temperatura o controlar desviaciones amenazadoras de las temperaturas externas. Para ello intercambia información con el entorno, detecta las fluctuaciones de riesgo, las interpreta y reacciona para anticiparse al drama. Eso es más que resistir, eso es capacidad para modificar>>³.

3. WAGENSBERG, Jorge. La Rebelión de las Formas. Tusquets Editores, Barcelona. 2004. Pág. 68.

Selección cultural

La complejidad de los individuos sigue aumentando; ahora no son sólo individuos vivos sino que además de ser vivos, están dotados de una inteligencia abstracta en donde el sujeto seleccionador no es el azar y el entorno sino la mente humana. El ser humano también es influenciado por las fuerzas fundamentales y su composición es la herencia de sus antepasados, pero lo que es mucho más potente en la selección es la capacidad que tiene de seguir viviendo a partir de las decisiones, que a la vez le regalan experiencia y por último, aprendizaje.



Fig. 6. La cultura actual ha logrado, sobre todo en los países del primer mundo, anticiparse a las necesidades. En la imagen: víveres dispuestos ordenadamente en un supermercado convencional.

Desde los comienzos de la Humanidad, el hombre ha tenido que aguzar sus sentidos para poder sobrevivir; en esa evolución logró lo que pocas especies pueden alcanzar: primero, resistió al ambiente; luego, modificó su relación con el entorno para después, utilizando su intelecto cada vez más desarrollado, anticiparse a sus necesidades. Si sabía que iba a sentir hambre en las noches, recolectaba víveres; ya no sentiría hambre porque se había anticipado a ella, pero la recolección no era suficiente, el aprendizaje le decía que, si bien no estaba pasando hambre, podía estar alimentándose mejor o acceder a la comida de una manera más fácil. El conocimiento de su entorno y sus presas le permitió al hombre desarrollar herramientas de caza; y desde entonces, es así como ha buscado seguir conociendo, a veces por necesidad, a veces por intereses morales, o simplemente por deseo, y en ese conocer ha desarrollado su propio mundo de formas, la mayoría inertes, las cuales sólo se acercan a la generación de la naturaleza porque fue un hijo suyo el que las construyó, pero son en sí otra topología morfológica, la de las formas culturales.

Las formas culturales, son pues, esas configuraciones construidas por el hombre, que son seleccionadas por el hombre, y en donde la selección natural tiene poco que aportar. El progreso se evidencia en la medida en que el hombre aprende de sus errores y se acerca mucho más al conocimiento, haciendo objetos y construcciones cada vez más óptimas y realizando de manera consciente la adaptación pertinente.

Configuraciones

Es necesario profundizar la disertación en torno a la forma, cada vez más. Ya hicimos algunos planteamientos sobre los procesos que permiten la selección de las formas, ahora trataremos un tema de orden analítico, que es la configuración. La configuración se refiere a la estructura geométrica que permite, en primera instancia, la lectura de la forma en lo concerniente a un acercamiento meramente estético, y en un segundo momento, a la disposición en un espacio tridimensional que posibilita el análisis estructural.

Habíamos mencionado cómo la geometría interna que tenía la estructura de la materia, repercutía en las propiedades de su forma final. Tomando la clasificación que propone el investigador Mg. Andrés Valencia, coordinador del Grupo de Estudios en Diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana, la geometría interna podríamos nombrarla configuración local microscópica.

Configuración local microscópica

La configuración local microscópica, aquella que le brinda a los materiales sus características específicas, está representada por el mundo de lo minúsculo, imperceptible para el ojo humano, pero que gracias a la selección cultural se vuelve visible con el uso de herramientas técnicas especializadas. A esta configuración se le pueden hacer dos tipos de análisis que corresponden a su vez a dos propiedades de las formas interiores.

Propiedades interiores

Primero encontramos que a cualquier porción o segmento de forma se le puede hacer un análisis físico; sintetizar su estructura para constatar cómo esa geometría está influyendo en la materia. El segundo tipo de análisis es químico, en el cual es importante la distribución y en este caso hace referencia a la composición, cómo se están organizando los átomos, los átomos en moléculas y las moléculas en elementos. Tenemos entonces dos propiedades típicas del interior de la forma, como se ve en la figura 7: La estructura y la composición.

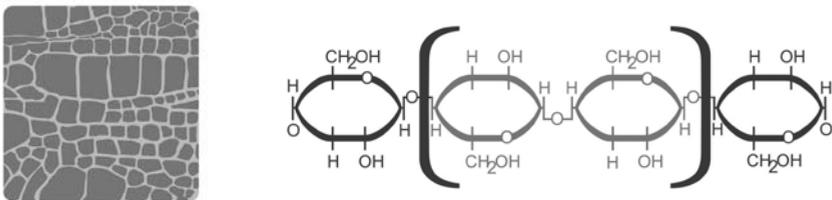


Fig. 7. Propiedades interiores: Estructura celular de la madera y diagrama de la composición química de la celulosa (sustancia que junto con la lignina componen la madera).

Configuración global macroscópica

El investigador Andrés Valencia define la configuración global macroscópica como aquella que permite la observación y el análisis de la forma en un todo, ya sea una forma monolítica o una forma compuesta por un sistema de varios subsistemas. Esta disposición espacial es la que hace que la forma sea relevante para el entorno, que pueda ser leída por el individuo observador. No es solamente mirar la forma global como la suma de diferentes partes, sino algo más que la suma, pues esta configuración hace que la función para la que fue hecha alcance su máxima representación. De nada sirve una pata, si nos faltan las tres restantes y el asiento.

Propiedades exteriores

Las propiedades típicas de la configuración global son cuatro: La función, la inteligibilidad, la frecuencia y la diversidad. Aunque la función no se debe desligar de los aspectos morfológicos, es con la funcionalidad de la forma global que se puede encontrar la razón de su existencia, la explicación de sus uniones y de su contorno, la lógica de los puntos de transición formales, y de sus terminaciones.

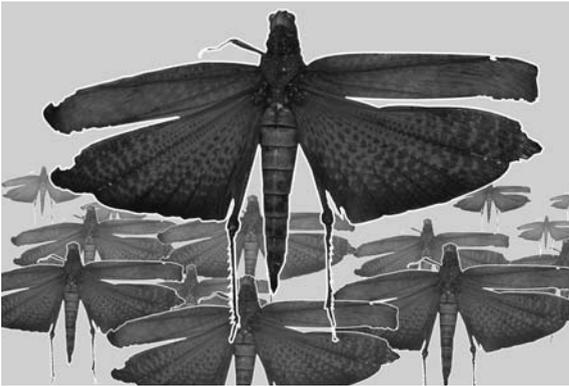


Fig. 8. Langosta. Wagensberg menciona cómo en la medida en que una forma sea más pequeña, puede aumentar la frecuencia de su presencia en la realidad.

La inteligibilidad tiene que ver más con aspectos comunicativos, en donde debe existir un emisor, un archivo emitido y un receptor, para el cual podrá ser legible o no el mensaje. El emisor es la forma, que a partir de su conformación permite ser comprendida. Esta propiedad es relevante para el entorno, ya que para la forma en sí misma no representa nada.

La frecuencia es la regularidad de las formas con iguales características en el entorno. No se trata del análisis de la forma por ser forma sino cómo se presenta en el espacio y adquiere importancia por su apoderamiento o colonización. Contrario a la frecuencia, la diversidad nos habla de la disminución en las apariciones de las formas, lo que puede hacer menor su inteligibilidad y reconocimiento pero que en la relación emisor-receptor logra apoderarse muchas veces de la colonia y dominarla, precisamente por su característica de diferenciación.

Configuración local macroscópica

En este tipo de configuración, el profesor Valencia se refiere a las partes que componen un sistema; dichas partes como en la construcción humana, pueden estar unidas en un proceso posterior a la conformación o pueden ser, como en la construcción de la naturaleza viva, generadas desde un punto compartido que la mayoría de las veces coincide con el órgano reproductor; no están unidas por un proceso posterior, pero son evidentes los cambios morfológicos que presentan de parte en parte; dicho de otro modo: los puntos de transición son fácilmente reconocibles.



Fig. 9. Objetos con cambio de utilización de materia en el espacio: macizo, hueco y poroso.

Aunque el análisis de estas configuraciones permite partir de un examen global, sólo desde la especificación de las partes y por ende, de sus características, podrá alcanzarse un grado mayor de coherencia y profundidad. Así mismo, el análisis de la configuración local se puede emplear para el análisis global, aunque sólo en el caso en que se haya efectuado previamente el análisis local. Para dicho análisis hay que tener en cuenta, además de las propiedades que vamos a enunciar a continuación, el modo como se está organizando internamente la materia, no desde la configuración microscópica sino a partir de la identificación de cuánta materia está utilizando en el espacio tridimensional que se ocupa. Esto supone dos opciones básicas: una configuración hueca o una configuración maciza; aunque las propiedades formales se pueden tratar de la misma manera en ambas, es de especial cuidado en el análisis estructural, el cual hace las veces del soporte de la función que va a tener la forma. Es muy diferente el trabajo estructural de una media esfera maciza de madera a un cuenco torneado de la misma madera; la distribución de los esfuerzos empieza a ser una característica digna de consideración. Ahora, si la configuración tiene más de una cavidad, ya no sería hueca sino porosa.

Propiedades de la frontera

Las propiedades de la configuración local microscópica, aunque también se pueden utilizar en el análisis de la configuración global, son aquellas que Wagensberg define como típicas de la frontera y que están ubicadas en la transición que separa el entorno de la configuración interna; estas son: tamaño, proporción, superficie, textura y simetría.

El tamaño es una propiedad que se puede considerar más bien una restricción. El tamaño considerado como la longitud ocupada en el espacio tridimensional impone reglas inviolables para cualquier tipo de forma, ya sea viva, inerte o cultural, en diferentes grados; pero al fin y al cabo son obligaciones que deben ser cumplidas.

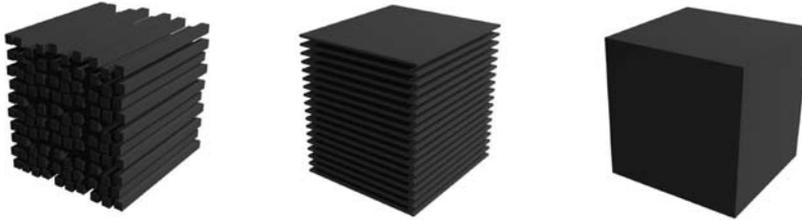


Fig. 10. Formas unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.

Si al hombre alguna vez se le pasara por la cabeza desafiar la ley de gravedad y construir una torre con las mismas proporciones de una espiga de trigo, el resultado sería nefasto: la más leve brisa tiraría la torre al suelo, en un instante. Por otro lado, en la naturaleza viva, una mosca no podría nunca alcanzar la proporción de un elefante; la selección natural imposibilitaría tal cambio pues con el peso de su cuerpo las patas se fracturarían y la mosca no sería un insecto sino un bulto de carne, sin poder volar ni caminar. Dicho de otro modo, hay morfologías que son imposibles en individuos grandes y otras no menos prohibidas para los pequeños.

Si una forma particular en la naturaleza representa una desventaja física o es sencillamente menos eficaz, la selección natural se encarga de eliminarla.⁴ Aunque la relación funciona también de manera inversa, la morfología puede llegar a imponer condiciones al tamaño, por ejemplo: La mayoría de las aves vuelan pero hay otras como el avestruz que han perdido esa facultad porque han aumentado su peso hasta llegar a ser imposible su vuelo.

La proporción tiene una vinculación directa con el tamaño pero se refiere específicamente al tipo de relación entre longitudes que predominan. El largo, el ancho y la profundidad tienen mayor relevancia si definen la dimensión y la forma. Desde estas características, las formas, aunque hablamos siempre de cuerpos que habitan el espacio, se pueden clasificar en unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales. En la figura 10 se pueden ver representadas gráficamente.

4. MCMAHON, Thomas. TYLER, John. Tamaño y vida. Editorial Labor. Barcelona, 1986. Pág. 18.

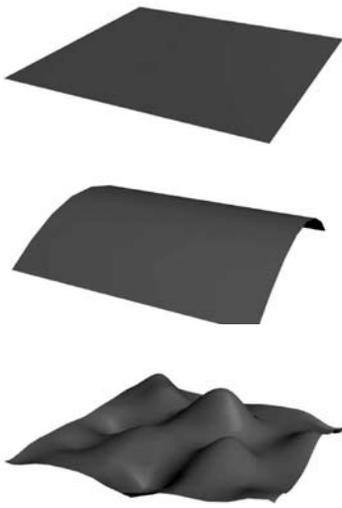


Fig. 11. Superficies recta, curva e irregular.

La superficie se puede definir como la cáscara que divide el interior de la forma de su exterior. Esta frontera puede ser de tres tipos básicos: superficies rectas, formadas por la repetición de múltiples líneas rectas que conservan el ángulo y la dimensión; superficies curvas, que están formadas por la repetición de líneas curvas o líneas rectas que van rotando en su propio eje o en un eje exterior, a medida que se trasladan; y superficies irregulares, las cuales poseen la unión de superficies rectas y curvas pero que presentan una disposición por fuera de un patrón regular, lo que las ubica en una categoría diferente (ver figura 11).

La textura es la estructura visual o táctil que posee cualquier superficie. En la estructura táctil, la textura muchas veces cumple una función particular dentro de la forma. Por ejemplo, la lengua de los gatos es considerablemente áspera, esto se debe a que posee una textura de protuberancias que tienen la forma de ganchos orientados hacia atrás que ayudan a retener la comida y generan la abrasión necesaria para su limpieza.

La última propiedad de la frontera es la simetría; también hablaremos de ella con más profundidad en el siguiente capítulo, pero a grandes rasgos es la propiedad que permite que una parte de la configuración se repita, y en la repetición no tenga grandes cambios dimensionales, conservando los principales puntos o superficies que permiten su inteligibilidad.

Variables básicas

Para que estas propiedades puedan ser estudiadas es necesario también definir una serie de elementos presentes en todo tipo de configuración; es la información que en su conjunto guía la formalización de la materia. Estas variables son: los ángulos, las longitudes, el perímetro, el eje longitudinal y la sección transversal; la conjunción de todas ellas, además de ser una guía de construcción, provee al proyectista de herramientas que le permitirán establecer las propiedades de la forma.

Sólo modificando los ángulos y las longitudes podemos tener una infinita gama de variaciones formales. Matemáticamente, el ángulo es una porción de plano limitada por dos líneas rectas que comparten el punto de origen. Aunque existen ángulos complejos, para el análisis formal y estructural es mejor estudiarlos como ángulos simples, es decir, ángulos solamente presentes en una de las dimensiones. Y la longitud es la distancia entre dos puntos representada en unidades de medida.

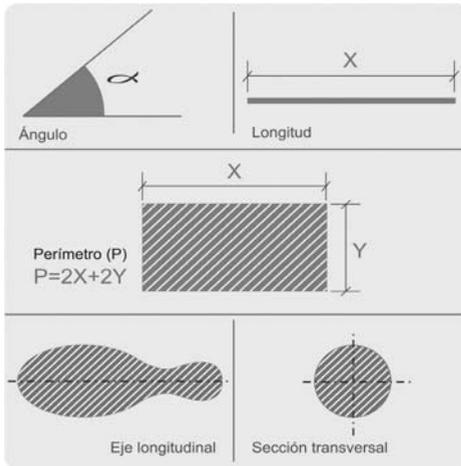


Fig. 12. Variables básicas de construcción: Ángulo, longitud, perímetro, eje longitudinal y sección transversal.

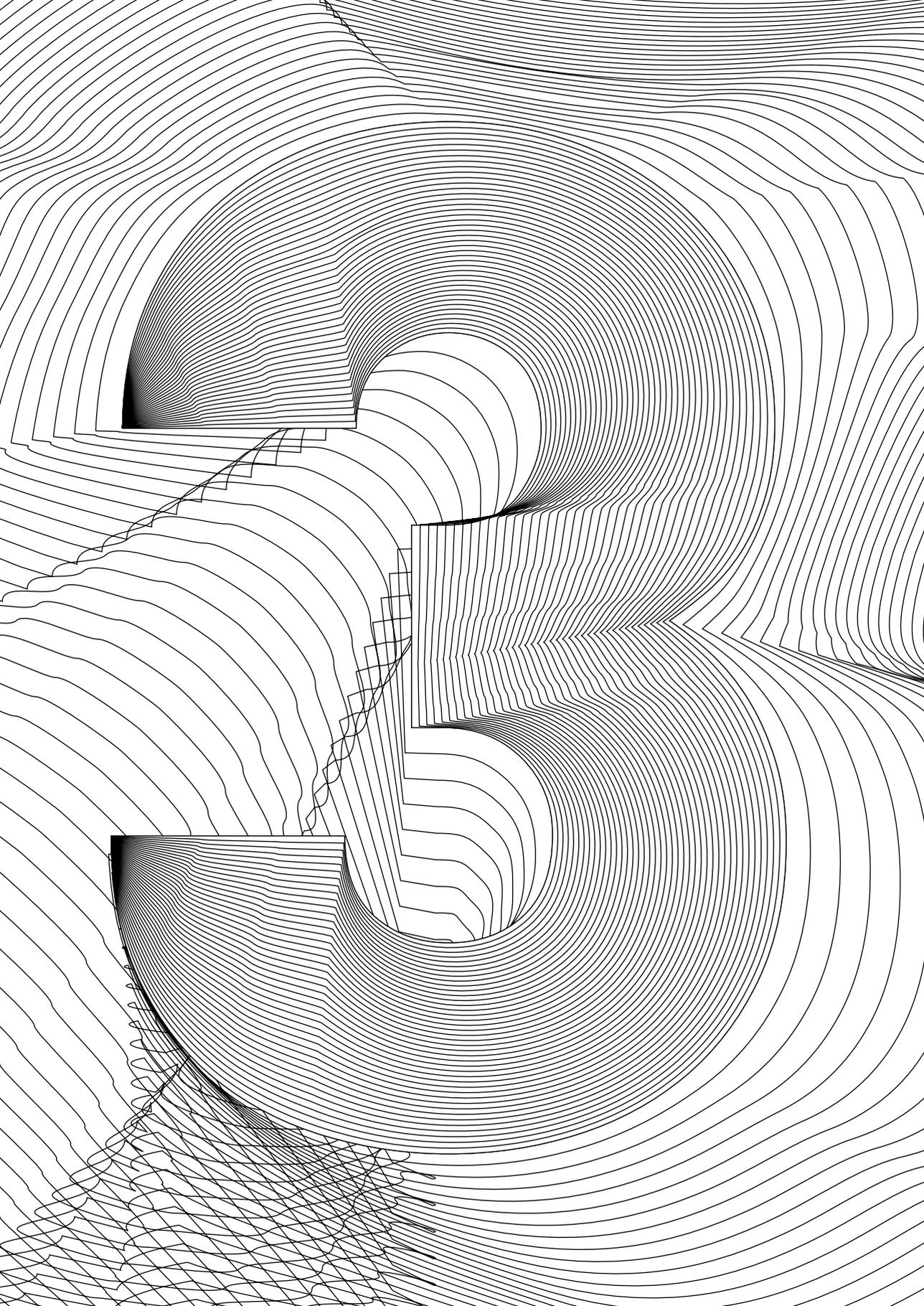
Para hacer una figura plana cualquiera es necesario tener estas dos primeras variables (ángulo y longitud), en donde se define una tercera, que es el perímetro, el cual se puede describir como la longitud total del contorno de dicha figura, o en general de cualquier porción de espacio bidimensional que esté encerrado.

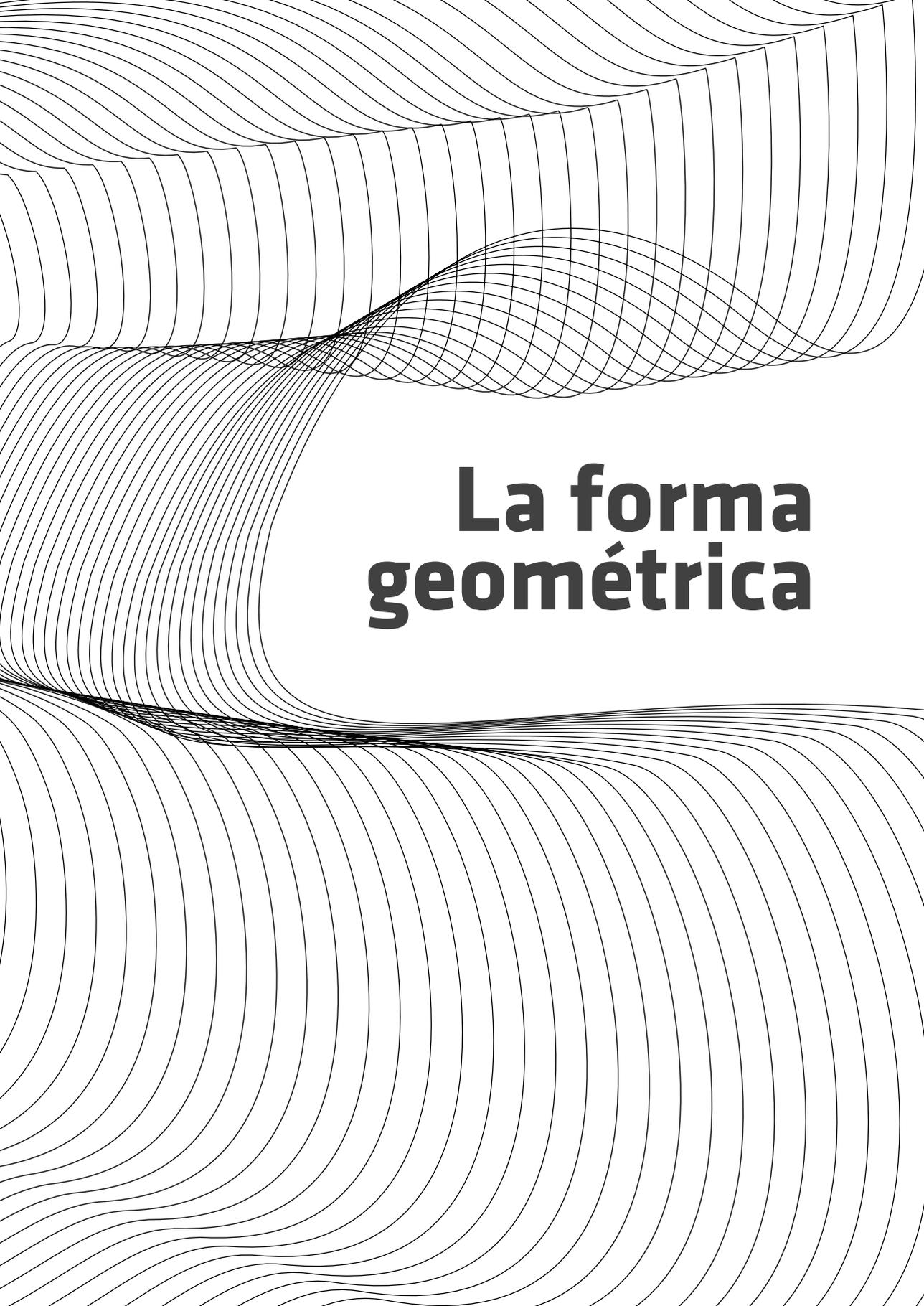
Las otras dos variables restantes, también presentes en una dimensión, se extraen o son importantes porque establecen características en el espacio tridimensional. La sección transversal es la superficie resultante de un corte ortogonal que se le aplica en la menor dimensión de una forma cualquiera, y el eje longitudinal es la línea directriz de la mayor dimensión que pasa por el centro geométrico de la sección transversal. Con estos dos últimos elementos, que están íntimamente correlacionados, más los tres vistos anteriormente, tenemos las variables básicas con las cuales se puede construir la forma y se pueden ver en la figura 12.

Clasificaciones de la forma

Resulta indispensable en el ejercicio de todo proyectista, indagar sobre los comienzos de la forma e identificar las características generales de la materia y la morfología. De igual modo es esencial determinar aquellos patrones formales que posibilitan un desarrollo teórico de mayor profundidad en la elaboración de un marco de referencia de uso académico indispensable para la comprensión, no sólo de la forma, sino también de los procesos de formalización y materialización de las iniciativas de diseño que propenden por la búsqueda de nuevas configuraciones y apreciaciones morfológicas para la innovación.

En este texto se proponen tres clasificaciones esenciales, basadas en las propiedades y características presentes en la dimensión material, y olvidando las dimensiones sociales y culturales: la forma geométrica, la forma en la naturaleza y la forma en la construcción humana. El orden sugerido contribuirá no sólo a la definición de conceptos y principios básicos sino también al planteamiento de metodologías y modelos para el uso y el estudio de la forma desde nuevos parámetros y concepciones.



The background of the page is a complex, abstract geometric pattern. It consists of numerous thin, black lines that curve and flow across the page, creating a sense of movement and depth. The lines are arranged in a way that they appear to be part of a larger, continuous structure, possibly a grid or a series of overlapping planes. The overall effect is one of dynamic, organic geometry.

La forma geométrica

<<La geometría le permite a su devoto, como un puente, franquear la oscuridad de la naturaleza material, como si fuese un mar oscuro, hacia las regiones luminosas de la realidad perfecta>>.

Thomas Taylor

Como menciona Christopher Alexander en su libro Ensayo sobre la síntesis de la forma, el objetivo del diseño es la forma, por simple que parezca (aunque es una definición un poco corta, ya que ahora se puede hablar de diseño de experiencias, estrategias, cualidades, etc). La forma no es más que fuerzas en equilibrio actuando en la materia, materia que está en un espacio y que por ningún motivo representa el vacío. La nada para el objeto del diseño es paradójicamente nada, no existe, lo que sí existe es una estructura espacial con propiedades físicas que influyen y permiten que la forma exista.

La estructura espacial que se asemeja más a un sistema donde todo puede estar dispuesto y ordenado aunque la forma del diseño exista corporalmente, está determinada por el mundo inmaterial de formas puras y geométricas. Al ser la geometría <<el estudio del orden espacial mediante la medición de las relaciones entre las formas>>⁵, su práctica nos ayudará a develar esa estructura inherente de las superficies, los cuerpos y el espacio.

En el presente capítulo abordaremos aquellos planteamientos que dieron base a la concepción de Platón, orientados por el origen del cosmos, obra de un artesano divino o demiurgo que, según el filósofo, al tomar como modelo las ideas dio forma al orden que percibimos por medio de los sentidos. Se tratarán elementos puntuales de la investigación platónica que explican la descomposición de las estructuras generales compartidas por todos los cuerpos de la materia y las estructuras mínimas que no pueden ser reducidas a otras.

Así, esbozaremos la idea platónica de concebir los poliedros como corpúsculos tridimensionales mínimos a través de los cuales se explican las diferencias entre fuego, tierra, agua y aire, y estudiaremos además, los diferentes tipos de poliedros irregulares, poliedros cóncavos, las mallas, las agrupaciones, las superficies y los cuerpos curvos.

Luego de ser descritos todos estos elementos y cuerpos geométricos, se abordará en el próximo capítulo la búsqueda morfológica a partir de la geometría, con el propósito de retomar precisamente los principios básicos geométricos y su vinculación en el proceso de formalización. Los temas por tratar, en definitiva, tanto en este capítulo como en el siguiente, posibilitarán una mayor comprensión no sólo de la geometría sino también de la forma como fenómeno de orden, armonía y equilibrio.

5. LAWLOR, Robert. GEOMETRÍA SAGRADA. Editorial Debate S.A. Madrid, España. 1996. Pág. 6

Poliedros platónicos

En cuanto a su etimología, la palabra Poliedro (Del gr. πολύεδρος) está compuesta por los vocablos Poli (Del gr. πολυ-) que significa 'muchos' e indica pluralidad o abundancia, y -edro, -edra, elemento sufijal que entra en la formación de palabras con el significado de 'cara' y 'plano'. Poliedro se puede definir como un volumen que está limitado por polígonos que se interceptan en aristas o vértices.

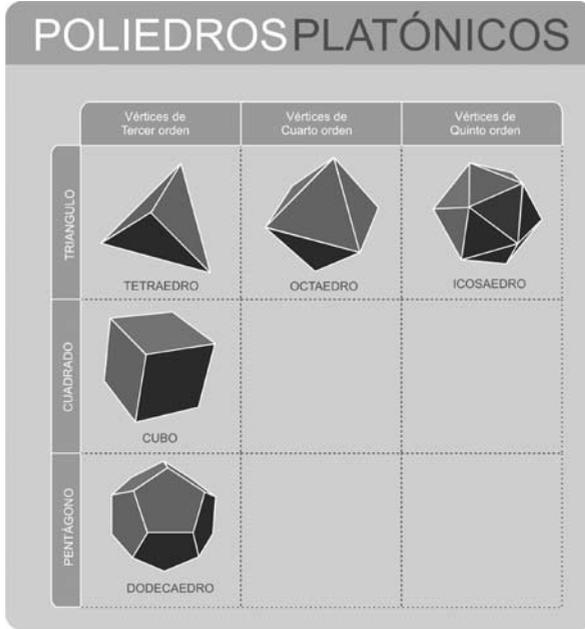
Los poliedros se pueden clasificar en cóncavos y convexos, regulares e irregulares. Los poliedros convexos son aquellos que están ubicados en el mismo espacio determinado por los planos que conforman sus caras. Si el poliedro no cumple con la definición anterior es cóncavo. Hay poliedros convexos regulares e irregulares, los regulares son aquellos que tienen en todas sus caras polígonos regulares iguales (lados y ángulos iguales), y por consiguiente, ángulos iguales.

Todo poliedro, ya sea regular o irregular, convexo o cóncavo, posee tres componentes principales que constituyen el sólido geométrico: caras, aristas y vértices. Las caras son las superficies que lo limitan, las aristas es el segmento que es frontera entre dos caras, y el vértice es el punto donde convergen tres o más aristas.

Mientras que en el espacio bidimensional existen infinitos polígonos regulares convexos, en el espacio tridimensional hay un número finito de poliedros regulares convexos. Mucho se ha hablado al respecto y se ha llegado a la conclusión de que son sólo cinco los sólidos que cumplen las características de regularidad y convexidad; reciben el nombre de platónicos, ya que se presume que fue Platón el que los describió por primera vez en *Tímeo*, el diálogo en el cual presenta una cosmología a partir de la geometría. Los sólidos platónicos son el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro, y representan tridimensionalmente al triángulo, el cuadrado y el pentágono; reciben sus nombres de dos raíces griegas, la primera hace referencia al número de caras, por ejemplo '*tetra*' que significa cuatro, y la segunda, '*hedrón*' que es cara.

Como se ve en la figura 13, si se unen 3 triángulos compartiendo un vértice, o sea vértices de tercer orden, se conforma un tetraedro; si se unen con vértices de cuarto orden se construye un octaedro y si se unen con vértices de quinto orden se obtiene un icosaedro. Al unir cuadrados con vértices de tercer orden se genera un cubo. Y al unir pentágonos con vértices de tercer orden se conforma un dodecaedro. Si se intenta completar el cuadro de la figura 13, o ampliarlo, se comprueba que no es posible porque la suma de los ángulos comienza a ser mayor de 360° . Lo mismo pasa con la construcción de volúmenes regulares que utilicen sólo hexágonos, heptágonos, octágonos o cualquier otro polígono regular o irregular; es imposible debido a que la suma de sus ángulos empieza a ser de más de 360° , imposibilitando la tridimensionalidad.

Platón hace referencia a cinco elementos como formadores del Universo: aire, tierra, agua, fuego y éter, y los relaciona con los cinco sólidos citados. La clasificación asocia el cubo con la Tierra, el tetraedro con el fuego, el octaedro con el aire, el icosaedro con el agua, y se menciona una quinta composición utilizada por el creador en la construcción del Universo, el éter, el cual fue asociado con el dodecaedro.



Según Platón: «El hacedor del Universo creó el orden a partir del caos primordial de estos elementos por medio de las formas y números esenciales. El ordenamiento según número y forma en un plano superior culminó en la disposición deseada de los cinco elementos en el Universo físico. Las formas y números esenciales actúan entonces como interconexión entre el reino superior y el inferior. Tienen en sí mismos, y a través de su analogía con los elementos, el poder de dar forma al mundo material»⁶.

Fig. 13. Variables básicas de construcción: Ángulo, longitud, perímetro, eje longitudinal y sección transversal.

Tetraedro

Es el mínimo módulo energético tridimensional; en el espacio bidimensional su análogo sería el triángulo porque al unir dos líneas rectas sólo se tiene un ángulo y al unir tres líneas se tendría un triángulo, la mínima conformación bidimensional. El tetraedro está compuesto por cuatro triángulos unidos por sus lados, los cuales se conforman en 6 aristas. Tiene 4 vértices, los cuales son de tercer orden porque en cada vértice confluyen 3 aristas y 3 caras. Si se intentara encerrar el espacio con solamente dos caras triangulares, se comprobaría que al salir al espacio tridimensional esas dos caras empiezan a generar una tercera. Por el contrario, al tener vértices de cuarto orden se construiría un octaedro, de quinto orden resultaría un icosaedro, y de sexto orden sería un polígono hexagonal, obstruyéndose, como se verá más adelante, la inserción en la tridimensionalidad. (Ver figs.13 y 14)

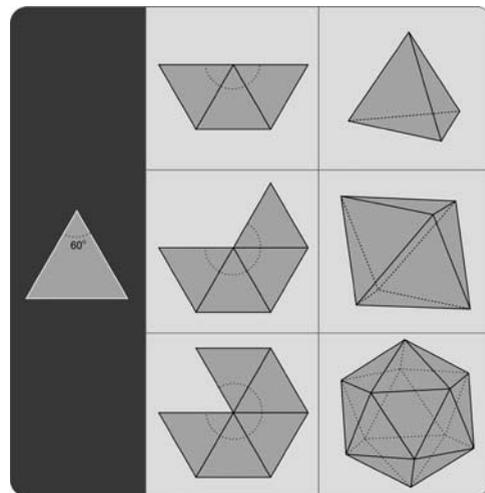


Fig. 14. Construcción del tetraedro, el octaedro y el icosaedro.

6. LAWLOR, Op. Cit. Pág. 96

Características geométricas:

- Las aristas concurrentes forman 60° entre sí.
- Las aristas no concurrentes se cruzan de forma ortogonal en el espacio.
- El centro geométrico está situado a un $\frac{1}{4}$ de la altura del poliedro con respecto a su base

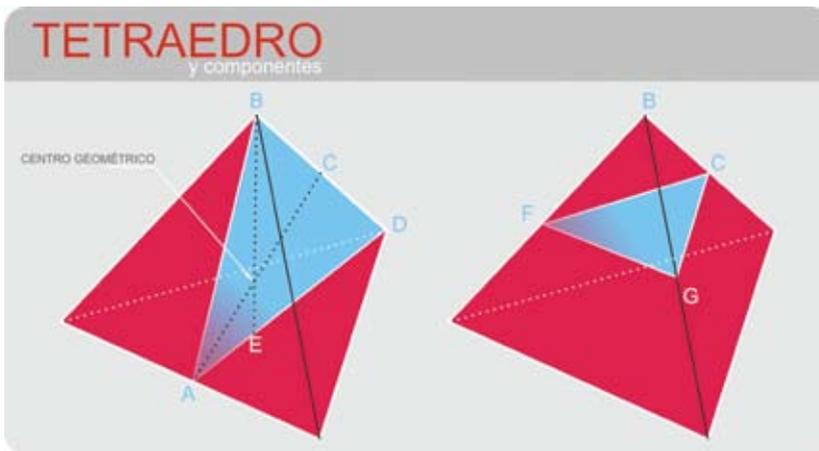


Fig. 15. Tetraedro y componentes

Los componentes del tetraedro son los elementos determinantes que condicionan la morfología de éste, ellos son:

1. Centro geométrico: ubicado en la intersección de los ejes de arista. En el caso de la figura 18 el único eje graficado es la recta AC.

2. Ejes de cara: Son aquellos que se encuentran en las caras y van de vértice al medio de la arista. Cada cara tiene 3 ejes, representando cada uno la altura del triángulo equilátero. La recta AD es una de ellas.

3. Ejes de vértice: Son los ejes que van desde el centro de las caras, trazado por los ejes anteriores, hasta el vértice opuesto en el interior del tetraedro. A su vez representa la altura del sólido. La recta BE es uno de estos vértices, y se encuentra perpendicular a la cara que la contiene.

4. Ejes de arista: son los que van desde la mitad de una arista hasta la mitad de la arista opuesta en el interior del tetraedro. Marca la mínima distancia entre aristas no concurrentes. En la figura está ilustrada como la recta AC.

5. Planos transversales: es la sección principal del tetraedro producida por un plano que conteniendo una arista pasa por el punto medio de la arista no concurrente con la contenida. Es un triángulo isósceles que tiene por lados iguales la altura de las caras del tetraedro, por lado desigual la arista del tetraedro. En la figura es el triángulo entre los puntos ABD. Son seis planos transversales.

6. Secciones secundarias: son las secciones paralelas a las caras del tetraedro; forman triángulos equiláteros en menor proporción y van desde los puntos medios de 3 aristas adyacentes. Son cuatro, en la figura se observa en el triángulo CFG; tiene proporciones iguales a las del triángulo BFG. Al unir las cuatro secciones se conforma un octaedro.

Cubo

La figura análoga del cubo en la geometría plana es el cuadrado. No se puede construir ningún otro poliedro regular que tenga estas características. Si se unen dos cuadrados por sus caras se obtiene una figura plana, pero al añadir un tercero, como se ve en la figura 16, el cuadrado sale al espacio para convertirse en un hexaedro. Posee 6 caras, 12 aristas y 8 vértices. Si se tienen vértices no de tercero sino de cuarto orden, se obtiene nuevamente una figura plana compuesta por 360° . El cubo ha representado desde los orígenes de los tiempos lo terreno, la construcción humana, el espíritu manifiesto y comprensible; puede verse su aplicación en la más importante mezquita de peregrinación musulmana ubicada en La Meca (Arabia Saudita): se llama la <<Kaaba>> y es un gran cubo, en donde, según su creencias, habita la divinidad. Lo interesante es que la re-

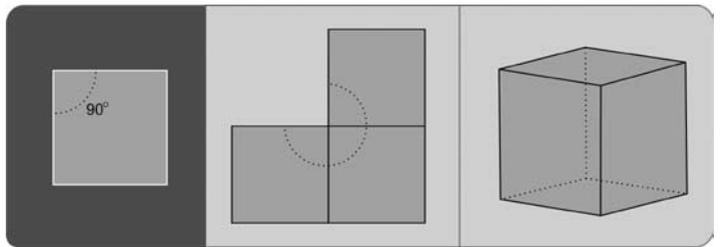


Fig. 16. Construcción del cubo

presentación de la divinidad es el círculo, y círculos son los que tienen que dar los peregrinos para acercarse a la <<Kaaba>>, la cual encierra lo divino, el espíritu puro no-manifiesto, impidiendo su salida (ver figura 17). Todo este ritual tiene gran relación con el concepto de cuadratura del círculo, práctica cuyo objetivo es construir sólo con un compás y una regla, un cuadrado que sea igual en su perímetro a la circunferencia de un círculo cualquiera; como el círculo está basado en un número inconmensurable (π), es imposible construir un cuadrado que lo iguale, sólo es una aproximación. Para el geómetra-cosmólogo el concepto expresa cómo lo infinito se expresa a través de la dimensiones de lo finito.

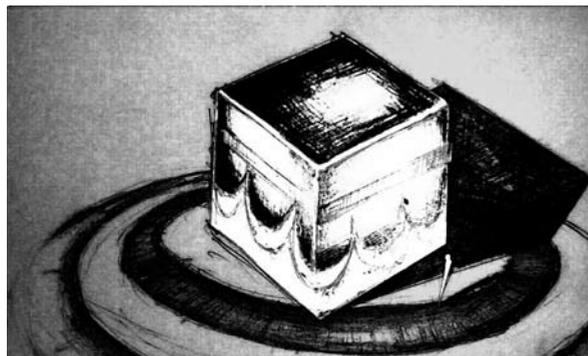


Fig. 17. La <<Kaaba>>

Características geométricas:

- Las aristas concurrentes forman 90° entre sí.
- Las aristas de lados opuestos son paralelas o se cruzan de forma ortogonal.
- El centro geométrico está situado a un $1/2$ de la altura del poliedro con respecto a su base.

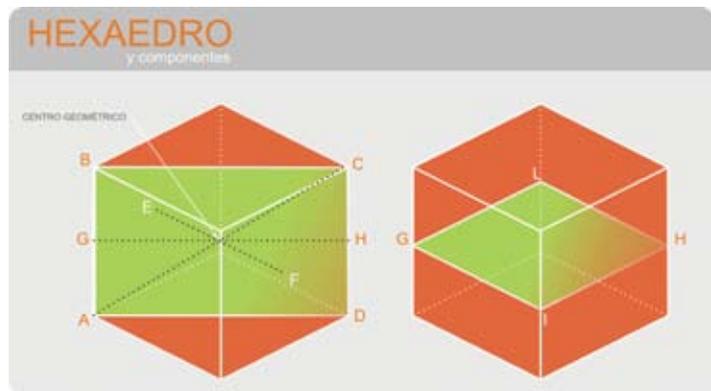


Fig. 18. Hexaedro y componentes

Componentes del hexaedro:

1. Centro geométrico: está ubicado en la intersección de los ejes de arista, de los ejes de cara internos o los ejes de vértice.
2. Ejes de cara externos: son las líneas rectas que van desde un vértice a su opuesto en cada una de las caras, se cruzan en el punto centro de estas. En la figura 18 un eje de cara externo es el representado por el segmento AD. Son doce en total.
3. Ejes de cara internos: Son aquellos que se encuentran en las caras y van desde el punto centro de estas hasta su opuesto. En la figura se puede observar uno de los tres en el segmento EF.
4. Ejes de vértice: Son los ejes que van desde los vértices hasta los vértices opuestos, en el interior del cubo. Son cuatro, en la figura, la recta AC es uno de ellos.
5. Ejes de arista: son los que van desde la mitad de una arista hasta la mitad de la arista opuesta en el interior del cubo. En la figura está dibujada como la recta GH.
6. Planos transversales: es la sección principal del cubo producida por un plano que contiene a dos aristas paralelas que no configuran ninguna cara en el cubo. Es un rectángulo cuyo lado mayor es un eje de cara externo, y el lado menor es una arista, siendo la diagonal del plano el eje de vértice del hexaedro. Son seis planos en total, en la figura 18 está indicado uno en el rectángulo ABCD.
7. Planos ortogonales: son los planos paralelos a las caras del cubo, perpendiculares entre sí; forman cuadrados de las mismas dimensiones que sus caras, sus lados nacen en la mitad de las aristas. Son tres, dos verticales y uno horizontal representados en la figura por el rectángulo GHIL.

Octaedro

Como se vio en la figura 14, al unir tres triángulos equiláteros alrededor de un mismo vértice se obtiene un tetraedro, pero al unir cuatro triángulos sale al espacio, en primera instancia, una pirámide de base cuadrada; al continuar uniendo

4 triángulos por vértice (vértices de cuarto orden) y seguir con las características de regularidad de los poliedros platónicos nos encontramos con el octaedro. Posee 8 caras, 6 vértices y 12 aristas. Es interesante observar que su número de aristas corresponde con las del hexaedro, y el número de caras de uno corresponde con el número de vértices del otro, y viceversa, completándose una relación dual entre ambos.

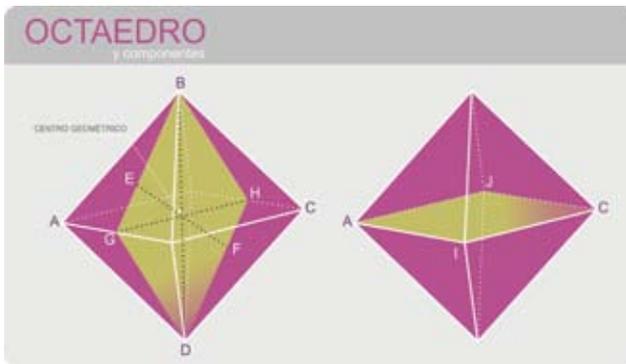


Fig. 19. Octaedro y sus componentes

Características geométricas:

- Las caras opuestas con relación a su centro geométrico son paralelas.
- Las aristas opuestas con relación a su centro geométrico son paralelas.
- Las aristas concurrentes que forman cara, configuran un ángulo de 60° .
- Las aristas que no forman cara pero son concurrentes, configuran un ángulo de 90° .

Componentes del octaedro:

1. Centro geométrico: está ubicado en la intersección de los ejes de arista, de los ejes de cara internos o los ejes de vértice.

2. Ejes de cara externos: son las líneas rectas que van desde un vértice hasta el medio de la arista opuesta en cada una de las caras, se cruzan en el punto centro de estas. En la figura 19 un eje de cara externo sería el representado por el segmento BG. Son 24 en total.

3. Ejes de cara internos: Son aquellos que se encuentran en las caras y van desde el punto centro de estas hasta su opuesto en el interior del octaedro. En la figura se puede observar uno de los tres en el segmento EF.

4. Ejes de vértice: Son los ejes que van desde los vértices hasta los vértices opuestos, al interior del octaedro. Son tres, en la figura, la recta BD es uno de ellos.

5. Ejes de arista: son los que van desde la mitad de una arista hasta la mitad de la arista opuesta en el interior del octaedro. En la figura está dibujada como la recta GH.

6. Planos transversales: son las principales secciones del octaedro que llevan dentro de sí un eje de cara externo y contienen a los puntos medios de dos aristas opuestas por el centro geométrico. Es un rombo cuya diagonal mayor es el eje de vértice del octaedro y su diagonal menor es el eje de arista. El lado del rombo es la altura del triángulo, o sea el eje de cara interno del octaedro. En la figura es el plano comprendido por los puntos BGDH.

7. Planos ortogonales: son las secciones cuadradas perpendiculares entre sí, que se forman por las aristas concurrentes que no forman caras. El lado del cuadrado es la arista del octaedro. El plano comprendido por los puntos ACIJ es uno de ellos.

Dodecaedro

Cinco líneas rectas separadas por ángulos iguales forman un pentágono y sus diagonales constituyen la estrella pentagonal o pentagrama, la cual ha tenido una serie de connotaciones filosófico-religiosas desde hace mucho tiempo. Para los cristianos es símbolo relacionado con el hijo de Dios, también fue el símbolo geométrico y la contraseña que utilizaban los iniciados de la Sociedad pitagórica, no por cosas del destino sino porque conocían de antemano la inconmensurabilidad que poseía

gracias al número de oro, presente en la construcción natural y artificial ('phi' $\Phi = 1.6180339\dots$), irracional, que posibilita la proporción llamada áurea, divina o dorada; constante derivada de una relación geométrica, de cocientes o comparaciones entre dos tamaños, cantidades, calidades, expresada por la fórmula $a:b$, donde 'a' puede ser 1 y 'b', 1.618.



Fig. 21. Pentagrama y proporción áurea.

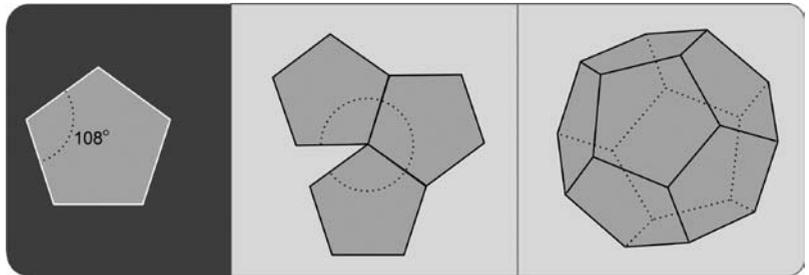


Fig. 20. Construcción del dodecaedro pentagonal

En la figura 21 se ven las relaciones doradas dentro del pentagrama; la sección de recta AB está en proporción áurea con la recta BC, que resulta de la división de otra diagonal del pentágono. En otras palabras, si se divide la longitud del segmento AB por 1.618, el resultado es la medida del segmento BC. Podríamos decir que el nacimiento del pentágono está muy cerca de lo divino, ya que las diagonales presentan proporción áurea, y estas a su vez son los elementos determinantes de su construcción.

Esto lleva al comienzo del dodecaedro: dos pentágonos unidos por sus aristas están en el plano bidimensional, tres pentágonos como se ve en la figura 20, unidos por un vértice común salen al espacio. Si seguimos pegando pentágonos de esa manera, a razón de tres polígonos por vértice, se cierra al momento de completar doce pentágonos. Si en cualquier otra figura geométrica cerrada se utilizaran pentágonos tendría que recurrirse a doce de estos, ni más ni menos. El dodecaedro es entonces la principal representación tridimensional del pentágono, y no es por demás decir que la divinidad produjo nuevamente otro hijo con la relación dorada.

No hay otro poliedro regular convexo construido a partir de pentágonos, tiene 30 aristas, 20 vértices, y como se vio anteriormente, 12 pentágonos regulares.

Características geométricas:

Dentro de todas las relaciones formales establecidas entre las partes que constituyen el dodecaedro, sólo se mencionarán las imprescindibles para la comprensión de su estructura.

- Las caras opuestas con relación a su centro geométrico son paralelas y en sus vértices están giradas 36° una con respecto a la otra.
- Las aristas opuestas en relación con su centro geométrico son paralelas.



Fig. 22. Dodecaedro y sus componentes.

Componentes del dodecaedro:

1. Centro geométrico: ubicado en la intersección de los ejes de arista, de los ejes de cara internos o los ejes de vértice.
2. Ejes de cara externos: son las líneas rectas que van desde un vértice hasta el medio de la arista opuesta formando un ángulo recto en cada una de las caras, y se cruzan en el punto centro de estas. Son las medianas de los pentágonos. En la figura 22, un eje de cara externo es el representado por el segmento AC. Son 60 en total.
3. Ejes de cara de pentagrama: son los ejes que van de vértice a vértice opuesto en cada una de sus caras, no se interceptan en un punto sino que forman un pentágono de menor tamaño en el interior de la estrella pentagonal. La recta KL es uno de ellos, son 60 en total.
4. Ejes de cara internos: Son aquellos que se encuentran en las caras y van desde el punto centro de estas hasta su opuesto en el interior del dodecaedro. En la figura 22 se puede observar uno de los 6 en el segmento BF.
5. Ejes de vértice: Son los ejes que van desde los vértices hasta los vértices opuestos, en el interior del dodecaedro. Son 10, en la figura, la recta CG es uno de ellos.
6. Ejes de arista: son los que van desde la mitad de una arista hasta la mitad de la arista opuesta en el interior del dodecaedro. En la figura está ilustrada como la recta IJ. Son 15 en total.
7. Planos transversales: son las principales secciones del dodecaedro que conteniendo a dos aristas opuestas, constituyen 4 ejes de cara externos que a su vez forman un hexágono irregular. El dodecaedro posee 15 planos transversales. En la figura 22 se observa uno de ellos en el hexágono ACDEGH.
8. Planos áureos: son rectángulos áureos en el interior del dodecaedro, que contienen a dos aristas opuestas, donde el lado menor está en proporción áurea con el mayor. Los ejes de vértice del dodecaedro son las diagonales del rectángulo.

Icosaedro

En la figura 14 se ve como al unir triángulos equiláteros alrededor de vértices de quinto orden se obtiene un icosaedro; si estuvieran unidos por vértices de sexto orden, serían hexágonos, llenando los 360° del plano. Es otra de las representaciones tridimensionales del pentágono, ya que algunas de sus sec-

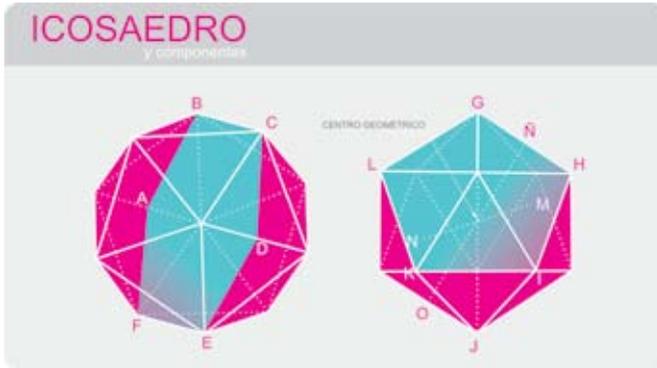


Fig. 23. Icosaedro y sus componentes.

ciones son polígonos regulares de 5 lados, por tal motivo deben su crecimiento al número de oro. <<Como el dodecaedro y el icosaedro regulares son las ampliaciones en el espacio, del pentágono regular, no habrá por qué extrañarse de encontrar la sección áurea como razón esencial que gobierna tanto las proporciones lineales, planas o sólidas de interior de estos dos cuerpos como las proporciones que enlazan entre sí el dodecaedro y el icosaedro inscrito en la misma esfera o en el mismo cubo>>⁷.

Todo tipo de cuerpo o proyección que represente estos sólidos, requiere la partición inicial de un segmento según la sección áurea. <<Tal era, en especial, el caso para la inscripción del dodecaedro en la esfera y por haber divulgado este secreto reservado Hipasos de Metaponto fue excomulgado por la cofradía pitagórica>>⁸.

El icosaedro es un poliedro regular convexo, que posee 20 caras triangulares, 30 aristas y 12 vértices. Tiene una relación dual con el dodecaedro; es de especial interés observar que el icosaedro tiene 20 caras, así como el dodecaedro tiene 20 vértices; el primero tiene 12 vértices y el segundo 12 caras, por tal motivo tienen 30 aristas y ambos posibilitan la generación del otro.

Características geométricas:

Se citan sólo aquellas que son relevantes para su construcción.

- Las secciones que se encuentran en cualquier vértice del icosaedro, perpendiculares a la recta que une el vértice con el centro geométrico, son pentágonos regulares.
- Las caras opuestas al centro geométrico son paralelas y están giradas 60° una respecto a la otra.
- Las aristas opuestas con relación a su centro geométrico son paralelas.

7. GHYKA, Matila C. Número de Oro "I Los Ritos". Editorial Poseidón, Barcelona. 1968. Pág. 46.

8. Ibid., Pág. 47.

Componentes del Icosaedro:

1. Centro geométrico: está ubicado en la intersección de los ejes de arista, de los ejes de cara internos o los ejes de vértice.
2. Ejes de cara externos: son las líneas rectas que van desde un vértice hasta el medio de la arista opuesta en cada una de las caras; se cruzan en el punto centro de estas. En la figura 23, un eje de cara externo es el representado por el segmento CD. Son 60 en total.
3. Ejes de cara internos: Son aquellos que se encuentran en las caras y van desde el punto centro de estas hasta su opuesto en el interior del icosaedro. En la figura 23 se puede observar uno de los 10 en el segmento MN.
4. Ejes de vértice: Son los ejes que van desde los vértices hasta los vértices opuestos, en el interior del icosaedro. Son 6, en la figura, la recta GJ es uno de ellos.
5. Ejes de arista: son los que van desde la mitad de una arista hasta la mitad de la arista opuesta en el interior del icosaedro. En la figura está dibujada como la recta ÑO. Son 15 en total.
6. Planos transversales: son las secciones principales del icosaedro, las cuales contienen a dos aristas opuestas y 4 ejes de cara externos que forman un hexágono irregular. El icosaedro posee 15 planos transversales. En la figura 23 se observa uno de ellos en el hexágono ABCDEF.
7. Planos transversales secundarios: son los planos perpendiculares a los ejes de vértice del icosaedro; contienen 5 aristas que no forman triángulo. Son pentágonos regulares de lado igual a la arista del icosaedro. El pentágono GHIKL de la figura 23 es uno de ellos.

Teorema de Euler

Gran parte del trabajo del matemático Leonhard Euler (1707-1783) se basó en facilitar y completar procedimientos de análisis en diversas ramas de la matemática conocidas por entonces. Entre otras cosas, introduce una fórmula que relaciona los elementos básicos de la geometría: vértices, ángulos y caras, para determinar las características de las formas.

El número de vértices más el número de caras es igual al número de aristas más 2. Esta fórmula ($V+C=A+2$) determina la regularidad de los sólidos. Dicha relación se cumple con innegable precisión en los poliedros convexos regulares vistos anteriormente. (Ver figura 24)

	$V + C = A + 2$	TOTAL
TETRAEDRO	$4 + 4 = 6 + 2$	8
OCTAEDRO	$6 + 8 = 12 + 2$	14
CUBO	$8 + 6 = 12 + 2$	14
DODECAEDRO	$20 + 12 = 30 + 2$	32
ICOSAEDRO	$12 + 20 = 30 + 2$	32

Fig. 24. Teorema de Euler

Transformaciones geométricas

En la producción geométrica es de igual importancia conocer cuáles son los procesos que intervienen en la generación y la mutación de la forma, teniendo en cuenta que se habla, en este caso, de formas poliédricas hasta ahora regulares. El objetivo de estas transformaciones no es más que el de generar otro nuevo sólido o estructura que parte de un módulo inicial. En otras palabras, al ser los poliedros platónicos un referente de regularidad y orden, y de mínimas conformaciones, de allí parte en gran medida, otra serie de cuerpos y estructuras pseudo regulares con propiedades formales y estructurales importantes para la materialización.

Truncación

La truncación es una herramienta de transformación geométrica que consiste en cortar los vértices de un poliedro; como resultado aparecen nuevas caras, las cuales son polígonos generados por la conexión de las aristas cortadas. Dependiendo desde dónde se parta para el corte, se genera el nuevo sólido. La truncación máxima de un poliedro es generada cuando los cortes de diferentes vértices se tocan. (Ver figura 25)

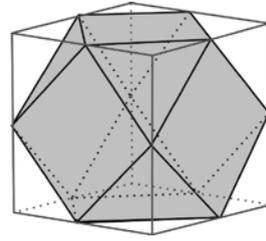


Fig.25. Truncación máxima del cubo

Estelación

La estelación es un proceso contrario y consiste en proyectar las caras del poliedro en la generación de un nuevo vértice. Las caras del poliedro son reemplazadas por pirámides cuyos lados son iguales al número de aristas de la cara. Las diferentes formas estelares dependen de hasta donde se proyectan las caras. (Ver figura 26)

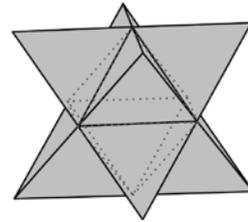


Fig. 26. Estelación del octaedro

Dualidad

La dualidad es la capacidad que tiene un poliedro de generar otro a partir de la conexión de líneas perpendiculares a la mitad de sus caras. Desde esta premisa todo poliedro tiene un dual. El tetraedro es dual de sí mismo, el octaedro es dual del cubo y viceversa; el icosaedro es dual del dodecaedro y viceversa (ver figura 27). Cuando se realiza la truncación máxima de dos poliedros duales el resultado siempre es el mismo sólido. En el caso del octaedro y el cubo, el resultado es el cuboctaedro, y en el caso del dodecaedro y el icosaedro, el resultado es el icosidodecaedro (Ver figura 28).



Fig.27. Dualidad de los sólidos platónicos.

Sólidos arquimédicos

Los sólidos platónicos resultan de la unión del mismo tipo de polígonos regulares. Si se unen polígonos regulares de varios tipos para encerrar el espacio, al tiempo que se mantienen las características de los vértices, se pueden fabricar otros sólidos, en este caso semirregulares. Las posibilidades siguen siendo limitadas si se excluyen los prismas y antiprismas porque sólo se pueden construir 13 nuevos sólidos, los llamados poliedros Arquimédicos, llamados así por haber sido Arquímedes el que los describió.

Once de los trece sólidos nacen de la truncación de los sólidos platónicos, los dos restantes nacen de una transformación y rotación de las caras del cubo y el dodecaedro. Estos sólidos son el cubo simus o snub y el dodecaedro simus o snub; también se pueden generar reemplazando las aristas del cubo y del dodecaedro por dos triángulos equiláteros. De una primera truncación de los poliedros platónicos surgen los primeros cinco: el tetraedro truncado, el cubo truncado, el octaedro truncado, el dodecaedro truncado y el icosaedro truncado. Si se continúa truncando, hasta llegar a la máxima truncación, se obtienen dos nuevos sólidos, el cuboctaedro y el icosidodecaedro. Al trincar estos, nuevamente se obtienen el cuboctaedro truncado y el icosidodecaedro truncado, y al llevarlos hasta la truncación máxima resultan el rombicuboctaedro y el rombicosisidodecaedro. El rombicuboctaedro, como se aprecia en la figura 28 también se puede generar por la truncación de las aristas del octaedro o del cubo; lo mismo sucede con el rombicosisidodecaedro y la truncación de las aristas del dodecaedro o del icosaedro.

<<He aquí algunas limitaciones que se aprecian en estas figuras. Cada forma tiene vértices de tercer, cuarto o quinto orden y algunas caras con tres, cuatro o cinco aristas. Si existen triángulos o hexágonos, se hallan siempre en múltiplos de cuatro: su número es de cuatro, ocho, veinte, treinta y dos u ochenta. Los cuadrados y octágonos se dan en múltiplos de seis: seis, doce, dieciocho o treinta. Si hay pentágonos o decágonos presentes, su número será de doce. Ninguna forma posee caras con siete, nueve, once o un número superior de aristas>>⁹.

9. STEVENS, Peter S. PATRONES Y PAUTAS EN LA NATURALEZA. Salvat Editores, S.A. Barcelona. 1987. Pág. 12.

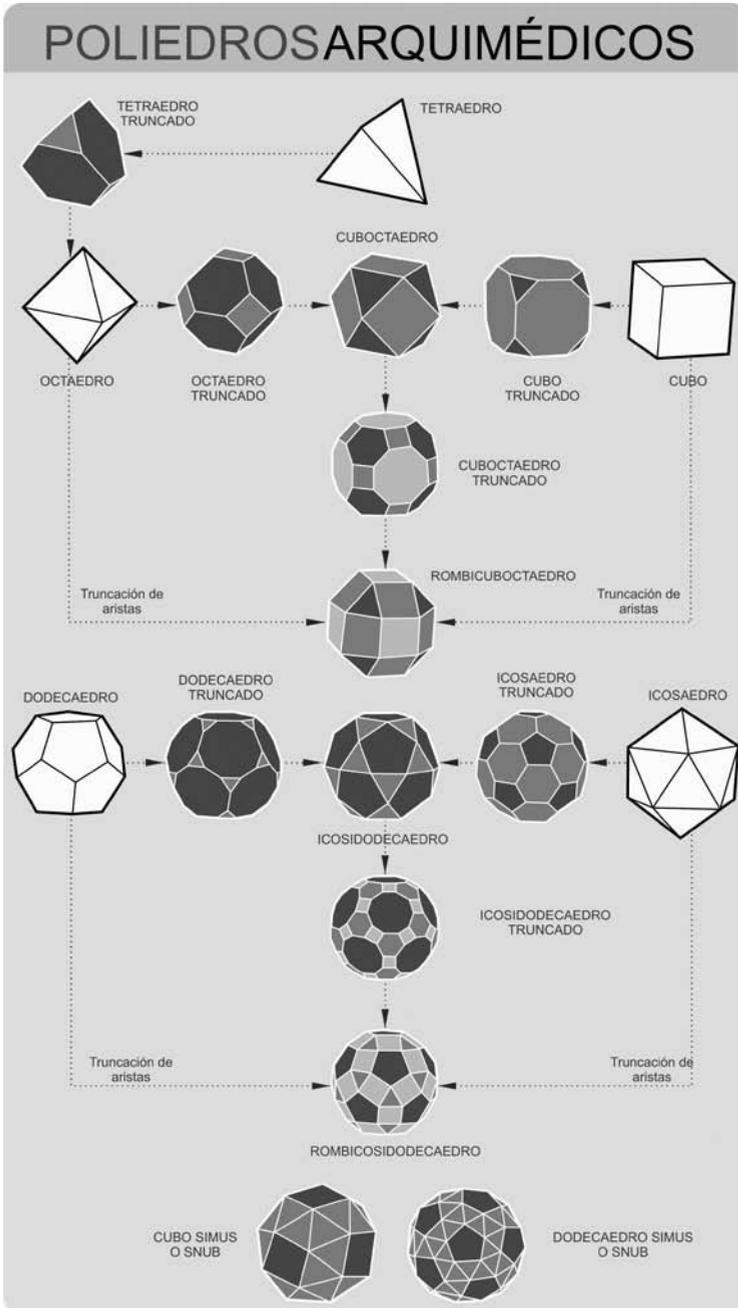


Fig.28. Generación de los sólidos arquimédicos

Sólidos catalanes

Son 13 sólidos semirregulares convexos que se generan sacando los duales de los sólidos arquimédicos o estelando los sólidos platónicos; cada cara es un polígono irregular idéntico y confluye en dos o más tipos de vértices. Los sólidos catalanes reciben este nombre en honor al matemático belga Eugène Catalan que los publicó por primera vez en 1862.

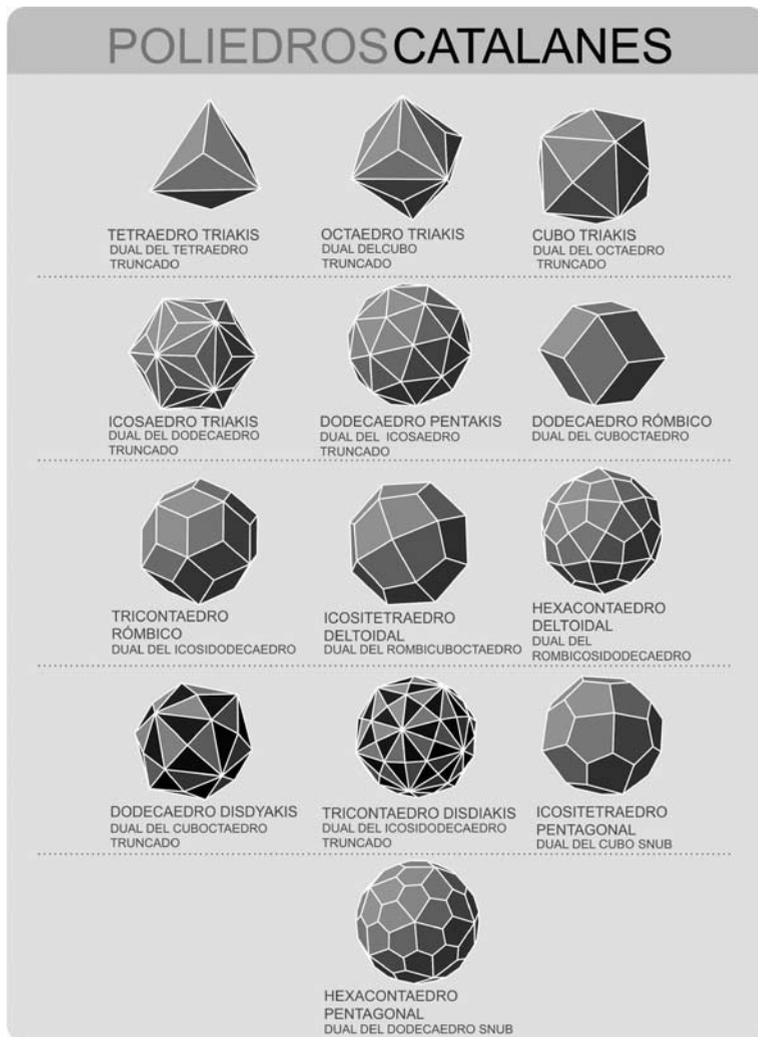


Fig.29. Sólidos catalanes. (Este texto contiene imágenes realizadas en Poly Pro de Pedagoguery Software Inc.)

Poliedros Kepler-Poinsot

Son estrellas poliédricas regulares no convexas, descritas por Johannes Kepler (1619) y desarrolladas por Louis Poinsot (1809), quien culminó la investigación de Kepler.

Kepler se percató de que se podía construir un sólido regular mediante la unión de 12 pentagramas por sus aristas. Si cinco de esos pentagramas (ver las caras blancas en la figura 30) confluyen en un vértice, resulta un pequeño dodecaedro estrellado. Si son tres los que confluyen, se tiene el gran dodecaedro estrellado. El pequeño dodecaedro estrellado también se puede obtener por la prolongación de las caras del dodecaedro; si se prolongan las caras del icosaedro se obtiene el gran dodecaedro estrellado.

Posteriormente, en 1809, Poinsot describió las otras estrellas poliédricas regulares, duales de los dos anteriores: el gran dodecaedro (dual del pequeño dodecaedro estrellado) conformado por 12 caras pentagonales que se interceptan unas con otras, y el gran icosaedro (dual del gran dodecaedro estrellado), construido a partir de la intercepción de 20 triángulos equiláteros.

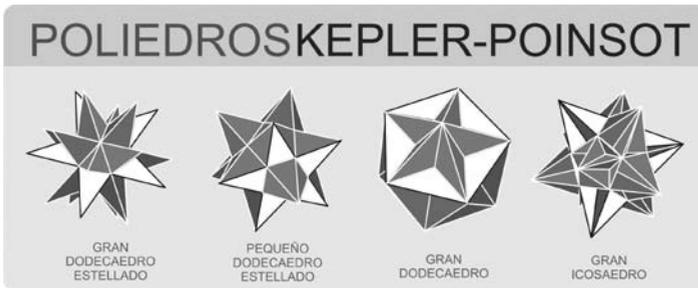


Fig. 30. Estrellas poliédricas.

Otros poliedros

Otros poliedros que no entran en las clasificaciones anteriores son los prismas, los cuales son poliedros semirregulares convexos conformados por dos polígonos iguales paralelos (bases) al centro geométrico, que están unidos por paralelogramos. Los antiprismas tienen la misma característica de estar contruidos a partir de dos polígonos iguales, pero a diferencia de los anteriores, sus caras se encuentran giradas una con respecto a la otra, lo que resulta en una unión por triángulos. El cubo se puede considerar como un prisma cuadrado.

Si las bases de los prismas o antiprismas son no-convexas, el sólido adquiere la propiedad de no-convexidad. Tanto los prismas y antiprismas convexos, como los no convexos, son infinitos. Reciben su nombre dependiendo del polígono que tienen como base, además de su característica geométrica. Por ejemplo, si es un prisma que tiene base triangular como el de la figura 31a, se llamaría prisma triangular.

Hasta ahora se ha dado una mirada sistemática a los grupos de poliedros regulares e irregulares que hacen parte del orden espacial. Faltaría definir otros grupos de poliedros que no han tenido muchas aplicaciones y estudios a lo largo de los años, pero que sin lugar a dudas poseen características geométricas que los hacen relevantes. Estos son los sólidos de Johnson, los deltaedros, las dipirámides y los deltoedros.



Fig.31. Prismas y Antiprismas.

Queda sólo una categoría de poliedros convexos con caras regulares, constituida por los sólidos de Johnson; publicados por Norman H. Johnson (1966) en una lista que incluyó 92 sólidos semirregulares convexos no uniformes construidos a partir de diferentes polígonos regulares. Un sólido perteneciente a esta categoría es, por ejemplo, una pirámide de base cuadrada o el poliedro de la figura 32.



Fig. 32. Sólido de Johnson: gyroelongated pentagonal bicupola.

Los deltaedros son sólidos construidos a partir de triángulos equiláteros, no tienen vértices de sexto orden, cuando es convexo tiene entre 8 y 20 caras. Los deltaedros convexos son sólo 8, y los no convexos son infinitos. (Ver figura 33)

Las dipirámides son duales de los prismas y los deltoedros de los antiprismas; sus características se abordarán con más detalle posteriormente.



Fig. 33. Deltaedros

Simetrías, redes y agrupaciones

Luego de ahondar sobre la manera de transformar un sólido, es pertinente ahora centrarse en otro punto de igual importancia en el estudio de la geometría que construye forma: la herramienta de variación geométrica que permite modificar algún cuerpo en un sistema poliédrico. Las anteriores transformaciones servían sólo para mutar el sólido como ente independiente; ahora se estudiarán las agrupaciones geométricas, las mallas y redes que unen los poliedros en el espacio tridimensional. Esta herramienta de variación, es la simetría, propiedad relacionada con la admiración de la forma equilibrada, innata en el ser humano.

En la cotidianidad, la simetría sólo es una propiedad estética, en cambio en la geometría y las matemáticas representa mucho más que eso; es una modificación, pero no una modificación cualquiera. <<Una simetría de un objeto es una transformación que deja su aspecto aparentemente igual>>¹⁰. Y es aparente porque aunque después de dicha transformación la forma general del objeto se conserva, el objeto se ha movido.

Las simetrías que se van a abordar representan movimientos rígidos en el espacio. En ellos, las formas son los puntos del espacio tridimensional ordinario. La palabra rígidos significa que las distancias de estos puntos son las mismas al iniciar que al terminar la transformación. La palabra movimiento es el término para definir el proceso que posibilita el resultado final; aunque existe un cambio, las propiedades geométricas se mantienen invariables.

10. STEWART, Ian. GOLOBITSKY, Martín. ¿Es Dios un géometa? "Las simetrías en la naturaleza". Crítica. Barcelona. 1995. Pág. 42.

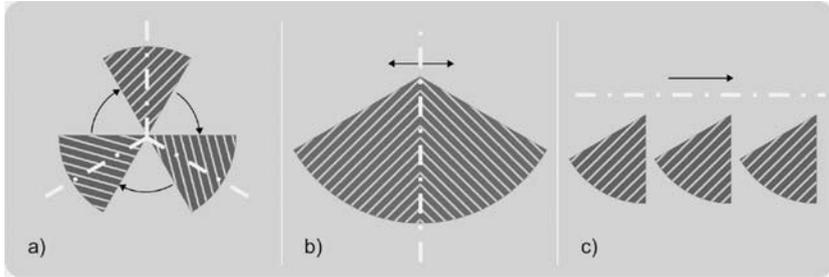


Fig. 34. Simetría de rotación, especular y de traslación.

Según Buckminster Fuller existen sólo dos tipos de simetrías: la rotacional, o repetición de elementos a partir de un eje radial de simetría (figura 34a), y la especular o axial, en la cual el patrón se refleja a partir del eje del espejo (figura 34b). Entrar a debatir sobre la existencia de sólo estas dos simetrías no es pertinente en el momento. Pero se hablará de una tercera, que igual que las dos anteriores transforma el sólido conservando la forma y el tamaño de éste; es la simetría de traslación, en la cual hay un movimiento de la forma original sobre unos ejes paralelos (ver figura 34c).

Si se toma el sólido como un ente independiente, son importantes sólo las dos primeras, la simetría rotacional y la especular. Una figura en el plano bidimensional, como el círculo, se puede considerar un polígono regular de número infinito de lados. Las simetrías que les corresponden son todas las rotaciones que puede hacer en torno a su centro, junto con todas las reflexiones respecto a los ejes que pasan por dicho centro. Con el análogo del círculo en las tres dimensiones, la esfera, ocurre exactamente lo mismo, está conformada por todas las rotaciones en torno a su centro y todas las reflexiones respecto a los planos que pasen por dicho centro.

Los sólidos platónicos tienen grupos de simetrías, igualmente interesantes. El cubo, por ejemplo, tiene ocho vértices en cada uno de los cuales se encuentran tres aristas. Se puede girar cualquier vértice hasta ponerlo en la posición que se desee; y luego, girar el cubo dejando dicho vértice fijo, para recorrer las posiciones de las tres aristas que confluyen en este vértice. Por tal motivo, el cubo tiene 24 (8×3) simetrías de rotación. Aun más; posee al menos una simetría de reflexión, que al combinar con las 24 anteriores, da como resultado 48 simetrías. Al realizar los mismos razonamientos con los otros poliedros platónicos, se concluye que el tetraedro tiene 24 simetrías; el octaedro, 48 simetrías; y el dodecaedro y el icosaedro, 120 simetrías. La razón por la cual el octaedro y el cubo tienen el mismo número de simetrías es porque presentan una relación dual, lo mismo que el dodecaedro y el icosaedro.

Se ha hablado de la existencia de una cuarta simetría, en donde se origina una dilatación de un elemento base; la forma se conserva mas no el tamaño, lo que evidencia un patrón de crecimiento limitado por una superficie finita independiente de la escala. En la naturaleza, este tipo de crecimiento no lineal, está determinado por una geometría fractal, en tal caso se estaría hablando ya no de un orden ocasionado por una simetría sino más bien de un orden ocasionado por un patrón, de lo cual se hablará con mayor profundidad en los capítulos 5 y 6 relacionados con las formas en la naturaleza.

Por el momento se hablará de la simetría rotacional, especular y de traslación, en función de unir los sólidos para encontrar nuevos sistemas o simplemente para llenar el espacio. Estos sistemas son importantes porque, como se vio al comienzo, la materia y los organismos vivos están contruidos a partir de piezas elementales básicas que especialmente combinadas y repetidas producen entes de una mayor complejidad.

<<En 1915, Lawrence Bragg desarrolló la técnica de la difracción por rayos X, consistente en hacer rebotar haces de rayos X en un cristal y observar cómo interfieren las ondas, y mediante esta técnica demostró que los átomos de un cristal perfecto se encuentran formando una red>>¹¹. Esta demostración no sólo se aplica a la cristalografía, la estructura de la red atómica, y en especial sus simetrías, afecta en mayor o menor medida las propiedades físicas del material, ya que dicha manera como están dispuestos los átomos hace que sus propiedades sean diferentes. La técnica de Lawrence Bragg comprobó que este cristal perfecto, es simplemente una gran molécula formada por la misma unidad básica repetida una y otra vez.

Redes

Antes de sumergirse en el mundo de la agrupación espacial, se dará una breve mirada a la agrupación que se da en el plano, en el mundo bidimensional. Análogo a la cantidad limitada de

poliedros regulares y semirregulares es el número limitado de redes bidimensionales regulares y semirregulares que pueden construirse en el espacio bidimensional.

En la figura 14, se encuentran una serie de triángulos unidos a razón de diferentes tipos de vértices; si confluyen 3 triángulos se genera el tetraedro; con cuatro triángulos, el octaedro; con 5 triángulos, el icosaedro, y si se unen 6 triángulos, se tienen los 360° completos. La agrupación se queda en el plano, y si se continúan pegando triángulos, manteniendo 6 alrededor de cada vértice, se puede extender en el infinito mundo bidimensional. Según Peter Stevens sólo se pueden construir otras dos redes con estas características de uniformidad, utilizando elementos regulares e idénticos que pueden crecer indefinidamente (Ver figura 35).

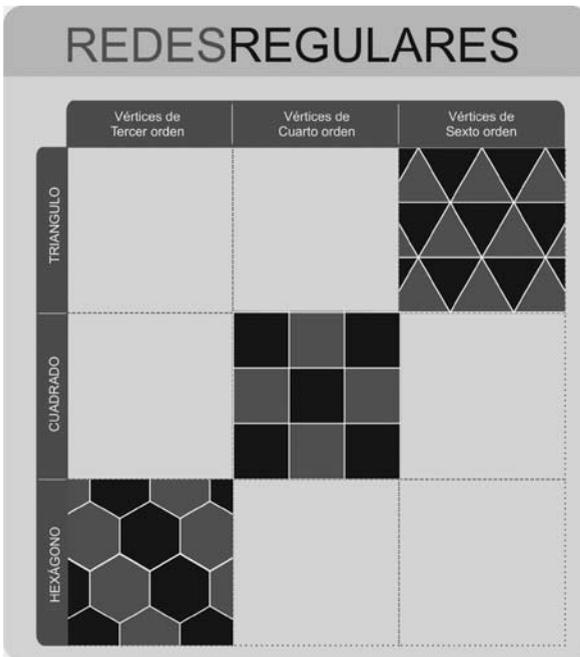


Fig. 35. Redes regulares.

11. STEWART, GOLOBITSKY. Op Cit. Pág. 114.

Con iguales limitantes, hay sólo ocho redes semirregulares conformadas a partir de polígonos regulares de más de un tipo manteniendo las características de sus uniones; los tipos de vértices se mantienen a lo largo de la construcción (ver figura 36). Todas estas redes utilizan triángulos o cuadrados, o ambos, y únicamente agrupados a partir de vértices de tercer, cuarto o quinto orden. Siguiendo el patrón de repetición se podrían encontrar otros tipos de redes, pero al miraras con detalle se puede comprobar que son solamente combinaciones de las mismas ocho redes semirregulares.

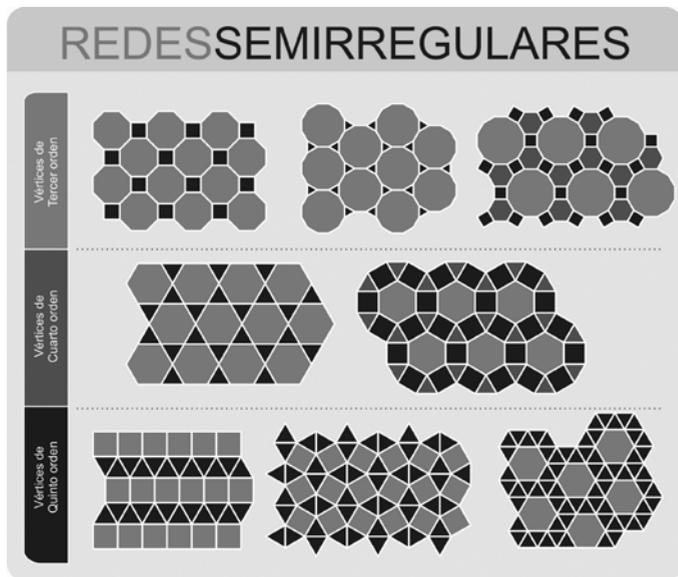


Fig.36. Redes semirregulares

La ausencia de pentágonos regulares en estos grupos de mosaicos regulares y semirregulares es evidente. Los pentágonos no se unen entre sí o con otros polígonos regulares para ocupar el espacio bidimensional, de la misma forma que los poliedros que tienen caras pentagonales no pueden agruparse con otros para llenar el espacio de manera continua. Las propiedades del pentágono le permiten con mayor propiedad encerrar el espacio, es por tanto que dos de los poliedros platónicos, el icosaedro y el dodecaedro, deben su constitución a éste.

A partir de la agrupación por diferentes tipos de vértices de polígonos regulares se pueden obtener otros tipos de redes no uniformes; la variabilidad de estas depende en gran medida de las características de sus uniones. Algunas de estas redes se pueden ver en los dibujos de Kepler de su obra *Harmonices Mundi*.

Agrupación espacial

Tienen agrupación espacial aquellas construcciones que deben su sistema estructural a la existencia de las tres dimensiones; se hablará de tres tipos, las que se agrupan en una dirección, las que se agrupan en dos direcciones y las que se unen para llenar el espacio en sus tres direcciones.

Agrupación lineal

Dentro de la agrupación espacial de sólidos, el primer elemento por tratar es la adición en una dirección de sólidos geométricos. A partir de una simetría especular se puede construir un sistema que tenga como elemento conformador cualquier poliedro regular o semirregular; el resultado es un nuevo poliedro o una estructura poliédrica que se comporta como columna, torre o mástil, ya que la duplicación de elementos base se hace a través de un eje fundamental.

Si se duplican dos pirámides por medio de un eje de simetría, se obtiene otro tipo de poliedro del que no se ha hablado: la dipirámide. Por definición, las pirámides son sólidos que tienen como base un polígono cualquiera y por caras triángulos con un vértice en común. Si las caras de la dipirámide no son triángulos sino deltoideos, se obtiene un deltoedro. Los deltoideos son romboides o cuadriláteros con dos pares de lados consecutivos iguales (ver figura 37).

Al duplicar una pirámide triangular o sea un tetraedro, se obtiene una dipirámide. Al continuar tal repetición se obtiene un tetrahelix; ésta es una torre de tetraedros que se construye helicoidalmente a medida que se van uniendo los tetraedros por sus caras, el sistema va creciendo linealmente y va rotando gracias a sus características morfológicas. En la figura 38 se observa el tetrahelix, y una torre construida a partir de la repetición de antiprismas de base cuadrada. En su mayoría, las estructuras con crecimiento lineal se construyen a partir de uniones por caras.

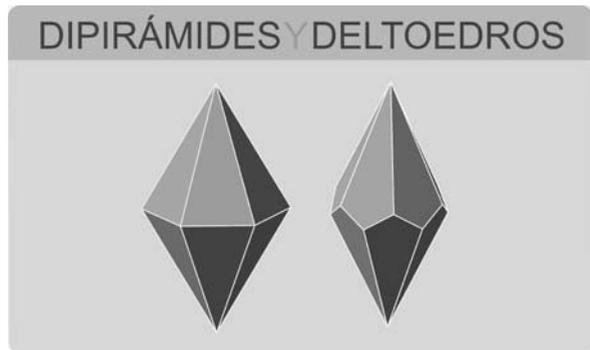


Fig. 37. Dipirámide y deltoedro hexagonal.¹²

¹². Imágenes realizadas en Poly Pro de Pedagoguery Software Inc.

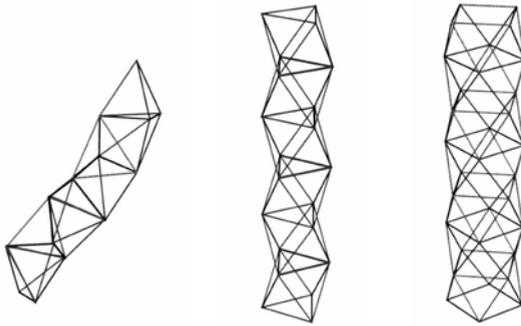


Fig. 38. Tetrahelix, torre de octaedros y torre de antiprismas de base cuadrada.

Este sistema de repetición lineal no supone simplemente una herramienta de composición; desde el punto de vista estructural, al agrupar poliedros compuestos por triángulos (configuración con más capacidad de soportar cargas), se estará diseñando un sistema que se comporta de manera similar; no es solamente una torre por el simple hecho de su direccionalidad sino por su propiedad de ser columna o viga. Pueden observarse para entender el concepto, las cerchas genéricas trianguladas.

Agrupación en malla

Son agrupaciones de poliedros que se construyen en dos dimensiones, en cierto modo agrupaciones bidimensionales. Dependiendo de la característica de las uniones, es la disposición y estructura de la malla. Los poliedros se pueden unir por aristas, por caras y por vértices. Tales estructuras se utilizan a menudo en arquitectura como sistemas de techumbre ideales para cubrir grandes superficies; primero porque constan de barras muy similares que se repiten, y segundo porque esa condición simétrica y geométrica las hace de gran atractivo estético (ver figura 39 a 42).

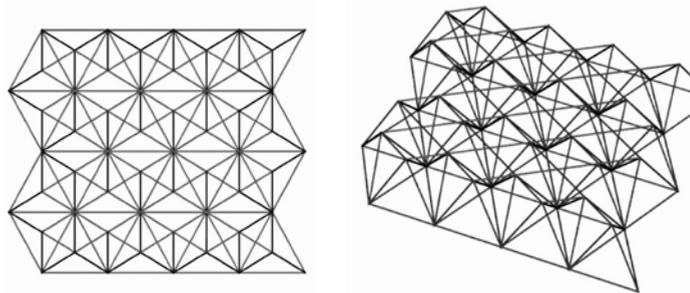


Fig. 39. Malla de tetraedros unidos por aristas, con conexiones de diagonales por vértices. Vista superior y perspectiva.

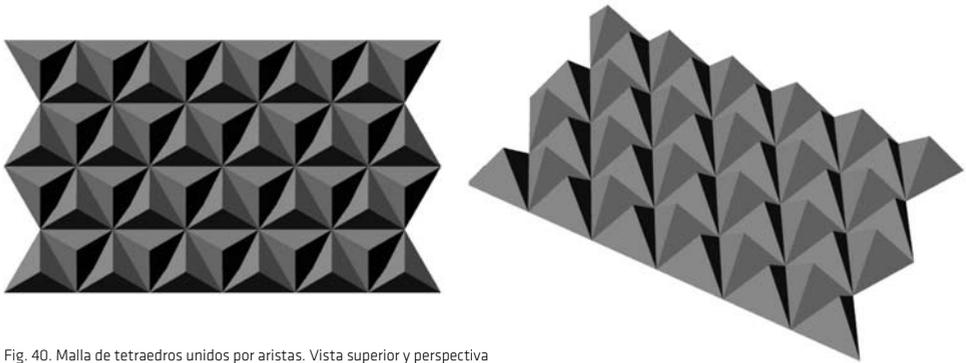


Fig. 40. Malla de tetraedros unidos por aristas. Vista superior y perspectiva

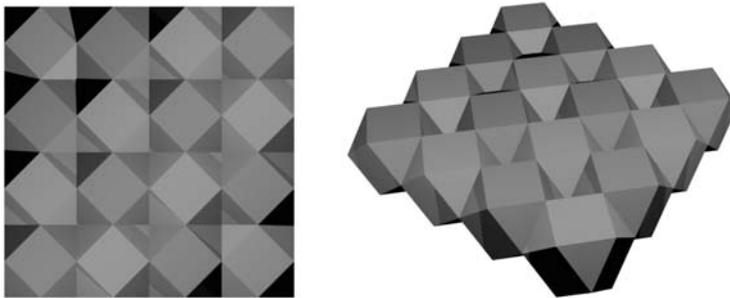


Fig. 41. Malla de cuboctaedros unidos por las caras. Vista superior y perspectiva.



Fig. 42. Malla de Octaedros truncados unidos por las caras. Vista superior.

Agrupación en tres direcciones

A diferencia de los dos tipos de crecimiento anterior, el crecimiento espacial en tres direcciones presenta un nivel mayor de complejidad porque la morfología de los poliedros propicia pocas características geométricas en común, lo que dificulta su agrupación. Las agrupaciones más elementales son las desarrolladas por prismas a partir de las redes regulares. Estas agrupaciones poseen ciertas simetrías obvias, como traslaciones a lo largo de las tres direcciones básicas mediante las distancias respectivas. Sin embargo, poseen unas transformaciones no tan obvias; la primera agrupación de la figura 43, construida a partir de cubos, tiene también las simetrías de un cubo: diversas rotaciones y reflexiones.

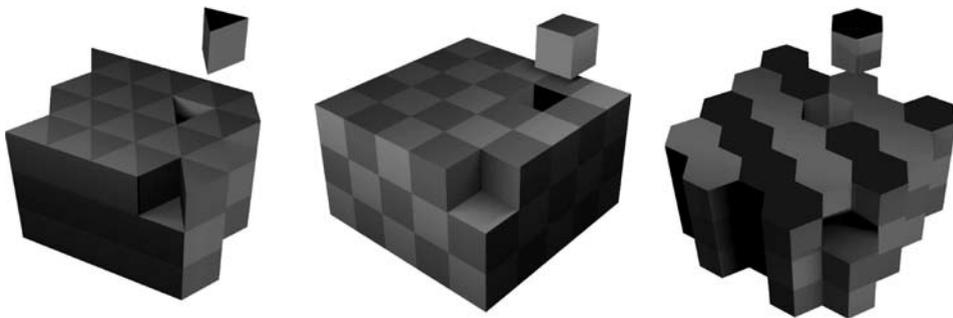


Fig. 43. Agrupación de prismas a partir de las redes regulares. Prismas triangulares, prismas cuadrados y prismas hexagonales.



Fig. 44. Agrupación de octaedros truncados.

Si se van a agrupar poliedros regulares y semirregulares para llenar el espacio sin dejar vacíos o discontinuidades, aparecen nuevas limitaciones. Incluyendo las agrupaciones generadas a partir de las redes regulares de la figura 43, que utilizan prismas regulares, encontramos que sólo 22 grupos cumplen dicha condición. Éstos utilizan poliedros que tienen algunas caras triangulares o cuadradas, nunca poliedros con pentágonos como caras. Uno de ellos es la malla tridimensional conformada por octaedros truncados de la figura 44, la cual describe la geometría molecular de los silicatos de aluminio y la conformación estadística ideal de la espuma de jabón.

Otra agrupación con un nivel mayor de eficiencia, es la conformada por dodecaedros rómbicos (ver figura 45). Si se toma en cuenta el hexágono como el polígono que presenta más área con menos periferia, en el caso del espacio tridimensional, el dodecaedro rómbico presenta la propiedad de optimización espacial. Una manera de explicar esta propiedad es imaginarse

un espacio cerrado finito donde habitan cada vez más esferas, estas se empezarán a deformar por falta de espacio suficiente para contenerlas; la mutación que presentan las convierte en dodecaedros rómbicos (sólido catalán).

Aprovechando la configuración de los diferentes poliedros, éstos se pueden unir en agrupaciones tridimensionales irregulares, compuestas por dos tipos de poliedros que a su vez como los anteriores, pueden llenar todo el espacio sin dejar vacíos. Un ejemplo de estas agrupaciones se ve en la figura 46, en la cual los octaedros por sí solos no pueden crecer en las tres dimensiones sin dejar espacios, por eso son necesarios tetraedros para llenar los vacíos; las redes de los octaedros se van intercalando verticalmente a razón de la mitad del lado de sus caras.

En la figura 47 se aprecia otra agrupación tridimensional irregular, esta vez conformada por la malla de cuboctaedros unidos por las caras de la figura 41, a la que se le agregaron octaedros para llenar los espacios vacíos.

En conclusión, las simetrías ofrecen una variabilidad muy alta a las construcciones geométricas; se pueden utilizar como herramienta para el análisis y el crecimiento de cuerpos abstractos geométricos, como los vistos anteriormente, o como herramienta útil para el estudio de cualquier tipo de morfología. En todos los casos, las simetrías tanto en la metafísica de los cuerpos geométricos ideales como en el mundo gobernado por la naturaleza y la cultura construida por el hombre, son herramientas morfológicas que se constituyen como una simple pero a la vez compleja manera de construir formas.

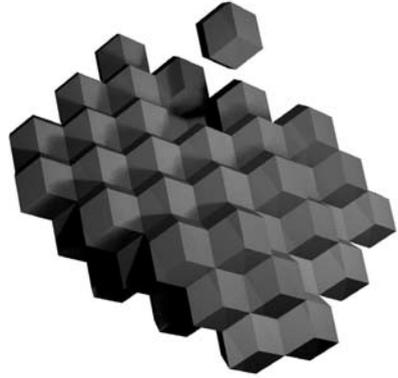


Fig. 45. Agrupación de dodecaedros rómbicos.

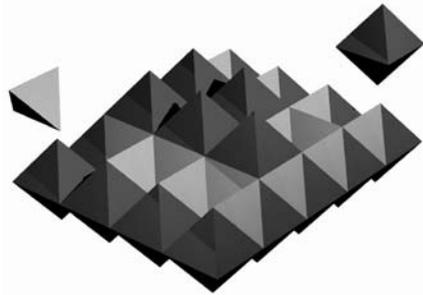


Fig. 46. Agrupación de octaedros y tetraedros.

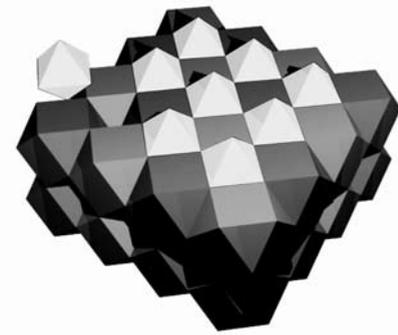


Fig. 47. Agrupación de cuboctaedros y octaedros.

Superficies y cuerpos curvos

<<Todas las formas perfectamente bellas deben componerse con curvas, puesto que apenas existe forma natural alguna en la que sea posible descubrir una línea recta>>.

John Ruskin, *The Seven Lamps of Architecture* (1880).

Las formas en la naturaleza, sus patrones, la manera como crecen y se reproducen, su curvatura y sinuosidad, han sido piezas clave en la inspiración de arquitectos, artistas y diseñadores. Basta ver cómo las formas de la naturaleza que estudió el biólogo y zoólogo Ernst Haeckel (ver figura 48), influenciaron e impactaron de inmediato el Art Nouveau. Para Gaudí, el maestro consumado de lo orgánico, la recta era del hombre y la curva, de Dios. <<El círculo, que representa el camino del sol, la luna y las estrellas, así como el ciclo de la vida y la muerte, se ha utilizado desde los tiempos prehistóricos para los monolitos y túmulos de los lugares sagrados. Las cúpulas, los arcos y las bóvedas se empleaban en la arquitectura religiosa a causa de su capacidad de evocar lo sublime. Incluso cuando se las usa en construcciones seculares, las curvas todavía retienen un poder emocional especial>>¹³.

Ya se dio un recorrido por la geometría que proporciona un orden a partir de los ángulos y aristas rectas, el resultado de esta geometría fueron sólidos y sistemas con predisposición a lo rectilíneo, un elemento recurrente en las formas culturales. Porque si se analiza bien, en la mayoría de los procesos de manufactura, sobre todo en los manuales, resulta mucho más fácil fabricar una pieza recta que una curva, y mucho más si la pieza es seriada. En la construcción natural, esas piezas están condicionadas a la cantidad de material disponible, a las fuerzas fundamentales, potenciales físicos, y en los cuerpos vivos, a la estructura genética. Christopher Williams expone el origen de la forma orgánica como la causa del hinchamiento de las células, del neuma (soplo de vida), en el que actúan los fluidos, para no sólo dar estructura sino vida. Al ser la presión la que hincha la forma, ésta se encuentra limitada por su modo de acción, en resultado encontramos una morfología esferoide, curva, sinuosa, orgánica.

Estudiar este tipo de superficies y cuerpos le ayudará al proyectista a comprender la manera cómo construir y utilizar este tipo de formas en el proyecto de diseño.

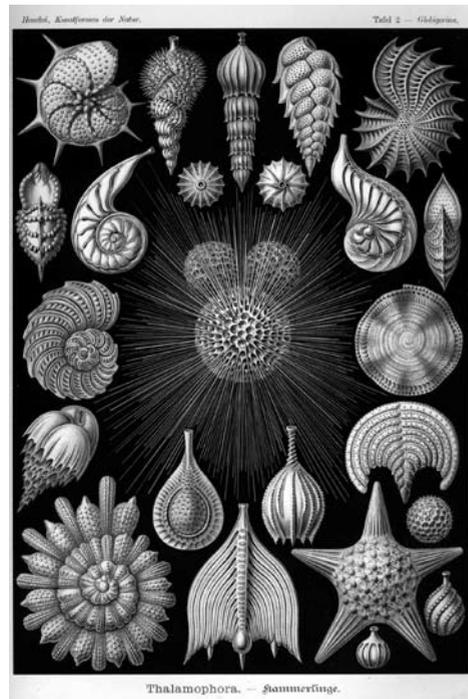


Fig. 48. Globigerina. Haeckel, *Kunstformen der Natur*. 1899

13. PEARSON, David. *Arquitectura orgánica moderna. "Un nuevo camino para el diseño urbano y rural"*. Blume, Barcelona, 2002. Pág. 66

Superficies curvas no desarrollables

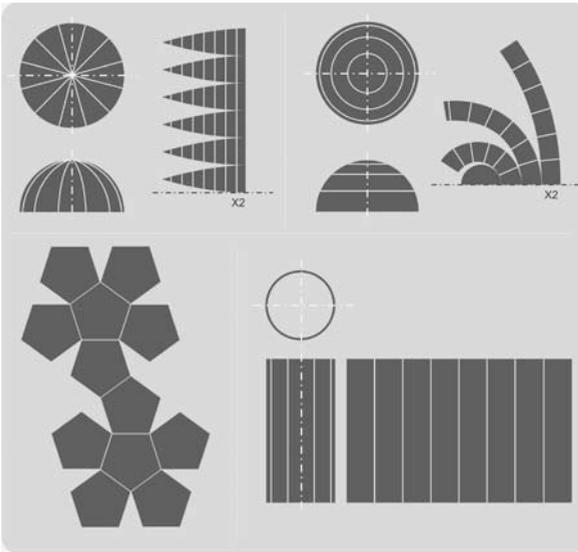


Fig. 49. Desarrollo de una media esfera (superficie no desarrollable) con el método de los husos y las zonas; y desarrollo del dodecaedro y el cilindro.

Las superficies que poseen curvaturas en todos los puntos, o sea en más de una dirección cartesiana, se denominan no desarrollables, debido a que es prácticamente imposible aplanarlas sin arrugarlas o dañarlas, lo que hace necesario cortarlas en una serie de secciones por algún método de desarrollo de superficies, ya sea el de los husos o las zonas. <<Su rigidez y su resistencia mecánica proceden, en gran parte, de la resistencia a las deformaciones que tienden a aplanarlas, es decir, a reducir sus curvaturas>>¹⁴. Las superficies desarrollables son aquellas que se pueden generar a partir de un plano doblado o plegado, todos los poliedros regulares y los semirregulares son de este tipo; las superficies que tienen curvatura sólo en una dirección pueden llegar a ser desarrollables dependiendo de la flexibilidad del material (ver figura 49).

Si las curvaturas están en todos los puntos y en la misma dirección se denominan sinclásticas (del griego *syn*: con, y *klastos*: corte), son del tipo genérico de las curvas, y fueron conformadas por una presión positiva actuando en el interior. Si la superficie tiene dos tipos de curvaturas en direcciones diferentes perpendiculares, se denomina anticlástica, son del tipo de silla de montar, su forma se debe a dos presiones iguales pero de diferente direccionalidad (ver figura 50).



Fig. 50. Curvatura sinclástica y anticlástica.

14. SALVADORI, Mario. HELLER, Robert. Estructuras para arquitectos. Kliczkowski Publisher. 3er edición. Madrid. 1998. Pág. 169, 188.

Superficies de revolución

Las superficies de revolución son aquellas que están definidas por la rotación de un plano o curva meridiana de formas diversas alrededor de un eje de simetría recto. La curvatura sinclástica de la figura 50, por ejemplo, es una superficie de revolución, lo que se hizo rotar en este caso fue un segmento de círculo (ver figura 51).

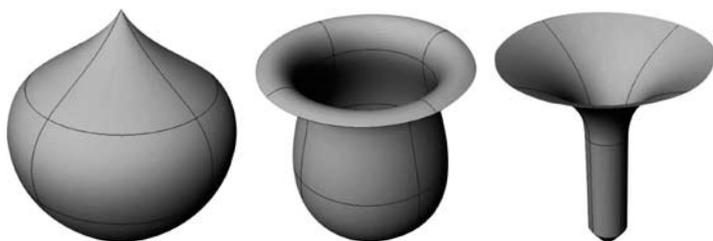


Fig. 51. Diferentes formas por revolución.

Si se hace rotar media elipse alrededor de su eje vertical, resulta una cúpula elíptica, su comportamiento estructural no es tan eficiente como una cúpula esférica, pues la parte superior de su estructura es más plana y la disminución de curvatura introduce mayores tensiones; en cambio, si se hace rotar una parábola, se construye una cúpula parabólica, la cual tiene mayor curvatura en la parte superior, presentando mayores ventajas estructurales (ver figura 52).

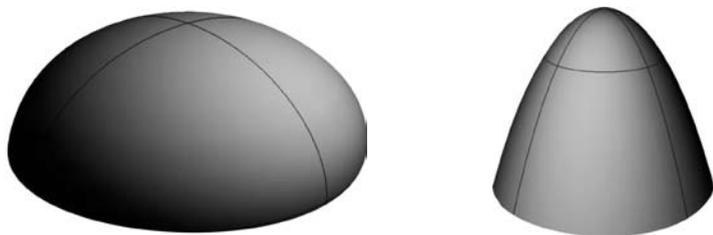


Fig. 52. Cúpula elíptica y cúpula parabólica

La superficie que se genera a partir de la rotación de una línea recta inclinada alrededor de un eje recto es un cono. Si se gira una circunferencia o una semicircunferencia, aparece una nueva superficie curva llamada toro o superficie toral (ver figura 53).



Fig. 53. Cono, toro, y superficie toral

Superficies curvas de traslación

Si las superficies de revolución se obtienen efectuando una simetría de rotación, estas superficies se construyen aplicando una simetría de traslación, es decir, trasladando o deslizando una curva plana sobre un riel curvo o recto, comúnmente perpendicular a la curva. Por ejemplo, un cilindro se obtiene desplazando una curva o circunferencia a lo largo de una recta horizontal, o desplazando una recta horizontal sobre una curva. Tomando en cuenta el segundo caso, todas las superficies de revolución son superficies de traslación, mas no todas las superficies de traslación son de revolución. En la figura 54 se ve un muestra de este concepto, ambas superficies son cilíndricas desarrolladas por traslación, pero sólo la primera se puede generar también por revolución.

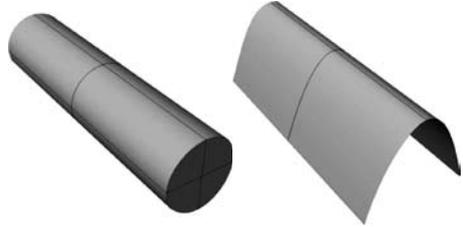


Fig. 54. Superficies cilíndricas.

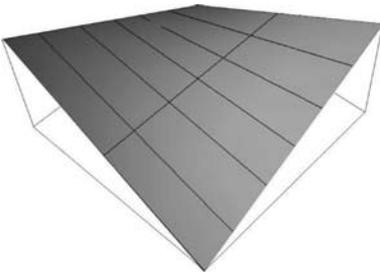


Fig. 55. Paraboloide hiperbólico.

La curvatura anticlastica de la figura 55 es un paraboloide hiperbólico, se obtiene desplazando una línea parabólica con curvatura hacia abajo, la cual se va modificando a medida que se desplaza. Esta misma curva trabaja como una catenaria a tracción sobre otra parábola con curvatura hacia arriba que trabaja a compresión. Las secciones o cortes horizontales producen hipérbolas.

Las direcciones de curvatura del paraboloide hiperbólico que aparece en la figura 55 son iguales en todos los puntos. Esto quiere decir que las secciones verticales paralelas a estas direcciones son líneas rectas, denominadas generatrices. Por tanto

este tipo de paraboloides hiperbólicos también se pueden generar desplazando una línea recta a lo largo de dos rectas que no pertenecen al mismo plano.

Como se ve en la figura 56, cualquier curva puede desplazarse sobre otra curva, en este caso una hipérbola sobre una circunferencia, y una circunferencia con cambio de escala sobre una elipse, resultando en un hiperboloide y en un elipsoide, respectivamente; aunque este método de traslación permite obtener una gran diversidad de superficies, no todas ellas pueden servir para soportar cargas.



Fig. 56. Hiperboloide y elipsoide.

Superficies regladas

Cuando se piensa en superficies o cuerpos curvos es común imaginarse figuras que difieren bastante de lo rectilíneo. Sin embargo, hay muchas superficies curvas que contienen segmentos rectos que agrupados forman una curva. Esto quiere decir que por cada punto de estas superficies pasa al menos una recta que está contenida en ella. El cilindro, por ejemplo, al tener solamente una curva en una dirección, se puede construir por la repetición de una recta alrededor de un eje de rotación; en el caso de las superficies cilíndricas de la figura 54, son incontables las rectas que construyen la forma, esto hace que se camuflen en el recorrido.

Por definición, las superficies regladas son aquellas que se generan por el desplazamiento de los extremos de un segmento de recta sobre dos curvas separadas. Cuando las curvas son dos rectas con ángulos diferentes, la superficie que se genera es un paraboloide hiperbólico. Si se desliza una línea recta inclinada sobre dos circunferencias horizontales, se describe un hiperboloide; él recibe su nombre de las secciones verticales que se generan: hipérbolas (ver figura 57).

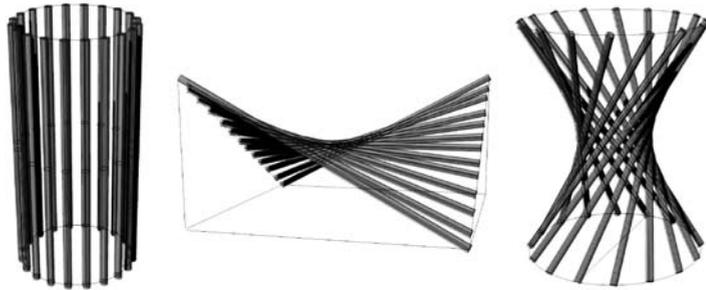


Fig. 57. Superficies regladas: cilindro, paraboloide hiperbólico, hiperboloide.

Se obtiene otro tipo de superficies regladas haciendo deslizar un segmento de recta o de curva sobre dos curvas diferentes ubicadas en planos paralelos. En la figura 58 se pueden observar dos superficies conoidales resultado de dicho deslizamiento. Los conos, en general, son superficies regladas en las cuales un extremo de una recta gira alrededor de un punto y el otro se desliza siguiendo una circunferencia o curva; dependiendo del tipo de curva o la transformación que ella halla sufrido, se obtienen diferentes sectores cónicos o superficies conoidales.

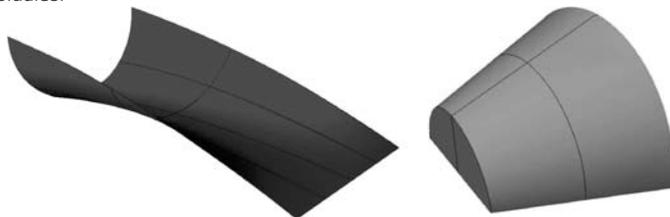


Fig. 58. Conoide y sector cónico

Superficies complejas

Las superficies elementales curvas, como las que se vieron anteriormente, se combinan o transforman siguiendo patrones y criterios geométricos para obtener superficies más complejas. Dos segmentos cilíndricos se cortan en ángulo recto para llenar una superficie cuadrada. Aprovechando la geometría del paraboloides hiperbólico, éste se puede utilizar para generar una malla de forma curva a partir de una agrupación. La combinación de las simetrías de rotación y de espejo convierten una superficie cónica en una cáscara ondulada. La traslación de dos tipos diferentes de curvas en dos rieles curvos produce una forma orgánica (ver figura 59).

En conclusión, conociendo las superficies y los cuerpos elementales, ya sean rectos o curvos, sus métodos de generación, transformación y agrupación, se pueden generar infinidad de nuevas superficies cuyo limitante es la configuración que tiene el espacio y el modo como interviene en las propiedades de las superficies y los cuerpos curvos.

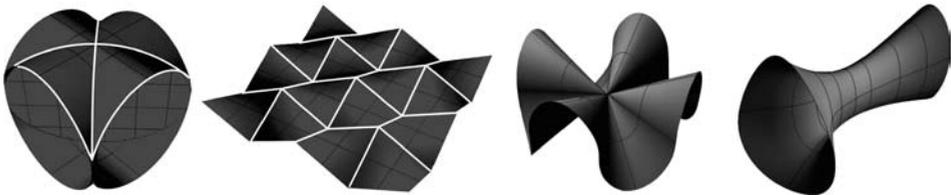
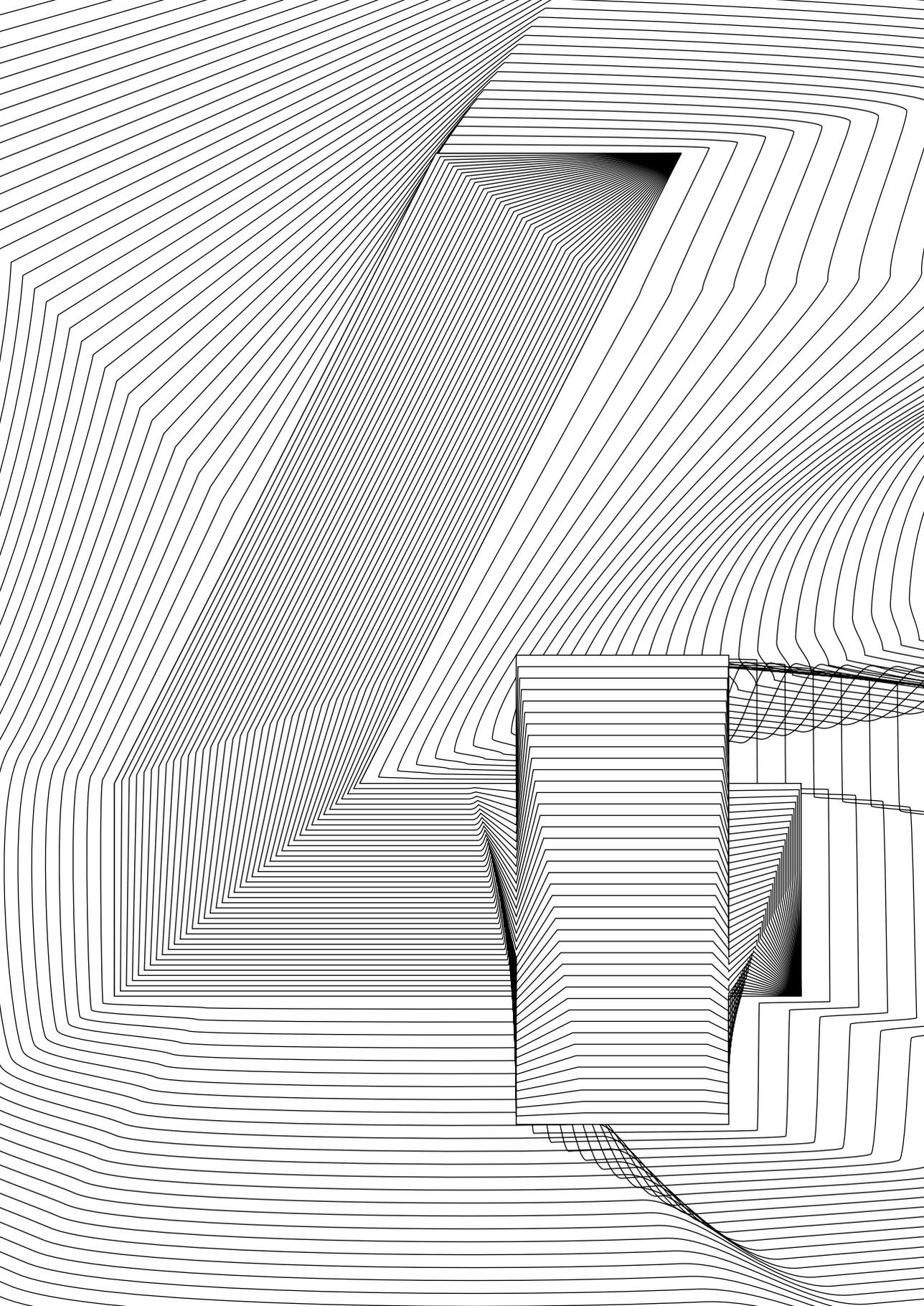
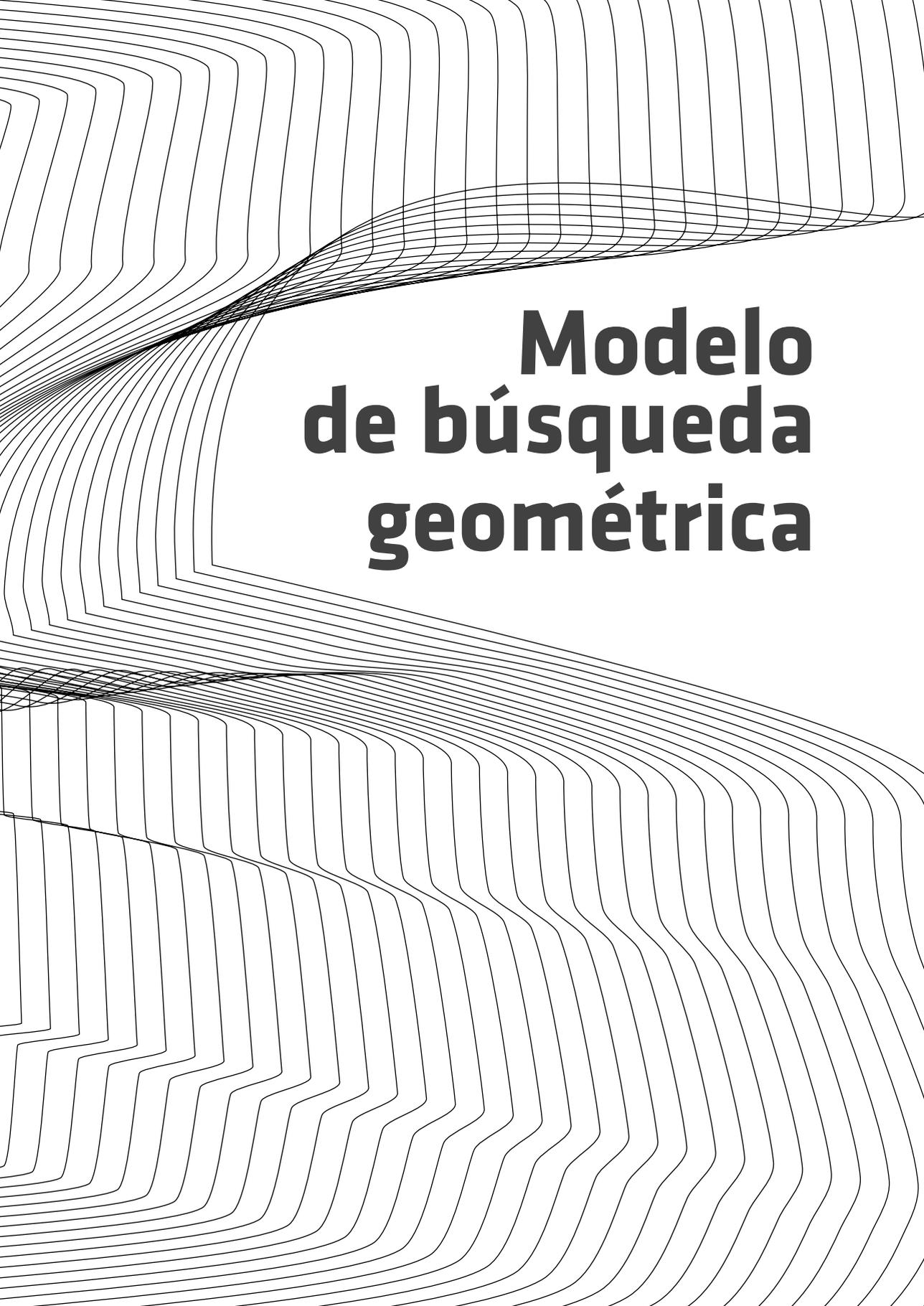


Fig. 59. Superficies complejas: cilindros entrecruzados, paraboloides hiperbólicos, cáscara ondulada y forma orgánica.





Modelo de búsqueda geométrica



Anteriormente se estudió la geometría como instrumento de gran relevancia para analizar morfologías, ahora se ilustrará el modelo de búsqueda geométrica propuesto por la Línea de Investigación en Morfología Experimental¹⁵, el cual utiliza las propiedades y características antes enunciadas para construir formas y sistemas geométricos, en el cual, como dice el arquitecto Heino Engel, el proyectista, que ya conoce la lógica espacial que ordena y fabrica configuraciones, puede dominar y manipular las formas cruzando los límites de lo ya hecho y comprobado, permitiéndose proponer nuevas morfologías no convencionales.

Este modelo, como los que se van a estudiar más adelante, no representan por sí mismo una metodología de diseño; se pueden insertar en un proceso convencional o no convencional de proyectación, pero, tomarlo individualmente podría acarrear un absurdo proyectual. Es decir, si se utiliza el Método General de Diseño propuesto por el Programa de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana¹⁶, por ejemplo, en el que se encuentra el proceso de diseño enmarcado en cuatro etapas, como se observa en la figura 60, los modelos propuestos estarían ubicados en la tercera etapa, en la etapa de Formalización.

Esto quiere decir que de igual manera tiene que existir un primer momento de identificación del contexto, del que se va a obtener una Información, la cual se debe formalizar físicamente, y por último, para que pueda existir producto, se deben idear las estrategias de comercialización, la cual se puede ver en el esquema como la etapa de Conformación. En conclusión, el modelo que se va a exponer se puede utilizar en una metodología convencional de diseño siempre y cuando se añadan los respectivos estudios y análisis que anteceden a la Formalización, y se retroalimiente con la definición de requerimientos, especificaciones y características posteriores de la Conformación.

15. La línea de investigación en Morfología Experimental del Programa de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana tiene como objetivo profundizar en la generación y optimización morfológica y estructural que debe tener intrínseco el proceso de construcción en el diseño. El acercamiento a esta optimización se realiza a partir de la experimentación, la biónica, y el estudio de las estructuras no convencionales.

16. Sanín, Juan Diego. Método General de Diseño. Programa de Diseño Industrial, UPB. 2006.

Ahora bien, la geometría para el diseño cumple tres funciones fundamentales: catálogo de formas, instrumento de análisis de los resultados de la proyectación, y herramienta de proposición de morfologías.

La primera sería la función que le permite al diseñador utilizar las formas y sistemas prototípicos ideales, consultarlas como una gran biblioteca, un catálogo donde el proyectista puede ingresar, seleccionar, y tomar prestada una configuración.

La segunda función hace referencia al modo como va a ser construida y posteriormente interpretada la forma; para la construcción se deben tener presentes las propiedades de la frontera (tamaño, proporción, superficie, textura y simetría) presentes en la geometría, y para la interpretación se deben sumar a las anteriores una propiedad exterior: la inteligibilidad, la cual permite que la conformación, como se vio al comienzo del texto, sea comprendida no tanto como significado sino como texto mismo.

Tomando estas propiedades generales de la forma y adicionándole las características propias de las configuraciones geométricas, ya sean planas o espaciales, ya sean rectas o curvas, se tienen herramientas suficientes para en primer momento como proyectista construir, y en un segundo momento como observador, leer.

La tercera función justifica este modelo de búsqueda geométrica. Es la que permite tomar las configuraciones prototípicas geométricas, tanto globales como locales, sus propiedades y características, las herramientas de variación y transformación geométrica (simetrías, truncaciones, estelaciones y dualidades), y el modo cómo está constituido el espacio, para construir y proponer morfologías,

Las morfologías se pueden basar en elementos geométricos, pero utilizando el modelo de búsqueda geométrica pueden llegar a convertirse en sistemas y formas aún más complejas, regulares o irregulares. Las cuales poseen intrínsecamente un ordenamiento formal que les permite en primer lugar ocupar un espacio en las tres dimensiones, y en segundo lugar beneficiarse de la armonía estética que le regaló la matriz generadora llamada geometría.

En la figura 61 se puede observar el esquema del modelo. Es una gráfica cíclica que comienza con la esfera y a partir de variaciones y transformaciones geométricas y topológicas termina nuevamente donde comenzó, en el mismo cuerpo curvo, con un número indefinido de caras, el cual se nombrará como monoedro regular, o en términos convencionales, como esfera.



Fig. 60. Esquema del método general de diseño.

En este monoedro la frecuencia de las caras aumenta tanto, que tal y como pasa con el círculo, que es un polígono de lados infinitos, la esfera es un “poliedro” de caras infinitas, donde no se puede decir a ciencia cierta donde comienzan o terminan estas. Es un sólido sin aristas definidas, y por consiguiente un cuerpo de una sola cara, un monoedro en donde cada punto de la superficie está a la misma distancia del centro geométrico, por tanto un monoedro regular.

Esta característica de regularidad que hace que cada punto de la superficie de la esfera esté a la misma distancia del centro geométrico, es la que hace que los poliedros platónicos se puedan inscribir en el interior de la esfera. Los vértices de los poliedros regulares están a la misma distancia del centro geométrico, lo que significa que si se tiene una esfera y un cubo compartiendo el centro geométrico, y uno de los vértices del cubo está tocando finamente la superficie de la esfera, todos los demás vértices deben estar en esa misma disposición. Las propiedades de la esfera, como se ve en la figura 61, fueron las generadoras del poliedro regular, y pasa lo mismo en el sentido contrario, los poliedros regulares poseen características que le permiten generar la esfera.

Igualmente, como se vio en el capítulo anterior, a partir de transformaciones sobre los sólidos platónicos se pueden generar los poliedros semi-regulares (arquimédicos y catalanes); lo afectado no es más que las propiedades de regularidad, como las caras, las aristas y vértices de los poliedros platónicos. Al seguir transformando y variando estos sólidos semirregulares, ya no con esa simetría y continuidad sino cometiendo adrede intermitencias y desigualdades, se obtienen los sólidos irregulares.

Estos sólidos ya no pueden ser descritos tan fácilmente como los anteriores, pero por poseer propiedades del poliedro que los antecedió, conservan cierto equilibrio y estructura. Es importante aclarar que el modelo no propone un camino único, un poliedro irregular también se puede obtener realizando variaciones o transformaciones geométricas y/o topológicas sobre una esfera, sobre un tetraedro, o simplemente haciendo uso de las propiedades de alguno de los sólidos antes mencionados, ya sea regular, semirregular o curvo.

La última etapa, la cual representa el paso del poliedro irregular al monoedro irregular, y del monoedro irregular al regular, e inversamente, sólo es posible mediante transformaciones topológicas, es decir, las transformación efectuada utiliza y conserva algunas propiedades formales pero cambia el modo como está distribuida la materia dentro de la forma.

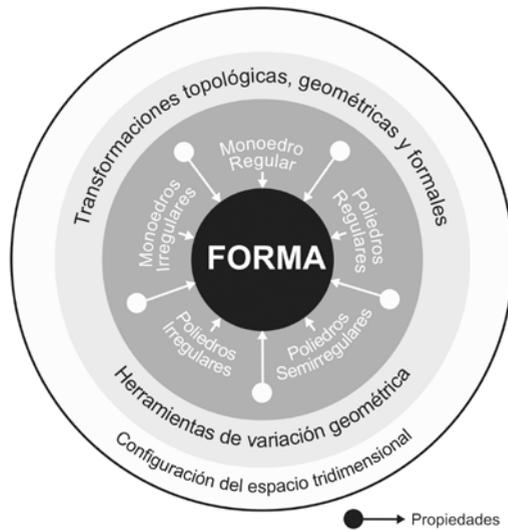


Fig. 61. Esquema del modelo de búsqueda geométrica.

Utilización del monoedro regular

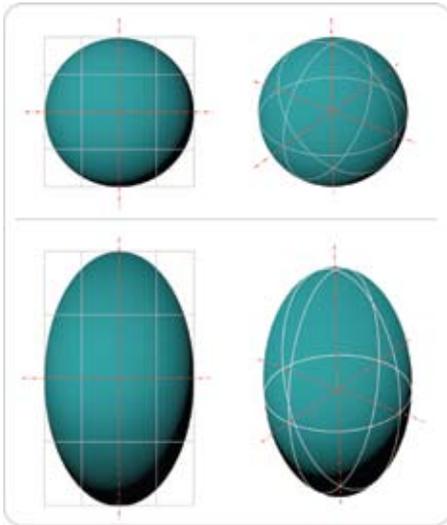


Fig. 62. Transformación topológica de la esfera.

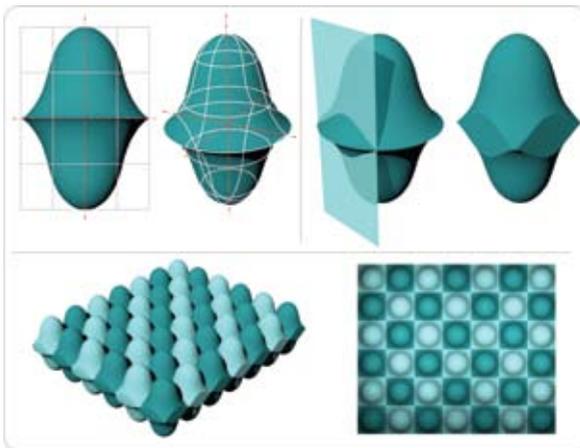


Fig. 63. Diedro transformado con truncaciones formales y al cual se le aplicó una herramienta de variación geométrica (simetría de traslación).

El monoedro regular o esfera, también puede ser descrito por las propiedades y características geométricas de los sólidos platónicos. Lo interesante es que aunque se pueda definir con los tres ejes y tres planos fundamentales, 'X', 'Y' y 'Z', la cualidad de regularidad convierte tanto los ejes como los planos en un número inconmensurable; al monoedro en un cuerpo con simetrías ilimitadas, que demuestran sólo metafísicamente que la esfera es un sólido perfecto.

En la figura 62 se puede ver la transformación topológica de una esfera en un ovoide, utilizando los parámetros designados por los ejes fundamentales, específicamente un crecimiento en el eje 'Y'. Empleando la periferia de uno de los cortes transversales ubicado en el plano horizontal, para definir nuevamente la morfología del monoedro que ahora

es irregular, se obtiene un diedro que fue determinado por un aro rígido central de donde se modificó la configuración. Un diedro, es pues, un cuerpo que posee solamente dos caras, y que si se piensa con detalle, sólo es posible lograrlo utilizando superficies curvas.

Luego, truncando paralelamente el diedro con cortes verticales alejados del eje 'Y', se obtiene un poliedro irregular con caras rectas y curvas, como se observa en la figura 63 con el que ya se pueden realizar modulaciones a partir de simetrías de traslación que siguen directrices rectas. Lo especialmente relevante de estas formas y sistemas, es que sólo fueron el resultado de transformaciones topológicas, herramientas de transformación y herramientas de variación geométrica.

Utilización de poliedros regulares

Utilizando las propiedades y las características geométricas del tetraedro, concretamente las aristas y los vértices, se puede generar externamente el cubo. Repitiendo la fórmula pero ya en su interior, se genera un octaedro cuyos vértices coinciden con la mitad de las aristas del tetraedro. Las aristas del cubo, además concuerdan con las diagonales de los pentágonos que son caras del dodecaedro. Y por las aristas de dos de esas caras pentagonales que son paralelas y opuestas, pasan tangencialmente diez de las veinte caras triangulares del icosaedro. Tan complicado laberinto solamente para explicar las facultades que poseen los poliedros regulares de generarse a sí mismos partiendo de las propiedades formales y geométricas que poseen desde su construcción fundamental (ver figura 64).

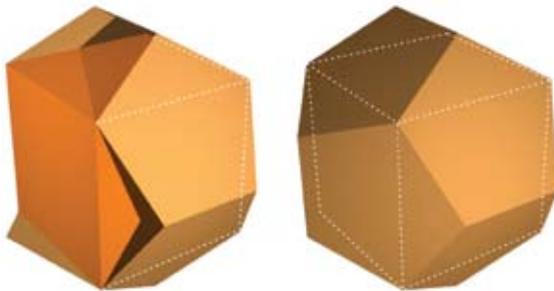


Fig. 64. Cubo generador de dodecaedro.

Esas mismas propiedades, sumadas a las transformaciones y herramientas de variación, como en el ejemplo del monoedro regular, resultan en nuevas configuraciones y sistemas geométricos. En la figura 65 se puede observar un cubo al cual se le aplicó una serie de truncaciones formales (no son truncaciones geométricas porque no cumplen las características de cortes en los vértices) utilizando como guía algunos de los planos ortogonales y transversales (ver figura 18), para luego efectuar

estelaciones en las caras resultantes. El nuevo sólido es un poliedro irregular que retomó los componentes y características del hexaedro, aunque tiene sus propiedades individuales que lo identifican y lo definen. En la figura 65g se aprecian las simetrías de espejo y traslación que se le pueden aplicar para buscar un nuevo sistema morfológico, que se construye nuevamente con líneas configuradas en una estructura plana, basada en las propiedades y componentes de la configuración local, es decir, del sólido irregular, y con la composición de la configuración global, o sea la estructura general.

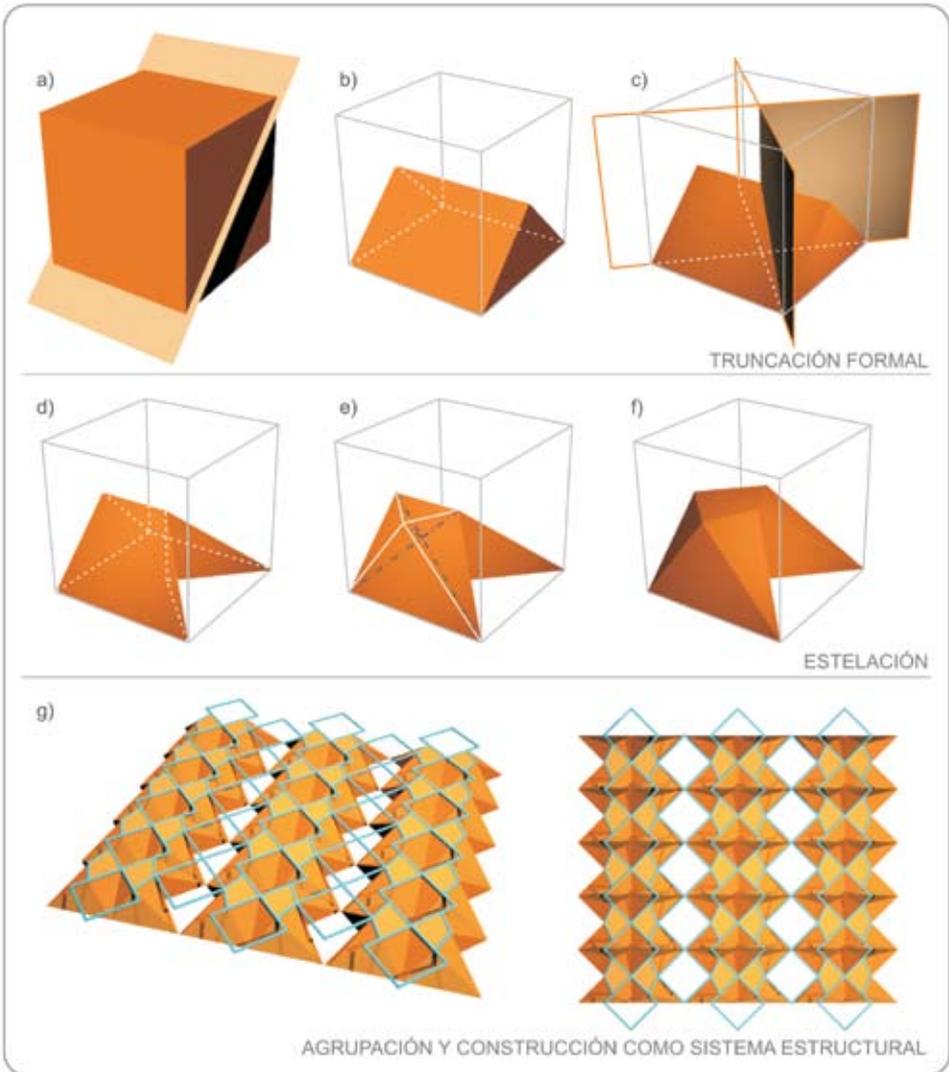


Fig. 65. Transformación paso a paso del hexaedro y agrupación.

Utilización de poliedros semiregulares

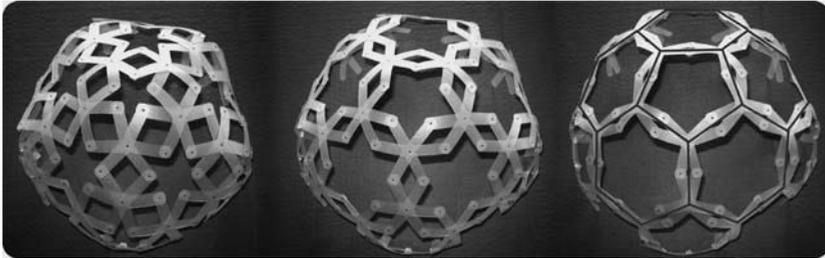


Fig. 66. Cúpula transformable.

Todas las partes del modelo de búsqueda geométrica no son excluyentes ni presentan necesariamente una continuidad ascendente, sólo son variables que el proyectista puede tomar en cuenta al momento de formalizar desde la geometría. A los poliedros semiregulares, por ejemplo, se les pueden efectuar todas las transformaciones y variaciones vistas anteriormente, utilizando sus características y componentes. Pero en este caso se estudian a partir de los elementos o principios constituyentes, mas no desde la configuración cerrada total. En la figura 66 se puede apreciar una cúpula con comportamiento mecánico que utiliza la misma disposición que construye al icosaedro truncado (ver figura 28), en la cual todos los pentágonos están rodeados por hexágonos; el pentágono sugiere la curvatura pero los hexágonos abren la curva generada, delimitando el cerramiento. La búsqueda geométrica se hizo teniendo en cuenta la manera como se organizan las partes del icosaedro truncado, y con ellas se construye una cúpula que tiene todo el fundamento mecánico que la antecede, pero que se formalizó con otro tipo de partes a partir de dicha organización.

De igual manera, la estructura de la figura 67 se organiza primero en la parte superior, siguiendo el tipo de configuración del icosaedro: tiene triángulos, que en este caso poseen un corte curvo, se unen en vértices de quinto orden y generan una superficie sinclástica que tiende a cerrarse. El cerramiento es detenido por los hexágonos que se forman al unir triángulos con vértices de sexto orden, que como ya se estudió, son una de las tres agrupaciones planas, y esta cualidad de aplanar es la que logra que la torre pueda crecer indefinidamente adicionando triángulos de esa misma manera. Para terminar la estructura en la parte inferior, los triángulos se empiezan a unir con vértices de séptimo orden que, como se verá a continuación, provocan un efecto muy diferente a las uniones de quinto orden.

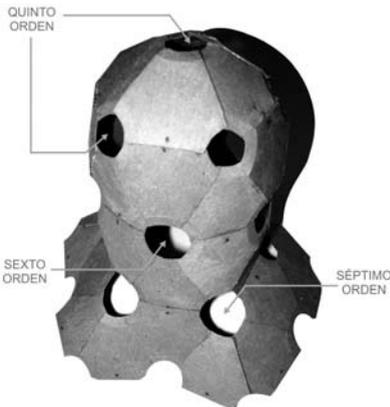


Fig. 67. Torre geodésica construida a partir de triángulos..

Utilización de poliedros irregulares

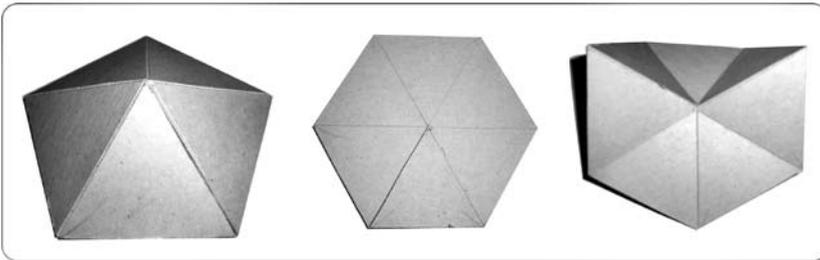


Fig. 68. Superficies sinclástica, plana y anticlástica a partir de triángulos.

Al aplicarle transformaciones y variaciones a los poliedros regulares o semirregulares se puede obtener una infinita variedad de poliedros irregulares. Pero ahora se estudia, como en el caso anterior, la manera como se disponen las caras de los poliedros que igualmente están condicionadas a la conformación del espacio, y que logran proveer a los sólidos de ciertas características formales.

Si se toman 6 triángulos equiláteros, estos completan los 360° , y pueden crecer infinitamente en una red regular plana hexagonal. Si se agrupan 5 triángulos alrededor de un punto central, o sea en un vértice de quinto orden, el grupo de triángulos adquiere una forma sinclástica. Si se toman ahora 7 triángulos con las mismas características, estos se ubicarán como una silla de montar, como una superficie anticlástica, debido a que la suma de los ángulos es mayor de 360° , por tanto la configuración debe equilibrarse curvando los planos en diferentes direcciones (ver figura 68).

Estas configuraciones se deben a las restricciones que impone la estructura del espacio y no dependen de nuestras preferencias por una u otra forma. Haga lo que se haga, no se puede construir una forma de silla de montar a partir de cinco triángulos equiláteros planos o un cuenco con siete triángulos de iguales características. Por ejemplo, ninguno de los sólidos regulares y semirregulares está formado sólo por hexágonos, el hexágono le pertenece al plano, los poliedros con pentágonos tienen 12 de ellos, ni más ni menos, el pentágono es el que domina el espacio tridimensional.

Desde la premisa de que ningún sistema hexagonal es capaz de encerrar un espacio, y por el contrario, a conformaciones pentagonales se les facilita salir a las tres dimensiones, se comienza la búsqueda geométrica a partir de triángulos equiláteros (aclarando que se puede realizar el mismo procedimiento con diferentes polígonos regulares).

Para este proceso se debe tener en cuenta que los vértices de mayor o menor tamaño que seis también intervienen en el moldeado de la estructura. Por ejemplo, si se colocan tres triángulos alrededor de un mismo vértice, éstos adoptan una morfología más aguda, que la que tendría una forma pentagonal. Y si se tienen agrupaciones de 7 triángulos, el resultado son conformaciones con dobles curvaturas negativas, o anticlásticas tipo silla de montar que le impondrán a la constitución nuevas características geométricas.

Combinando los tipos de vértices se puede explorar constructivamente con la morfología de las formas, eso quiere decir que esta búsqueda geométrica se debe hacer físicamente, con elementos reales (ver figura 69), ya que es la única manera de comprender fielmente cómo responde la forma, en este caso construida a partir de triángulos, a la geometría o a las influencias que se le imponga.

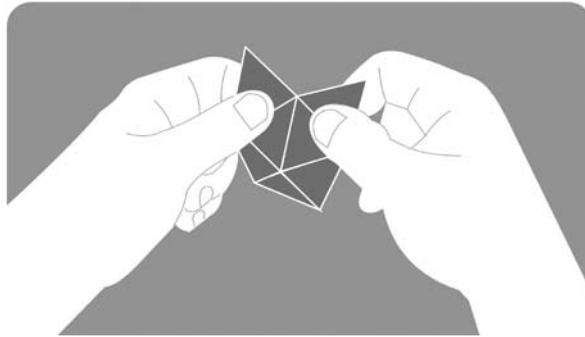


Fig. 69. Construcción física, utilizando el modelo de búsqueda geométrica.

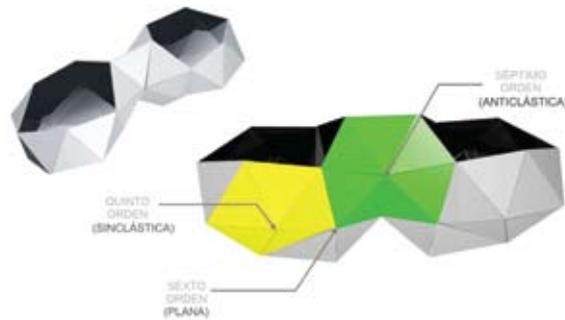


Fig. 70. Contenedor construido a partir de triángulos equiláteros (Diseño: Pablo Arcila).

El contenedor de la figura 70 fue desarrollado a partir de este modelo; en él se exploró constructivamente con antelación otra serie de posibilidades morfológicas que ayudaron al proyectista a comprender las características que imponían los tipos de vértices (tomados como agrupaciones de triángulos que configuran localmente el contenedor) a la configuración global. En el medio de la forma, se tiene por ejemplo, señalada una superficie anticlástica, lograda por la agrupación de 7 triángulos equiláteros que generaron una doble curvatura negativa abriendo la forma en dos direcciones distintas y están unidos a un grupo de 5 triángulos, también equiláteros, que comienzan a cerrar la figura en los extremos. En la conjunción de las dos agrupaciones, hay una superficie formada por seis triángulos que no es totalmente plana porque está siendo forzada por cada una de las dos superficies al pretender adoptar una forma que les dé continuidad.

En la figura 71 se pueden observar otras morfologías construidas utilizando este modelo. Algunas de ellas enmarcadas en un enunciado particular o simplemente resultado de una indagación formal que permitió encontrar formas que por otras técnicas o utilizando el boceto como herramienta de proyectación, serían muy difíciles de desarrollar.



Fig. 71. Otros desarrollos construidos a partir de triángulos equiláteros (desarrollados por estudiantes del Grupo de Estudios en Diseño de la UPB).

Utilización de monoedros irregulares

Sólo existe un monoedro regular que es la esfera, pero monoedros irregulares hay infinitos. Los monoedros también tienen una multitud de ejes, pero la diferencia es que tienen diferentes longitudes, esto quiere decir que las líneas que van desde el centro geométrico hasta algún punto de la superficie son de longitud variable, proveyéndoles la característica de irregularidad.

En la figura 72 se observa el contenedor que con anterioridad se mencionó, al que se le hizo un redondeado de las aristas. El efecto es una forma orgánica que toma las propiedades geométricas de su predecesor y que le adiciona la curvatura y sinuosidad ocasionada por el redondeado de las terminaciones.

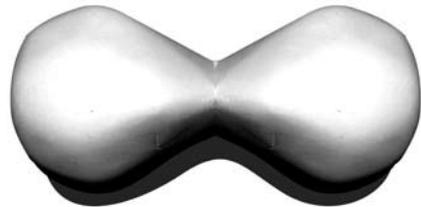


Fig. 72. Contenedor redondeado.

De igual forma, los monoedros irregulares de la figura 73 fueron desarrollados con este mismo procedimiento, primero se construyeron con triángulos equiláteros, para luego suavizar sus aristas en busca de superficies curvas en toda la morfología.

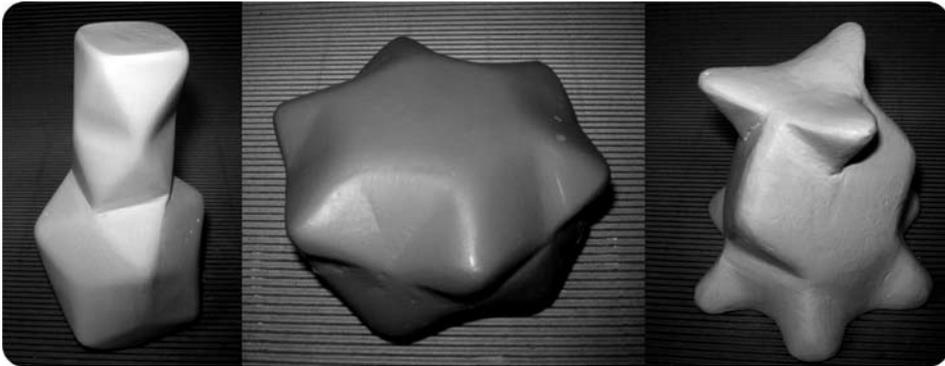


Fig. 73. Monoedros irregulares (desarrollados por estudiantes del Grupo de Estudios en Diseño de la UPB).

Otra manera de buscar formas monoédricas irregulares utilizando el modelo es aumentar la frecuencia de triangulación para obtener formas con topología esférica: un icosaedro tiene mayor frecuencia que un tetraedro, esto hace que esté más cercano a ser una esfera que el segundo. Para tener un ejemplo, en la figura 74 se ven cúpulas geodésicas con diferentes frecuencias, aunque no son irregulares se puede comprobar fielmente la cercanía a la esfera que tiene la última estructura.

En conclusión, las posibilidades morfológicas que ofrece el modelo son ilimitadas. Como se pudo comprobar, muchas de las formas resultantes se alejan de las configuraciones convencionales, rectilíneas y ortogonales, que comúnmente se asocian a la construcción a partir de la geometría. Son formas en donde se ve explícitamente evidenciada la función que le da Robert Lawlor a la geometría: ordenar espacialmente las morfologías. Son configuraciones geometrizadas tridimensionalmente, que se alejan del concepto de análisis geométrico o geometrización que se ha trabajado en el diseño, la arquitectura y las artes plásticas por siglos, en donde el proyectista debía ordenar geoméricamente los objetos, a partir de vistas frontales, laterales o superiores, imágenes planas que se apartaban considerablemente de la realidad (ver figura 75).

Utilizando el modelo de búsqueda geométrica, el sólido objeto de la geometrización no sería visto y modificado por el observador como un dibujo sino como una forma que está inscrita en las tres dimensiones, al que el ojo le da perspectiva y que nunca corresponderá perfectamente a la manera como se ha representado en el plano.



Fig. 74. Cúpulas geodésicas que aumentan de frecuencia.

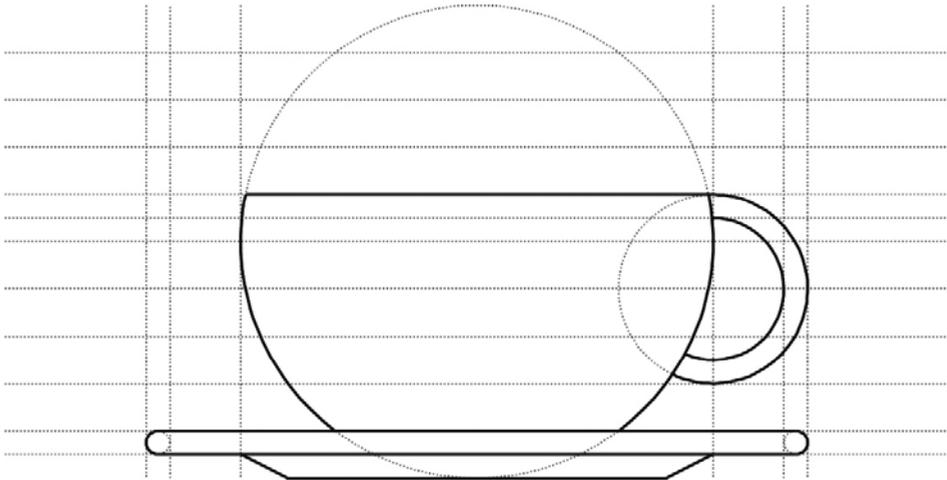
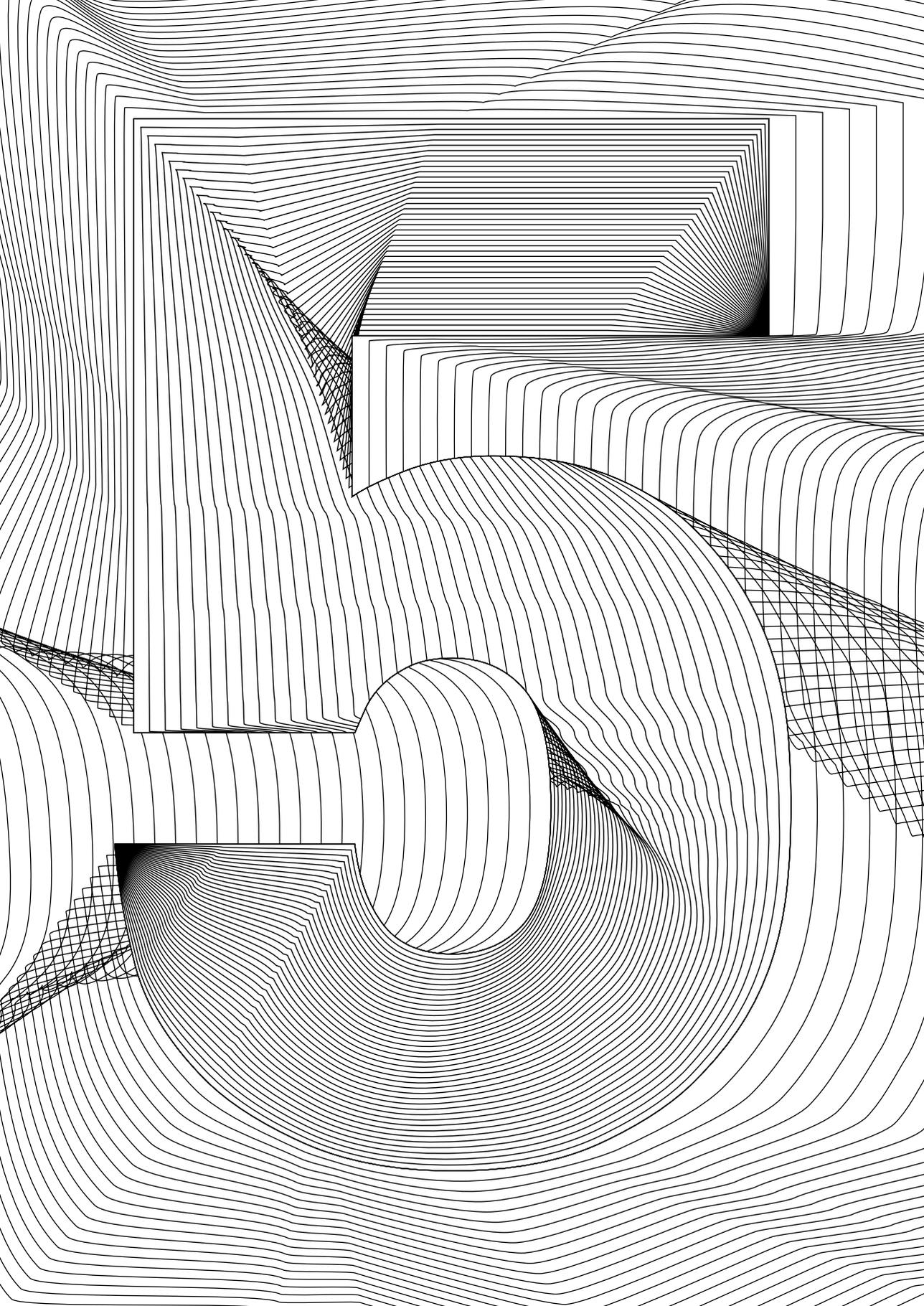
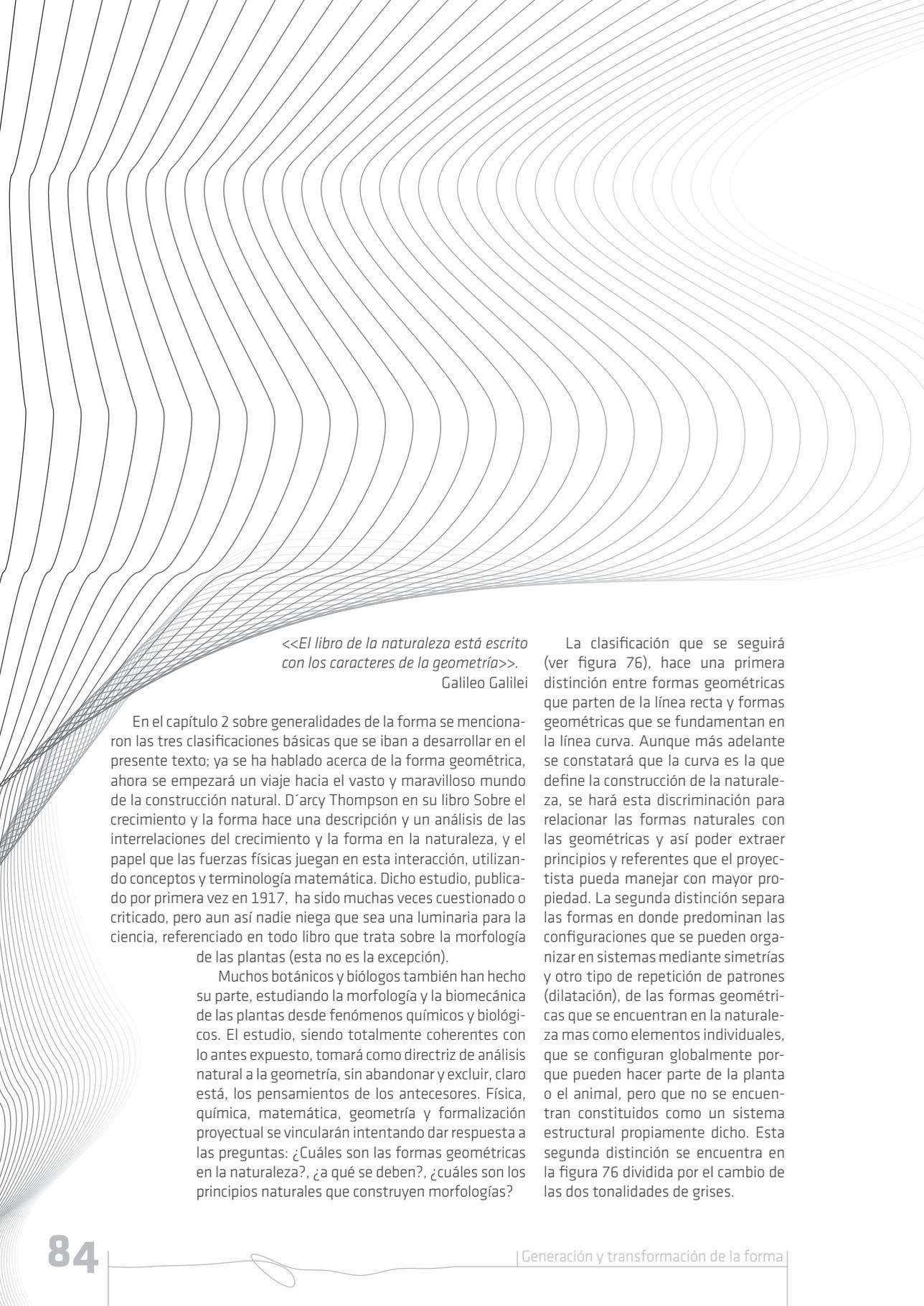


Fig. 75. Análisis geométrico de la vista frontal de una taza.



The background features a complex pattern of thin, black lines. The top half consists of numerous parallel, wavy lines that curve downwards from left to right. The bottom half features a grid of lines that also curves downwards from left to right, creating a sense of depth and movement. The overall effect is a dynamic, organic-looking structure.

La forma en la naturaleza

The background of the page is a complex, abstract pattern of thin, curved lines. These lines originate from the left side and curve towards the right, creating a sense of depth and movement. The lines are closely spaced and vary in curvature, creating a textured, almost organic appearance. The overall effect is reminiscent of a topographical map or a series of concentric, overlapping curves that create a three-dimensional effect.

<<El libro de la naturaleza está escrito
con los caracteres de la geometría>>.

Galileo Galilei

En el capítulo 2 sobre generalidades de la forma se mencionaron las tres clasificaciones básicas que se iban a desarrollar en el presente texto; ya se ha hablado acerca de la forma geométrica, ahora se empezará un viaje hacia el vasto y maravilloso mundo de la construcción natural. D'arcy Thompson en su libro Sobre el crecimiento y la forma hace una descripción y un análisis de las interrelaciones del crecimiento y la forma en la naturaleza, y el papel que las fuerzas físicas juegan en esta interacción, utilizando conceptos y terminología matemática. Dicho estudio, publicado por primera vez en 1917, ha sido muchas veces cuestionado o criticado, pero aun así nadie niega que sea una luminaria para la ciencia, referenciado en todo libro que trata sobre la morfología de las plantas (esta no es la excepción).

Muchos botánicos y biólogos también han hecho su parte, estudiando la morfología y la biomecánica de las plantas desde fenómenos químicos y biológicos. El estudio, siendo totalmente coherentes con lo antes expuesto, tomará como directriz de análisis natural a la geometría, sin abandonar y excluir, claro está, los pensamientos de los antecesores. Física, química, matemática, geometría y formalización proyectual se vincularán intentando dar respuesta a las preguntas: ¿Cuáles son las formas geométricas en la naturaleza?, ¿a qué se deben?, ¿cuáles son los principios naturales que construyen morfologías?

La clasificación que se seguirá (ver figura 76), hace una primera distinción entre formas geométricas que parten de la línea recta y formas geométricas que se fundamentan en la línea curva. Aunque más adelante se constatará que la curva es la que define la construcción de la naturaleza, se hará esta discriminación para relacionar las formas naturales con las geométricas y así poder extraer principios y referentes que el proyectista pueda manejar con mayor propiedad. La segunda distinción separa las formas en donde predominan las configuraciones que se pueden organizar en sistemas mediante simetrías y otro tipo de repetición de patrones (dilatación), de las formas geométricas que se encuentran en la naturaleza mas como elementos individuales, que se configuran globalmente porque pueden hacer parte de la planta o el animal, pero que no se encuentran constituidos como un sistema estructural propiamente dicho. Esta segunda distinción se encuentra en la figura 76 dividida por el cambio de las dos tonalidades de grises.

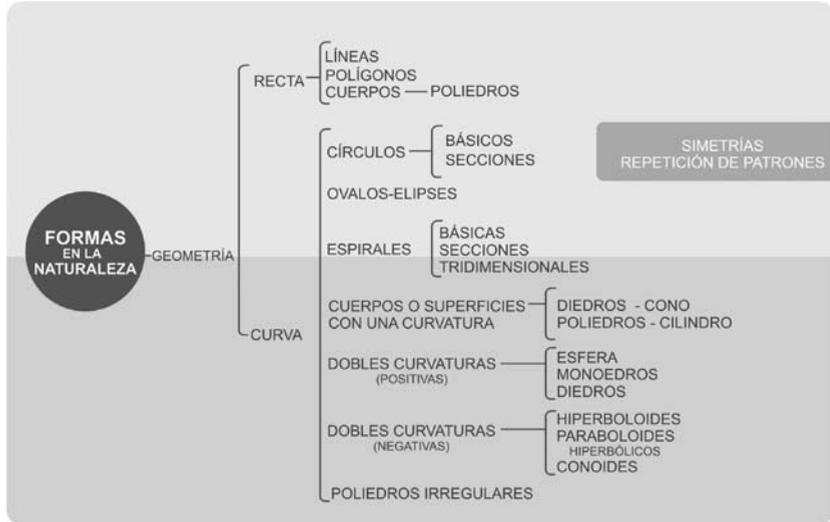


Fig. 76. Clasificación de las formas en la naturaleza a partir de la geometría.

REINO	MOVILIDAD	EN RELACIÓN CON SU ESTRUCTURA	EN RELACIÓN CON EL ESPACIO	
			POR ELLOS MISMOS	POR EL MEDIO
VEGETAL		MOVIMIENTO	ESTÁTICO	MOVIMIENTO
ANIMAL		MOVIMIENTO	ESTÁTICO MOVIMIENTO	ESTÁTICO MOVIMIENTO
MINERAL		ESTÁTICO	ESTÁTICO	ESTÁTICO MOVIMIENTO

Fig. 77. Selección del objeto de estudio.

Las formas susceptibles de ser estudiadas se seleccionaron en su mayoría, haciendo uso de la clasificación aristotélica de los reinos de la naturaleza, las formas presentes en el reino vegetal. Si se observa con detalle y buen juicio el esquema de la figura 80, se entenderá el porqué de esta selección. Los animales poseen configuraciones locales dinámicas, es decir, con relación a su estructura tienen movimiento, igualmente pueden hacer que su configuración global se mueva, y el medio ambiente, por ejemplo una fuerte ventisca, los desplazaría. Pueden poseer movilidad en esos tres momentos y como el estudio se fundamenta en las formas pero no en los mecanismos que éstas tienen para funcionar, es más adecuado seleccionar otro objeto en el que predomine la inacción. Además, el reino animal está ocupado por sistemas vivos complejos y esto de igual manera vuelve complejo el análisis.

Por otro lado, en el reino mineral se encuentran formas particularmente estáticas que tienen movimiento relevante sólo por acciones externas a él, pero en estas formas no ha actuado la selección natural que proporciona la evolución, la mejora y la supervivencia; en ellas sólo ha operado la selección fundamental que les permite existir, y aunque también basa sus formas en principios físicos y químicos como los demás reinos, no tiene implícita la búsqueda de formas más aptas, solamente está capacitado para existir en un espacio donde dominan ciertas leyes.

Ahora bien, el reino vegetal posee movimiento interno y puede ser movido por el medio, pero esa movilidad no es especialmente relevante y no dificultaría el proceso de estudio. Y en estas formas, igual que en el reino animal, ha trabajado por millones de años la selección natural, las ha modificado porque sencillamente las que no sirven ya no existen. Están cimentadas en la selección fundamental, o sea que las fuerzas las han influenciado pero sus características más importantes les han sido entregadas al sobrevivir. Por eso, estudiando este último reino se tendrá de alguna manera abarcada la globalidad del problema.

Pero, ¿por qué la naturaleza?, ¿por qué estudiarla? La respuesta es tan lógica como sencilla. Desde que se desarrolló el primer primate sólo han pasado 40 millones de años; primate que no tenía la capacidad cognoscitiva del hombre actual, por tanto el proceso selectivo cultural que emplea el hombre para elegir su formas es apenas incipiente con relación a la selección natural, con la cual la naturaleza viva ya ha pasado 3.500 millones de años, moldeando, adaptando y erigiendo su maravilloso reino perfecto.

Esa perfección la han alcanzado los sistemas biológicos gracias a que las fuerzas evolutivas han garantizado la optimización de los recursos que invierten en el proceso y de las formas y sistemas resultantes. Esa optimización formal se puede medir en tres aspectos: eficiencia, seguridad y estética. La eficiencia se refiere a la capacidad que tiene el sistema de utilizar el material donde y como es necesario. La seguridad es la cualidad que le provee a dicha forma características para resistir esfuerzos sin fracturarse, para mantenerse en pie, estable y seguir viva. La estética depende más del observador, pero por alguna razón, las formas culturales que construye el hombre se perciben bellas o no, haciendo referencia, muchas veces, a formas presentes en la naturaleza. Jung¹⁷ podría afirmar que se debe al trabajo del inconsciente colectivo, pero también puede ser que la naturaleza es para el hombre su primer referente de belleza: senos, mamá, nubes, flores, árboles. La utilización de las propiedades formales para procurar el mayor alcance estético no es buscada por la naturaleza pero sí encontrada, es un atributo innato a su construcción, a su naturaleza.

17. Carl Gustav Jung fue un médico psiquiatra ampliamente leído en el siglo XX por ser pionero en el estudio de la psicología profunda. Incorporó en su metodología conceptos de antropología, los sueños, la alquimia, la mitología, el arte y la religión.

Geometrías en la naturaleza

Haciendo referencia del esquema de clasificación de la figura 76, se empezará hablando de las morfologías naturales en donde se pueden observar las geometrías rectas: líneas, polígonos, poliedros y su variación a partir de las simetrías.

Línea recta



Fig. 78. Líneas rectas en la naturaleza

La línea recta también está presente en la naturaleza, no de una manera exacta y regular, pero sí exhibiendo su principal cualidad, la cual ha sido enseñada por los profesores de matemática y geometría por muchos años: el segmento recto es la mínima longitud entre dos puntos. ¿Quién puede contradecir tal afirmación? La naturaleza utiliza el segmento recto para lo mismo, para llevar material directamente de un punto a otro; cuando aumentan los puntos que se deben unir, el asunto adquiere otro tono de mayor complejidad, que más adelante se va a explicar. Pero, si la forma es un conjunto de puntos con cierta configuración tridimensional, ¿por qué la naturaleza no utiliza sólo líneas rectas si es un modo directo de construir? La respuesta es que la naturaleza no siempre necesita lo mismo, otras veces necesita soportar, abarcar, minimizar, y otras funciones más, lo que va adicionándole más requerimientos a la forma.

En la figura 78 se pueden ver varias aplicaciones del segmento recto en la naturaleza. La utilización no es siempre referida a una configuración geométrica literal, sino también a directrices que participan en la generación de la forma. Es decir, las aplicaciones naturales pueden tener un contorno que se

aleje de la abstracción que se hace comúnmente de línea recta, pero han utilizado el segmento rectilíneo como eje de construcción formal, permitiendo cumplir con la cualidad básica antes mencionada.

Las espinas de la palma Macana de la figura 78a, las cuales están trasladadas en un eje curvo ascendente, tienen esa función: aislar de una manera directa al intruso o depredador del tronco; no es solamente la punta la que está trabajando porque si fuera así, la naturaleza hubiera seleccionado unas pequeñas espinas, en cambio eligió unas largas líneas rectas que perforan, pero que están impidiendo que se acerque el animal que le pueda causar daño.

En la figura 78b se encuentran los segmentos rectos con una simetría radial. Este tipo de configuración que se puede llamar en explosión se caracteriza, como bien dice el biólogo Peter Stevens en su libro *Patrones y pautas en la naturaleza*, por presentar líneas rectas que unen directamente el centro con los distintos puntos que se encuentran en la periferia, de manera que la densidad de las líneas disminuya a la medida que se alejan del origen (en el ejemplo, la densidad no disminuye en forma relevante porque las líneas no se alejan demasiado del centro de gravedad). Dichas estructuras en explosión, tanto la tridimensional de la figura 78b como la bidimensional de la figura 78c, que posee las líneas rectas como directrices, constituyen una configuración eficaz en el sentido de que es directa pero poco eficiente en cuanto a minimizar la longitud total del recorrido. Para disminuir esos recorridos utilizando líneas rectas, la naturaleza elige estructuras ramificadas, como la de la figura 78d.

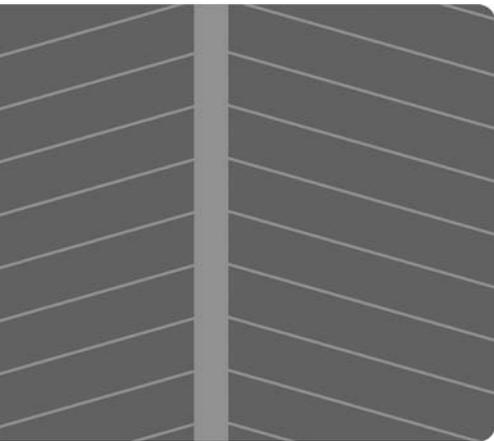


Fig. 79. Líneas rectas en traslación

Si un sistema o forma cualquiera se debe distribuir uniformemente en el espacio ha de abrirse hacia la periferia; una de las maneras, como ya se vio, es por medio de explosión, pero otro procedimiento mucho más eficiente es el de ramificación, ya que en una red ramificada la apertura que tiene que hacer la materia se desarrolla a partir de una multitud de trayectorias menores que, por un lado disminuyen el material, y por el otro reducen el tiempo y el recorrido que deben realizar los nutrientes para llegar a todas las partes de la planta. Ese ahorro se debe a la utilización de vértices de tercer orden y sus respectivos ángulos, los cuales son propios de sistemas que necesitan darle solución al problema de abarcar espacio y disminuir material y tiempo de procesamiento. De igual forma, como se puede observar en la figura 78d, el sistema debe disminuir densidad en la medida en que se aleja del centro geométrico, en este caso no la disminuye en cada línea tomada particularmente sino reduciendo los segmentos de recta (utilizando un patrón de dilatación) a medida que se repiten; si fuera al contrario, el sistema, la planta o la hoja, colapsarían debido a que se empezaría a acumular mucho peso lejos del centro de gravedad.

En la figura 79 se ve otro ejemplo de ramificación; hay uniones de tercer orden pero la distribución no es tan eficiente como la de la figura 78d. Las líneas son segmentos rectos perfectos con una simetría de traslación y de espejo que inmediatamente se interpretan como una hoja que puede ser de palma; la mente hace una abstracción rápida de la forma pero que si se mira bien una hoja de palma real, su morfología se aleja bastante del gráfico presentado.

Es importante aclarar que la naturaleza utiliza líneas, polígonos y poliedros para construir, pero no lo hace de la manera como construye el ser humano, ni mucho menos del modo como se pueden representar metafísicamente estas geometrías. La naturaleza hace uso de estas configuraciones más por necesidad que por obligación, y en esa búsqueda de soluciones o en la selección de formas aptas, encuentra unos patrones que guían, pero que de manera singular se pueden construir en cada planta de manera independiente; no todas las palmas están bajo las mismas condiciones climáticas, reciben los mismos nutrientes o están a la misma altura. En fin, las condiciones que le impone el exterior configuran la irregularidad propia y a la vez bella, que se le atribuye a la formalización natural.

Polígonos

En la figura 80a se pueden ver varias aplicaciones de polígonos ejemplificados en flores, las cuales se han estudiado morfológicamente a profundidad en diferentes investigaciones y se ha encontrado que la forma geométrica que más predomina como configuración que propone ejes constructivos o de contorno es la pentámera. El pentágono como se vio en las características del dodecaedro, es una figura asociada a la perfección divina por poseer la proporción áurea en su construcción al igual que otras formas y sistemas biológicos; llevándolo a ser nombrado por muchos como la quintaesencia de la vida, lo más puro y fundamental de donde todo fue creado.

Y tampoco están tan equivocados. Las formas vivas crecen desde el interior, desde el órgano reproductor que normalmente coincide con el centro. Si se coge un pedazo de arcilla plano y se empieza a presionar solamente en el centro sin moldear, solamente imitando el crecimiento desde el interior, la arcilla empieza a tomar una forma sinclástica. Si se repite la operación, pero ahora presionando en diferentes partes a la vez, la forma crece en un plano, y si se hace un último experimento para presionar la forma no en el centro ni en toda su superficie, sino solamente en la periferia, se genera una figura anticlástica (ver figura 81). Todo esto porque los tres resultados tienen una analogía directa con la geometría.

Si se cogen seis triángulos equiláteros y se unen compartiendo vértice, se configura un hexágono, el cual como ya se sabe puede formar fácilmente redes bidimensionales

planas; pero si le quitamos uno de los triángulos, inmediatamente configura una superficie sinclástica, como el cuenco construido con triángulos de la figura 68. El hexágono tenía un centro que era un punto y seis lados; al quitarle un triángulo quedó una pirámide pentagonal cuyo centro es el mismo punto, pero cuya periferia disminuyó. Se podría decir que tanto en la arcilla como en la figura formada por triángulos, el centro creció más rápido que la periferia. Por otro lado, si se le agrega un triángulo más al hexágono, éste toma la forma de una superficie anticlástica; ahora, debido al efecto contrario, el centro siguió siendo un punto pero la periferia aumentó al adicionarle otro triángulo (ver figura 68).



Fig. 80. Polígonos en la naturaleza

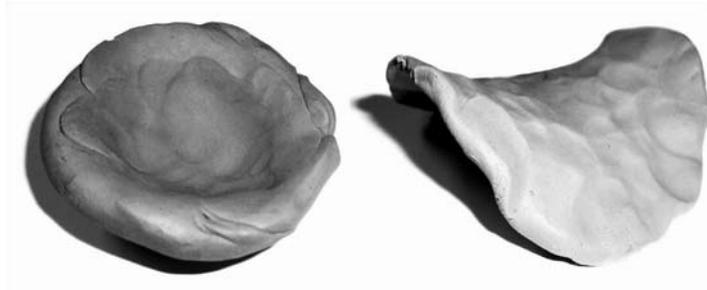


Fig. 81. Superficies sinclástica y anticlástica de arcilla

Este concepto de crecimiento desde el interior y desde la periferia, y el ejercicio geométrico de construcción con triángulos que le es equivalente, fue el fundamento de la construcción de sólidos y monoedros irregulares del modelo de búsqueda geométrica propuesto, en el cual se comprueba la siguiente regla: si el centro y la periferia crecen a la misma velocidad, el material se desarrolla en un solo plano; si el centro crece más rápido que la periferia, el material se curva, hasta adoptar una forma sinclástica, y si se realiza el crecimiento inverso, adopta una forma anticlástica.

El hexágono también está presente en los sistemas vivos, pero con relación al pentágono termina ganando con mucha ventaja este último. Lo que no resulta en un juego de poderes, ya que el hexágono gana la batalla cuando el juez es la selección fundamental: en el reino mineral el polígono de seis lados es el que prevalece. Así, se observa <<que los cristales, que son conjuntos de moléculas cuya estructura se repite, nunca presentan caras de cinco lados. De hecho, ninguna forma inanimada muestra simetría pentagonal, y, por ejemplo, jamás ha caído del cielo ningún copo de nieve en el que la estructura de sus cristales de hielo tuviera dicha disposición. Sólo las formas animadas, complejas y cuyas estructuras constituyen algo más que un simple apilamiento de moléculas idénticas, ofrecen morfologías pentámeras>>¹⁸.

El hexágono es el polígono que presenta más área con menos periferia, es decir, es mas óptima la relación de área periferia en comparación con otros polígonos. Esto hace que sea eficiente ocupando el espacio bidimensional, por ese mismo apilamiento de moléculas que obedece simplemente a la acción de la fuerzas actuando sobre la materia. Una forma de ejemplificar éste hecho, es simplemente observar y analizar la composición de un panal de abejas (ver figura 80b); las abejas no saben construir hexágonos, ellas solamente vierten el volumen que transportan de miel, uno sobre otro, esto conlleva a la configuración de cilindros que van aumentando en periferia, al no tener el cilindro o la sección circular para donde crecer, se van estrechando y deformando, hasta lograr organizarse formando ángulos de 120°, en otras palabras en secciones hexagonales.

18. STEVENS, Op. Cit. Pág. 14.

Ya el matemático Fejes Toth había demostrado que la red hexagonal es la forma más eficaz de agrupar círculos idénticos, porque es el sistema que permite situar la mayor cantidad de círculos en el menor espacio. En la figura 80c, se puede apreciar nuevamente este concepto, un tallo de un filodendro y una serie de figuras circulares que señalan los puntos donde se encontraban los peciolo ya desprendidos. Los puntos oscuros centrales indican el punto tubular de donde crecieron los peciolo, cuyo crecimiento fue limitado por el crecimiento de los otros peciolo, resultando otra vez en una agrupación hexagonal ya no totalmente plana, sino cilíndrica, porque es el cilindro la forma en que esta conformado el tallo del filodendro.

Si se observan los tipos de vértices que tienen las redes hexagonales se advierte que son de tercer orden, el mismo tipo de vértice utilizado por las ramificaciones. En la figura 80d, se puede ver otro ejemplo más, referente al modo como se organiza geométricamente la piel de un pez: cada escama solapa el punto de intersección de las otras dos, de manera que las aristas se encuentran en vértices de tres.

Asimismo, se pueden hacer múltiples pruebas y ensayos con líquidos, membranas y burbujas de jabón, y se llega al mismo resultado: uniones triples para minimizar (ver figura 82a, espuma en un recipiente con líquido). En este caso, la fuerza que trabaja es de tipo intermolecular, llamada tensión superficial, y es la que le permite a un líquido comportarse como si fuera una delgada película. Esa tensión, por ejemplo, es la que posibilita que un insecto pueda caminar campantemente por la superficie del agua sin ser vencido por la fuerza de la gravedad.

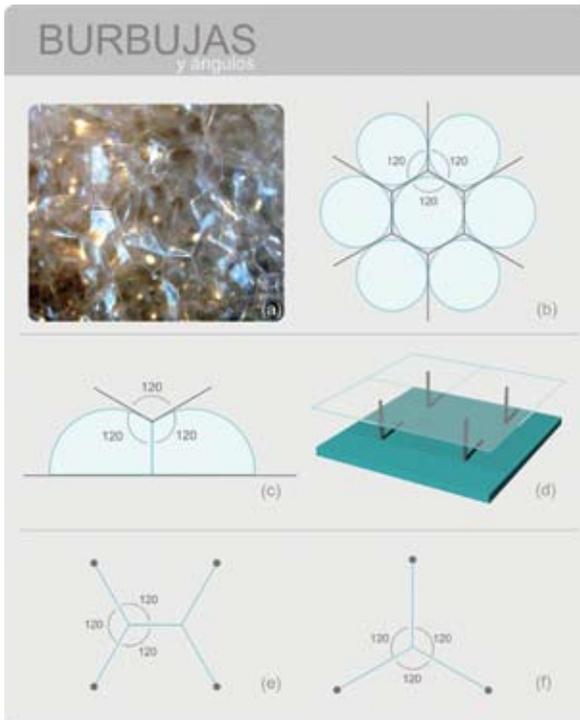


Fig. 82. Diferentes configuraciones de burbujas y películas jabonosas.

El principal efecto de la tensión superficial en los líquidos es la influencia que confiere a la forma para disminuir su superficie. Esto se debe a que los sistemas de la naturaleza, ya sean vivos o inertes, como veremos más adelante, tienden a ahorrar energía. Y en las burbujas o en las membranas de jabón las moléculas que están en la superficie requieren mayor energía que las que están en el interior, por tanto, el sistema debe ubicar la menor cantidad de moléculas en dicha área, hasta disminuirla lo máximo posible.

En la figura 82 se pueden ver diferentes construcciones a partir de membranas jabonosas. La primera construcción que se encuentra en la figura 82b, es una vista superior de un grupo de burbujas, en donde la tensión superficial ocasiona que cuando se van juntando se agrupan en un sistema espumoso, que al igual que el panal de abejas, es una red hexagonal con sus respectivos ángulos de 120° . La única diferencia es que dependiendo del volumen de aire que haya ingresado a cada burbuja, el tipo de fuerza que se les aplique para juntarlas y otros factores más, la red es más o menos irregular (ver figura 82a). La figura 82c representa dos burbujas con el mismo volumen de aire vistas frontalmente, que al unirse, el perímetro y la superficie se configura de tal manera que la intersección conforme también un ángulo 120° . Las figuras 82e y 82f, son ensayos con líquido jabonoso, en donde se introducen unas estructuras compuestas por una base plana de madera, unos pines o varillas que se configuran en los vértices de un cuadrado y un triángulo, y un vidrio en la parte superior (ver figura 82d). Al extraer las estructuras, las membranas jabonosas se organizan de la manera como se muestra en las figuras: en la composición cuadrada las películas se ubican con vértices de tercer orden formando ángulos de 120° , que contrario a lo que se pueda pensar, es el ordenamiento mediante el cual se pueden unir esos cuatro puntos con la menor longitud, no en cruz, y no con el perímetro de un cuadrado. Y en la composición triangular, se organiza de la misma manera, utilizando el vértice de un hexágono regular. La naturaleza no utiliza pues el ángulo de 120° <<...dominada por una misteriosa pasión que la impulse a crear vértices tri- radiales, sino debido a que tres rectas son los elementos mínimos que pueden ser unidos en un solo punto>>. ¹⁹

En resumen, la aparición de los polígonos en las formas naturales corresponde en la mayoría de los casos, a respuestas de situaciones en donde los sistemas naturales los necesiten o en sistemas inertes por las fuerzas y potenciales físicos internos y externos. En la figura 80e, por ejemplo, se puede ver una red oblicua de cuadrados, que en primer lugar es cuadrada porque el cuadrado puede ocupar eficazmente el espacio plano; en este caso la forma no es totalmente plana pero presenta una sola curvatura; y en segundo lugar, se inclina para dar lugar a un espiral ascendente que permite que todas las pequeñas protuberancias reciban el sol.

19. STEVENS, Op. Cit. Pág.176.

Poliedros

Por la misma condición antes expuesta de irregularidad, es considerablemente difícil encontrar ejemplos claros de poliedros regulares exactos aplicados por la naturaleza viva. En la mayoría de los casos en que se encuentra este tipo de poliedros, tiene polígonos pentagonales dentro de su configuración. Uno de ellos, que se puede ver en la figura 83a, ilustrado por Ernst Haeckel, es el exoesqueleto de un radiolario, un pequeño ser unicelular que habita el fondo marino formado por pentágonos rodeados por hexágonos, los cuales enseñan de manera precisa un icosaedro truncado.

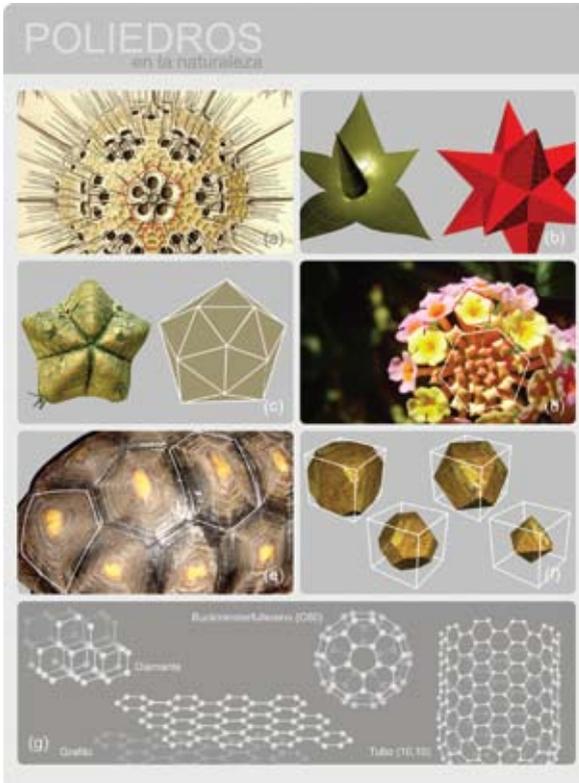


Fig. 83. Poliedros en la naturaleza.

En los poliedros también se ve la relación entre la curvatura y el pentágono como consecuencia del crecimiento desde el interior. En la figura 83b se puede apreciar una penca, que igual que las flores, posee su aparato reproductor femenino (gineceo) en el centro, y es desde allí donde se replica su forma; el centro crece más rápido porque es desde allí donde sale la materia, proporcionando las formas pentámeras y además curvas. El pentágono está representado en este prototipo en particular como un dodecaedro estelado (cuerpo de 12 polígonos pentagonales, cuyas caras están proyectadas en pirámides), que no se encuentra cerrado totalmente en la planta, sino que posee la composición constructiva básica del cuerpo geométrico. Este mismo sólido se halla representado de igual forma en el cactus de la figura 83c, sólo que en el dodecaedro que se inscribe no está proyectada la estelación en la misma proporción.

La composición de los poliedros de Arquímedes también se pueden observar con cierta regularidad en la naturaleza. La flor de la figura 83d, y el caparazón de la tortuga de la figura 83e demuestran claramente que la naturaleza utiliza los principios más que las formas; eso quiere decir que si bien los poliedros pueden estar presentes en la construcción natural, están más presentes aun las características que poseen y permiten la formalización. En las imágenes se ve la presencia de pentágonos pero surgen más para generar la curvatura que

para producir dodecaedros o icosaedros truncados, y los hexágonos se observan abriendo la forma, por tanto ambos trabajan solidariamente en busca de cumplir la necesidad específica que la naturaleza requiere suplir. Por ejemplo, la flor necesita configurarse de tal manera que reciba luz desde diferentes direcciones; ¿cómo hacerlo? Configurándose esféricamente, y como la composición del icosaedro truncado (pentágonos que se unen con hexágonos para construir un cuerpo cerrado) tiene el principio que posibilita dicha estructura, la naturaleza selecciona esas características geométricas para aplicarlas en la flor: un hexágono en el centro y pentágonos rodeándolo (es muy posible que se repita ese ordenamiento en toda la forma). Y en el caparazón se tiene una red de hexágonos que va creciendo hasta que la superficie necesita empezar a curverse para proteger a la tortuga, y esto lo hace utilizando pentágonos.

Por otro lado, en el mundo mineral, tanto la forma o la estructura de los poliedros platónicos, como de los arquimédicos, son a menudo escogidas por la naturaleza para construir. El profesor de mineralogía, Abraham Werner, desarrolló un sistema de reconocimiento de minerales a partir de sus características externas. Werner clasificó las formas en primarias y complejas; las primarias eran el cubo, el icosaedro, el dodecaedro, el prisma, la pirámide, la mesa y el lente; y las complejas eran las obtenidas por el truncamiento de las formas primarias. Werner advirtió, por ejemplo, que las formas posibles de un cristal de galena, corresponden al cubo y a sus diferentes truncamientos: cubo truncado, cuboctaedro, octaedro truncado y octaedro (ver figura 83f).

También en el mundo microscópico aparecen los poliedros, sólo que allí se encuentran con mayor regularidad: la molécula de metano es un tetraedro, el virus del herpes es una estructura poliedral de alta frecuencia, el virus de polio es un icosaedro, el virus denominado con las siglas CCMV (Cowpea Chlorotic Mottle Virus) es un icosaedro truncado. Este último sólido se encuentra también representado en el descubrimiento de una nueva forma de carbono (C₆₀) que hicieron los investigadores H. W. Kroto, R. E. Smalley y R. F. Curl, en 1985, cuando realizaban estudios sobre la composición química de las estrellas, y que nombraron como Buckminsterfullereno, en honor a Buckminster Fuller, el famoso arquitecto que popularizó las cúpulas geodésicas (ver figura 74): es una molécula que tiene 60 átomos de carbono, colocados en los vértices del icosaedro truncado, el cual además de ser extremadamente estable fue el que tomó como referencia Fuller para el desarrollo de sus cubiertas geodésicas. Este descubrimiento inició una rama de la química que se encarga solamente de estudiar los fullerenos, sistemas que se organizan de forma poliédrica (ver figura 83g).

Círculo

Luego de ahondar en la descripción del funcionamiento de las geometrías rectas en la naturaleza, resulta pertinente y necesario hablar de las morfologías con las cuales se relaciona más directamente a la naturaleza; estas son las formas que basan su construcción en las geometrías curvas. La base elemental de este tipo de configuraciones es el círculo, el cual ha sido nombrado desde la Antigüedad como la figura geométrica perfecta; matemáticamente se puede describir como un polígono de lados infinitos, que constituye el conjunto de todos los puntos de un plano bidimensional localizados a la misma distancia de un punto fijo llamado centro.

En la naturaleza aparece cuando la forma necesita suplir la necesidad de abarcar la mayor superficie con el mínimo material; al ser la circunferencia una figura que proporciona la menor periferia abarcando la mayor área, puede satisfacer este requisito eficientemente. Para ello, la materia que está inserta en la forma viva, debe estar en condiciones de una particular isotropía en el plano en el cual va a crecer. En la figura 84a se puede ver una flor que corresponde a una morfología en explosión, que como se dijo anteriormente son construcciones que crecen desde un centro, el cual proporciona ese punto fijo desde donde todos los pétalos se van a alejar a una misma distancia. El contorno generado por los pétalos es entonces un círculo que puede explicar gráficamente la definición matemática de la circunferencia.

Tanto esa flor como las hojas de la figura 84b, necesitan recibir la mayor cantidad de luz para poder realizar la fotosíntesis, y eso lo logran conformándose de la manera más eficiente posible: en circunferencias que captan la energía lumínica utilizando la menor cantidad de materia, y abarcando la mayor área.

La forma inerte no tiene necesidades particulares diferentes a las planteadas en capítulos anteriores, pero cuando en ella se presentan los círculos, éstos cumplen a cabalidad con la condición de isotropía, es más, por simple lógica se puede deducir que si no hay cierto equilibrio y homogeneidad es muy difícil que la circunferencia emerja. Por ejemplo, se puede observar la conformación que adquiere un líquido en quietud al ser desestabilizado por una gota que cae perpendicularmente a su superficie. En el primer momento de la caída, la gota hunde la superficie generando un círculo alrededor del centro del impacto con salpicaduras en su periferia, esa circunferencia se empieza a desplazar y a medida que se traslada va aumentando su diámetro. En el mismo instante que la onda empieza el desplazamiento, el centro que fue hundido con el impacto, por la acción de la flexibilidad de la tensión superficial y en un intento por estabilizarse, regresa con la fuerza un poco disipada y genera nuevamente otra circunferencia que a su vez comienza a moverse creciendo el diámetro; y así sucesivamente hasta que la fuerza del impacto se elimine totalmente, generando una multitud de ondas que fueron el efecto de una simple gota cayendo sobre un líquido (ver figura 84c).

Esos círculos que se transforman mediante un patrón de dilatación se ven también representados en los anillos de crecimiento de los árboles, los cuales son la evidencia de que la planta ha crecido por capas de adentro hacia fuera a través de los años (ver figura 84d).



Fig. 84. Círculos y secciones de circunferencia en la naturaleza.

Secciones de círculo, ondas y formas sinuosas

El círculo está presente con cierta regularidad en la naturaleza, tanto en la figura geométrica completa como en sus secciones que construyen otras morfologías. En la figura 84e, por ejemplo, se ve el crecimiento de las ramas de un árbol; a primera vista es una línea orgánica desordenada y fluctuante, resultado del capricho de la naturaleza. Pero observando con mayor detalle se ve que describe una onda, que no es más que secciones de círculo trasladándose, dilatándose, que logran conformarse en un solo sistema morfológico, en donde se puede apreciar que el movimiento generado por la materia mientras el árbol crece, ha sido irregular; unas veces más rápido en unos lugares que en otros, lo que ha hecho tal y como pasa con la arcilla moldeada por la presión: la forma que en primera instancia podría ser recta, adopta una configuración curva en forma de onda.

Cuando ese crecimiento diferencial logra aparecer fluctuante pero de manera periódica, sin tanta irregularidad, surge un serpenteo (ejemplo de la hoja en la figura 84f), resultado del tipo de crecimiento que seleccionó nuevamente la naturaleza para generar ondas, pero que en este caso cumple una función particular de vital importancia para la supervivencia de la planta; ese serpenteo en la periferia de la hoja modifica también la superficie, curvándola y dotándola de estructura y estabilidad que le permite permanecer erguida para recibir los rayos solares. Esa configuración ondulada resulta de las propiedades elásticas y geométricas de la delgada membrana de la hoja, que al crecer más rápido su periferia que su centro, el material debe buscar el espacio para acomodarse, resultando en la ondulación.

Este elemento de presiones y crecimientos diferenciales se puede ver también en el desplazamiento de una serpiente. Sus músculos se contraen y se relajan en ciclos a lo largo de cada uno de los costados del animal. Esas contracciones y extensiones hacen que la serpiente ondule de un lado a otro, y de la misma manera que la onda de agua, y los anillos de crecimiento del árbol eran evidencia del movimiento, el cuerpo del animal traza ondas en el suelo que demuestran su paso sinuoso.

Como a la naturaleza sólo le gusta trabajar con máximos y mínimos, la forma sinuosa construida a partir de segmentos de círculo vuelve a aparecer cuando esa morfología que crece irregularmente necesita ocupar todo el espacio posible, como el serpenteo del cactus de la figura 84g, que al verse condicionado también por recibir la mayor cantidad de luz, las formas aleatorias giran, se curvan, cambian suavemente de dirección y vuelven sobre sí para ocupar también el espacio que las rodea. Esta configuración que podríamos llamar cerebriforme, se organiza de tal manera porque las líneas sinuosas que van creciendo y se van transformando, se agrupan de manera compacta por efecto de la acción de esas fuerzas contrapuestas.

Óvalos y elipses

En la figura 85 se puede observar la variedad de morfologías que ofrecen las algas unicelulares microscópicas silíceas llamadas diatomeas, que estructuralmente están conformadas como un prisma o extrusión de la cara superior. Las más comunes se asocian, como se puede advertir en la ilustración de Ernest Haeckel, con geometría circular o triangular (centrales), y otras con forma alargada (pennales) en donde se reconocen formas singulares como óvalos y elipses. En condiciones de homogeneidad y buscando solucionar problemas de eficiencia, aparece el círculo, pero con ligeras irregularidades que pueden ser discontinuidades en el crecimiento o el movimiento de la configuración global; empiezan a aparecer óvalos y elipses. La regularidad de su aparición en la naturaleza, está muy condicionada a las influencias que el exterior puede efectuar dentro de la forma; cualquier ligero cambio en la disposición celular de un ser vivo podría ocasionar fácilmente que esa forma, inicialmente circular, cambie para estabilizarse y seguir viviendo, y el resultado, en muchos casos, corresponde a este tipo de morfologías curvas, cerradas, naturales y matemáticas.

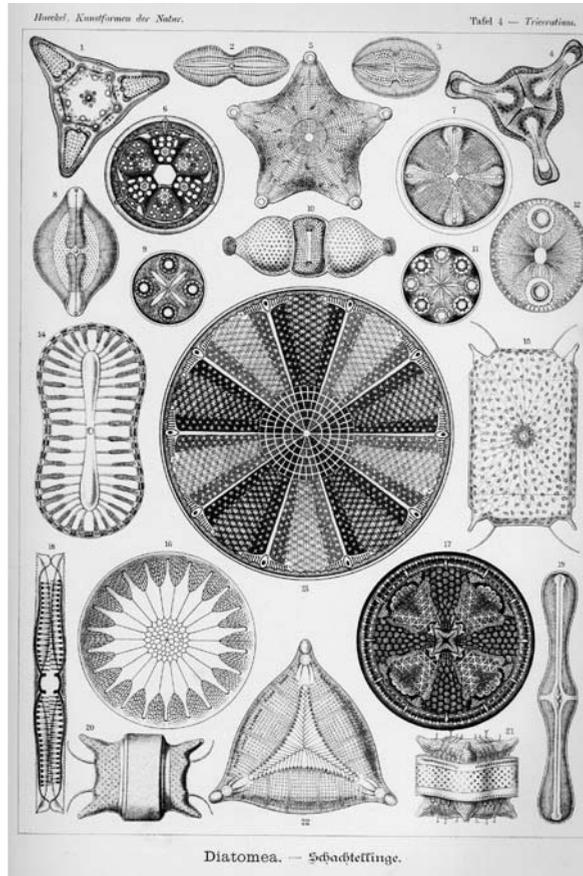


Fig. 85. Diatomea. Haeckel, Ernst. Kunstformen der Natur (1899).

Espirales

Una espiral es una curva que, comenzando desde un punto de origen, reduce su curvatura a medida que se aleja de ese punto; esto quiere decir que el radio al alejarse del origen crece continuamente. Matemáticamente se puede hablar de dos tipos de espirales. Primero se tiene la espiral de Arquímedes, la cual presenta una distancia constante a medida que crece, y segundo está la espiral logarítmica (descrita por Descartes), cuyo crecimiento aumenta exponencialmente la separación entre sus partes (ver figura 86a). Ambas están presentes en la construcción natural, dependiendo del tipo de crecimiento que le dio paso a su generación, que a su vez es la consecuencia de la selección natural propuesta por Charles Darwin.

Las fuerzas diferenciales causantes de las ondas son también las autoras de este tipo de morfologías. Por un lado, las espirales de Arquímedes se presentan cuando hay un crecimiento diferencial, pero la distancia entre sus radios está supeditada al grosor de su configuración, que resulta particularmente difícil encontrarlo en la naturaleza también regular; pero se puede ilustrar de forma más evidente en la manera como un marinero enrolla una cuerda; como la cuerda tiene un grueso homogéneo, en todos los giros de la espiral cada vuelta conserva el mismo ancho. Por tal motivo, la regularidad necesaria para que aparezca la espiral de Arquímedes en el crecimiento natural, necesariamente se relaciona con las proporciones de las plantas, adicionándole además la necesidad de cumplir una función específica (relacionada más adelante en este texto). Por otro lado, este tipo de geometría aparece cuando existe una condición de la que no se ha hablado por el momento, y es el decrecimiento, en este caso de las plantas. Las hojas por ejemplo, como la de la figura 86b, a medida que pierden líquido y empiezan a morir generan ondas y espirales; esto se debe a que la pérdida de líquido por depender de tantos factores no es constante y uniforme en toda la superficie de la hoja, por tal motivo hay una diferencia de fuerzas pero ya no de crecimiento sino de decrecimiento. La hoja se empieza a ondular, arrugar y enroscarse sobre sí misma, creando muchas veces espirales de Arquímedes.

La espiral logarítmica presenta crecimiento diferencial regular entre sus partes, pero a diferencia de la de Arquímedes, ocasiona una progresión geométrica por efecto del tipo de crecimiento exponencial. En otras palabras, como se puede ver en la figura 86a, el radio de la espiral va aumentando a medida que se aleja del origen. Cada segmento de círculo es semejante a los demás y está inscrito en cuadrados que van aumentando su longitud en proporción áurea. D'arcy Thompson clasifica las espirales logarítmicas o equiangulares como una clase particular de conformaciones, ya que no crecen como crecen los demás seres vivos. Por ejemplo, en un insecto cualquiera —menciona Thompson—, no podríamos diferenciar que parte es más vieja que otra, porque a medida que crece todas las partes se funden unas con otras, todas trabajando continuamente y moldeando la configuración global. Pero en el cuerno o en la concha de caracol, que valga precisar son espirales logarítmicas, es diferente; <<pues en estos, la estructura actualmente existente es, por decirlo de alguna manera, parcialmente vieja y parcialmente nueva. Se ha formado por incrementos sucesivos; y cada estadio sucesivo de crecimiento, comenzando desde el origen, permanece como una parte integral e invariable de la estructura en crecimiento>>. ²⁰

Esos incrementos sucesivos se deben, por ejemplo en la concha del fósil del caracol de la figura 86c, o el cuerno del chivo de la figura 86d (este cuerno es una sección de espiral pero también los hay de alto grado de espiralización), a que ese material adicionado no está vivo en ningún sentido; es en realidad un subproducto del animal, su crecimiento como todo lo inerte se debe a las partículas que hay alrededor, sólo que en este caso esas partículas son células vivas subyacentes, que crecen como se construye un edificio, por el depósito de material que se va acumulando.

20. THOMPSON, Op. Cit. Pág. 173.

De manera similar se disponen de forma espiral la hojas de la flor de sanjacinto de la figura 86e. Todas sus partes están vivas y dichas configuraciones locales se están adicionando a una configuración global mayor. Esas configuraciones locales, que son la hojas, son semejantes, difieren en edad, y por tanto en dimensión, ya que hay unas que han podido crecer más que otras; se disponen igual que las escamas de las piñas, los frutos de los pinos y las tortas del girasol, en dos tipos de espirales que difieren en dirección y en frecuencia; un tipo se llama dextrógira y la otra levógira. Las espirales dextrógiras giran en sentido de las manecillas del reloj y las levógiras en el sentido contrario. Lo curioso es que no están repartidas con la misma frecuencia en la construcción natural; las levógiras son especialmente excepcionales: la naturaleza cuando estaba diseñando las espirales –explica Wagensberg–, tiro una moneda al aire, y privilegió al lado derecho. Hasta ahora dicha selección sólo ha podido ser explicada por el azar.

Las espirales del helecho de la figura 86f, presentan una función particular de proteger lo que están guardando. Así como el marinero enrolla la cuerda, la naturaleza enrolla estos tallos, cuyo grosor modifica las longitudes entre los giros de la curva, formando una espiral logarítmica que empaqueta bien las diferentes configuraciones locales de cara a la radiación solar. Esta solución se presentó porque la planta necesitaba crecer ahorrando espacio, y qué mejor forma que una espiral. Espiral (de Arquímedes y logarítmica) utilizada innumerables veces por el hombre para ese propósito; sólo basta pensar en la cinta adhesiva, las cintas de video, el papel aluminio o el papel higiénico; todas son soluciones que permiten guardar sin ocupar mucho espacio.

En las formas vivas y en sus subproductos hay espirales, pero el mundo de las formas inertes donde gobiernan las fuerzas fundamentales, ocupa por el momento el primer lugar en cuanto a tamaño. Las galaxias, las formas en espiral más grandes por siempre encontradas, emergen por mecanismos muy diferentes de los que se han nombrado. Son agrupaciones de millones de estrellas que están siendo influenciadas por el fenómeno más relevante de la construcción del cosmos: la fuerza gravitatoria. Su forma es un complejo problema que aún no se comprende completamente, pero básicamente se debe a que las estrellas más cercanas al centro giran más rápido que las que están en la periferia, presentando igual una acción diferencial.

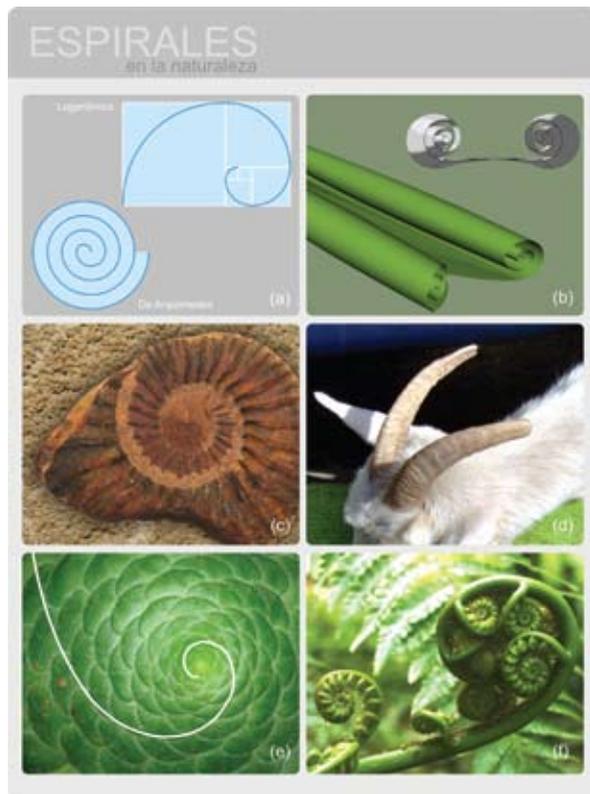


Fig. 86. Espirales básicas en la naturaleza

Segmentos de espiral

Igual que el círculo, las morfologías en espiral se pueden dividir en espirales completas o espirales incipientes o con baja espiralización. En la figura 87 se pueden ver dos casos pertenecientes a dos reinos diferentes. La figura 87a es el pico de una guacamaya, al cual la selección natural lo ha dotado de esa forma curva y en punta, que le permite defenderse y alimentarse. Si



Fig. 87. Segmentos de espiral en la naturaleza.

por algún motivo el medio le obligara a cumplir la función de guardar, sólo tendría que seguir creciendo ya que el pico es en realidad un segmento de una espiral logarítmica que ha suspendido su crecimiento.

La función empaquetadora, en cambio, sí se ve en la flor de la figura 87b. A la cual se le puede ver todo el desarrollo de su apertura. Las secciones de espiral rotando sobre el eje son las aristas por donde la superficie está plegada. Esto logra que dicha arista se comporte como una

bisagra, y solidarizándose con las espirales permiten que toda la configuración de la flor se pueda guardar mediante rotaciones, imitando el proceso de construcción de las galaxias.

Espirales tridimensionales

La definición de espiral que se dio anteriormente incluye diferentes curvas, pero excluye una que se confunde comúnmente con una verdadera espiral. Esta es la espiral tridimensional o la hélice, que si bien estéticamente es muy similar a una espiral básica, no cambia necesariamente su curvatura en su avance. Como las formas ocasionadas por los grandes fenómenos hidrodinámicos, por ejemplo, tornados y huracanes, que son hélices que se proyectan imaginariamente sobre un plano bidimensional como espirales.

En la naturaleza, las espirales tridimensionales cumplen dos funciones básicas, una referente a la composición y disposición de las configuraciones locales en la configuración global, y otra concerniente a la habilidad que posee la hélice de agarrar. El ejemplo del marinero enrollando una cuerda es una demostración de esta cualidad. Aunque se nombró como espiral, es, siguiendo estrictamente la definición matemática, una hélice; es más, una hélice de hélices. Los filamentos están entorchados en hélices para formar hilos, los hilos se enrollan para formar la cuerda y la cuerda se enrolla en un mástil para soportar alguna carga. Toda esta conjunción de hélices logra aumentar la resistencia a la tracción de la cuerda debido a que intensifican la fricción de las partes entre sí.

La espiral empaqueta la forma consigo misma. La hélice es una buena solución cuando se quiere empaquetar y agarrar una configuración en torno a otra. Y es la llamada ley de Euler la que permite esta situación, que en términos simples se podría describir como el aumento exponencial de la fuerza de fricción de un material enrollado sobre otro a medida que crece el número de vueltas de la hélice. Paradójicamente esa misma fricción es la que hace que el tornado antes mencionado se convierta muchas veces en una simple tormenta.

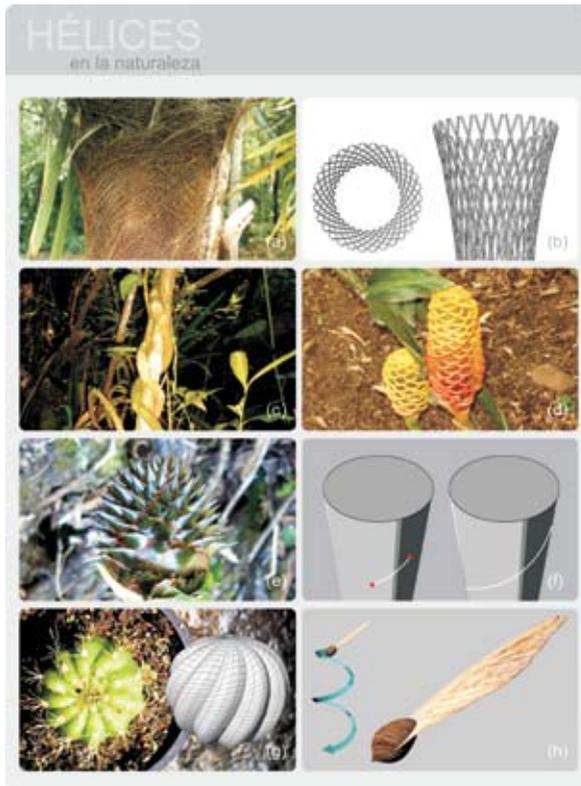


Fig. 88. Hélices en la naturaleza

predecibles del medio ambiente; la edificación luego de ser construida es una forma muerta. Otra aplicación de la hélice como conformación generadora de fricción se puede ver en la figura 88c: un tronco utilizando a uno más rígido y grueso para trepar y mantenerse en una posición donde pueda recibir más fácilmente los rayos del sol.

La otra función de disposición y composición de la hélice se puede observar en las flores de las figuras 88d y 88e, en donde las configuraciones locales que son diferentes en ambas, se están organizando de manera similar a las hojas de la flor de sanjacinto, en dos tipos de hélices que difieren en su dirección. La hélice no está agarrando pero sí está organizando todas las partes de las plantas, primero, en orden de crecimiento y antigüedad, y segundo, disponiéndolas de tal manera que ninguna bloquee los rayos solares, ni el agua lluvia que le pueda llegar a sus hermanas. Esa directriz en hélice que está rígidamente dibujada, pertenece también a otra serie de curvas que le dio el nombre a las cúpulas de Fuller; son curvas geodésicas.

La membrana no tejida de la palma de la figura 88a utiliza fielmente esta herramienta de agarre (ver el esquema de la figura 88b). En primer lugar, esta configuración les permite a todas las fibras continuar unidas; pero una función mucho más importante e interesante, que la describe Thompson, es la de ayudar al tronco mediante la fricción y la tracción de los fibras, a no pandearse y conservarse erguido; cuando el tronco se pandea en una dirección, las fibras del lado contrario se engruesan como respuesta al aumento de las tensiones. Referente a esta cualidad que tiene la naturaleza de adaptarse a estas nuevas situaciones, Stevens crea una brecha que separa mucho a la construcción humana de la natural, mencionando que mientras la naturaleza responde de manera directa a los esfuerzos, sin proyectos ni cálculos matemáticos, el hombre tiene que analizar y diseñar antes de construir, puesto que sus estructuras no cambian luego de ser construidas, y cuando las termina, él desaparece; no es su función realizar modificaciones en respuesta a las influencias siempre cambiantes e im-

La curva geodésica en un cuerpo curvo, es una analogía directa de una línea recta en un plano. La línea es la mínima longitud entre dos puntos que están ubicados en una superficie plana, pero si los dos puntos están ubicados en una superficie con una curvatura o con doble curvatura, el camino más corto es una línea geodésica. Si se observan los cilindros de la figura 88f, en el primero se encuentran dos puntos que están siendo unidos por una línea curva, que en un primer instante parece una curva cualquiera, pero en el segundo cilindro al comenzar a proyectar el recorrido de la línea, se empieza a crear una hélice cilíndrica. En el caso del cactus de la figura 88g, y de las flores antes mencionadas, las líneas geodésicas se constituyen en hélices esferoides.

En general, la existencia de la hélice en la naturaleza no se aparta mucho de la definición matemática; es el rastro de una configuración que posee algún tipo de movimiento y que está condicionada a transformaciones geométricas, traslaciones y rotaciones que permiten su generación. En la figura 88h, por ejemplo, se observa una semilla de arce, que realiza una trayectoria en forma de hélice al caer. La selección natural ha favorecido las morfologías que permiten este tipo de caídas porque la fricción de la semilla en el aire le permite agarrarse al fluido, permanecer mucho más tiempo planeando y así explorar otros territorios para permitir la supervivencia de la especie.

Cuerpos y superficies con una curvatura

Los cuerpos o superficies con una curvatura se pueden clasificar básicamente en cilindros, conos y sus diferentes truncamientos. Para ver los primeros basta mirar las columnas naturales de los troncos de la mayoría de los árboles, los cuales ostentan esa configuración que según Wagensberg es la más cercana a la esfera en condiciones donde la fuerza de gravedad y la búsqueda por la luz rompen la isotropía del entorno. En la figura 89a se puede ver uno de ellos, un tronco muy convencional apto para soportar sus ramas y resistir las cargas que le impone el ambiente. Cuando el árbol necesita crecer más de cierto límite, la selección natural tiene que buscar otra solución que permita crecer sin que se presente pandeo o colapso. Si sigue siendo cilindro, la circunferencia tiene que aumentar considerablemente a lo largo de la columna, lo que significaría más adición de material, y por consiguiente más peso. La naturaleza es ligera, utiliza el mínimo material, por tanto debe estructurar cambiando la morfología, pero no añadiendo más material como lo haría una firma constructora. Tiene entonces dos posibilidades, o se entorcha en hélice sin alejarse de su eje (además internamente las fibras del árbol se organizan helicoidalmente) o disminuye el grosor a medida que crece verticalmente formando una estructura en cono.

Esta segunda solución está más presente de lo que se puede pensar. Las raíces de los árboles, cómo el de la figura 89b, muchas veces cumplen una función estructural a partir de esa morfología, le brindan mayor superficie de apoyo en el lugar donde más lo necesita, aumentando el diámetro donde la base tiene contacto con el suelo. Y en general la mayoría de los árboles (sin tener en cuenta los conos de sus raíces), tienden a disminuir su diámetro a medida que se alejan del suelo, conformándose como conos, o conos truncados.

Los conos cumplen esa función estructural pero también concentran. En la planta (Calathea) de la figura 89c, el cono se presenta para estructurar la hoja que está en crecimiento; si la hoja no tuviera esa curvatura tan pronunciada, en forma de hélice generada por enrollarse sobre sí misma, probablemente no se podría mantener en esa posición, la gravedad la haría flectarse. Pero el mecanismo selectivo natural no solamente elige las morfologías porque son eficaces sino también porque son eficientes. El cono estructura, pero además permite como un embudo que el agua se concentre en la raíz, el principal lugar encargado de absorber líquidos y nutrientes.

El cono concentra materiales, pero también concentra fuerzas. A menor superficie mayor presión, y la presión es la fuerza por unidad de superficie, entonces es en la punta (donde tiene menos superficie) que el cono puede concentrar con mayor intensidad la fuerza. Esa fuerza es entonces, la que hace que el cono se comporte como una aguja, penetrando al menor contacto con otro material. La planta de la figura 89d, fabricó a partir del material superficial, púas duras en forma de cono que le sirven para protegerse de los insectos y demás intrusos que puedan poner en peligro su supervivencia.



Fig. 89. Cuerpos y superficies con una curvatura en la naturaleza.

Dobles curvaturas positivas

Anteriormente se mencionó que el cilindro era el cuerpo más cercano a la esfera en condiciones de ruptura de la isotropía del entorno, por tal motivo cuando la isotropía se mantiene uniforme, emerge la forma que para los pitagóricos era la más perfecta, y por tanto la más cercana a Dios, la esfera. Dentro de los cuerpos de dobles curvaturas positivas, la esfera es pues, la conformación que presenta mayor grado de regularidad, siempre ocasionada por una uniformidad de las fuerzas y las influencias externas. En el mundo inerte, unas pequeñas gotas de rocío sobre una hoja, como las de la figura 90a, son muy poco influenciadas por la fuerza de gravedad ya que su pequeña escala hace que la fuerza que predomine sea la tensión superficial, la cual posibilita que la presión del líquido dentro de la gota sea constante. Se puede ver en la figura, que a medida que las gotas encierran mayor cantidad de agua, el peso del líquido empieza a ser considerado por la fuerza de gravedad, la tensión superficial no puede seguir aguantando el empuje y se vence poco a poco, dejando deformar la esfera. Las burbujas son otra ejemplificación del mismo fenómeno, solo que el fluido interno cambia por gas; la tensión superficial que posee la delgada membrana de líquido no deja salir el aire, haciendo que

la presión empiece a empujar para todas las direcciones, conformando una esfera. Las burbujas tampoco son tan afectadas morfológicamente por la fuerza de gravedad, pero cualquier cambio de la presión externa del ambiente como vientos y corrientes, empiezan a deformar nuevamente a esta forma perfecta (ver figura 90b). En general, la selección fundamental que afecta en mayor medida a los cuerpos inertes permite con una alta probabilidad la generación de simetrías circulares; cuanto más homogéneo es el espacio hay menos restricciones y mayor es la probabilidad de su emergencia. Esa uniformidad depende mucho del tiempo porque, por ejemplo, una piedra de un río ha pasado tanto tiempo rodando y chocando con otras piedras que lo que parecía una morfología irregular se vuelve regular y homogénea; las aristas se empiezan a redondear para dar lugar a una piedra con topología esférica, o si es mucho más vieja puede llegar a ser una esfera casi perfecta.

El principio se repite de una manera similar en las formas de las frutas. Si se observa bien, son muchas las frutas que exhiben esta morfología. Naranja, jaboticaba (En la figura 90c se observa la naranja completa y partida, y la fruta del árbol de jaboticaba), melón, mora, granadilla, uva, presentan una morfología muy cercana a la esfera. Todas ellas crecen desde el interior mediante el hinchamiento de sus células, en las cuales –según Thompson– la tensión superficial ejerce una fuerza considerable en su periferia (otros autores mencionan que no es verdadera tensión superficial, sino que el borde celular ejerce una tensión de membrana, pero igualmente es la que dirige la conformación) generando formas esferoides. Estas células se unen en agregados celulares y conforman vesículas de jugo, como las pequeñas bolsas de la naranja de la figura 90c, que de la misma manera ejercen una presión uniforme en todas las direcciones.

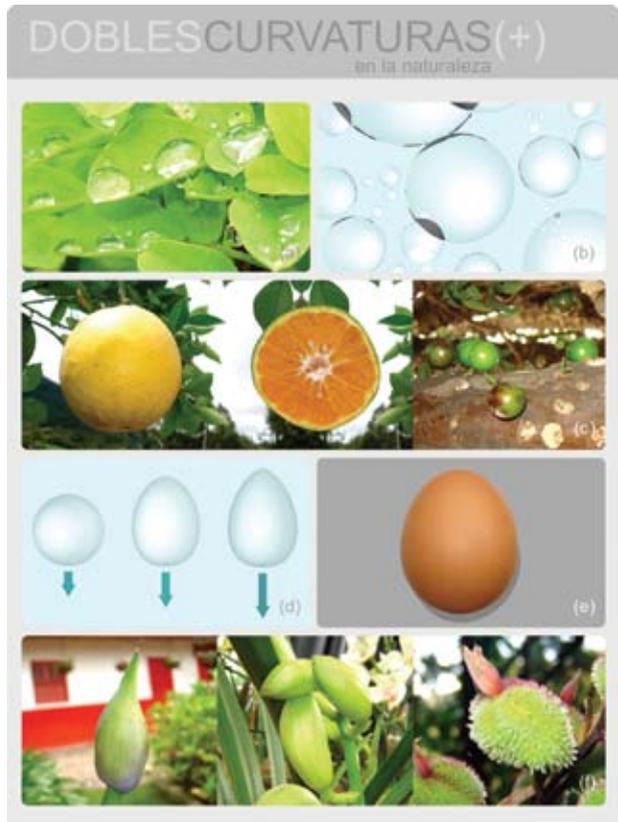


Fig. 90. Dobles curvaturas positivas en la naturaleza.

Pero esa isotropía se puede romper fácilmente y dar paso a morfologías con topología esférica, pero que en su generación han actuado otros agentes u otras funciones. En las figuras 90d y 90e, la variable adicional es el movimiento. Una gota cayendo en picada deforma su configuración por la acción del viento y el empuje de la gravedad (ver figura 90d). Se han hecho estudios para indagar cuál es la morfología que siendo disparada puede viajar más rápidamente, y se ha constatado que evidentemente la forma de gota presenta menos coeficiente de fricción que otro tipo de configuraciones, como puntas, conos y triángulos. Fuller, observando esta característica, diseñó en los años treinta del siglo XX un auto que llamó Dimaxion car, cuya carcasa partía del estudio de esta morfología. Al detallar el resultado, éste se aparta mucho de lo que se puede llamar gota, pero la configuración resultante disminuye de igual manera la fricción ocasionada por el aire. Un huevo también exhibe esta morfología, ya no ocasionada por el aire sino por las fuerzas de las paredes del oviducto de la gallina. El huevo es inicialmente esférico pero a medida que sale es deformado mucho más al final que al comienzo, concluyendo en la forma de huevo (ver figura 90e). Si bien la redondez es una de las soluciones más eficientes para la movilidad, el huevo permite un movimiento, pero un movimiento más controlado. La selección natural ha hecho que la gallina modifique el huevo para que éste no ruede en infinitas direcciones como la esfera, sino solamente perpendicular a su eje de simetría.

Wagensberg, refiriéndose a la esfera, menciona que dicho cuerpo es altamente probable en el mundo inerte pero también en el vivo. En general, todos los animales inician su vida desde esta morfología porque ofrecen dos ventajas considerables, según Wagensberg. Primero, cuando la forma la posee un huevo: la morfología de esfera dificulta ser mordido por un depredador cuyas fauces sean proporcionales al diámetro del huevo. La otra ventaja se refiere a la cualidad que tiene la esfera y las formas esferoides como el huevo de guardar el calor haciendo que la pérdida de temperatura sea más lenta, no sólo para el huevo sino para el animal porque, en la gallina por ejemplo, el huevo es el que calienta a la gallina, no al contrario.

En los capullos de la figura 90f, la forma ovalada también con doble curvatura positiva aparece como solución a otro problema un poco diferente; tiene la función de empaquetar los pétalos o las semillas que aún no han alcanzado su maduración. La configuración global está condicionada entonces a la morfología de las configuraciones locales, y mucho más a la biomecánica de las plantas, que en este caso específico se refiere al modo como los pétalos van a brotar y se van a configurar como flor, o simplemente como la membrana exterior se va a abrir para dejar salir su contenido.

Dobles curvaturas negativas

Dotar de curvatura a una forma es una buena manera de estructurar sin utilizar más material. Las dobles curvaturas positivas tienen intrínseca esa estructuración porque son cuerpos cerrados que se hincharon desde el interior, conteniendo fluidos u otras configuraciones locales. Pero, ¿qué pasa cuando una forma es abierta y no tiene un elemento interno que logre modificarlo y estructurarlo? ¿Qué pasa con las hojas por ejemplo? ¿Se contraen en forma de cuenco? La respuesta pertenece a los asuntos tratados por la geometría. La naturaleza estructura de varias maneras las superficies; una manera óptima

que ha elegido la selección natural es construir sus formas con dobles curvaturas negativas. En este caso en particular, no usa las curvaturas positivas porque la influencia que tiene a la mano no le permite construir fácilmente un cuenco, pero en cambio sí le permite construir este tipo de superficies curvas. Todas las hojas de la figura 91a poseen doble curvatura negativa. Es muy posible que hace millones de años las plantas generaran hojas de superficie plana y estas al crecer empezaran a flectarse por la acción de la gravedad. Para resistir esta fuerza fundamental y hacer permanecer las hojas erectas, la naturaleza adaptó sus plantas para que ya no crecieran completamente planas sino que crecieran con una curvatura que por sí misma es estructural. Pero al empezar a ser haladas por la fuerza de gravedad, se le opuso a esa primera curva en una dirección, otra en sentido contrario, lo que obligó a la hoja que inicialmente era simplemente una sección cilíndrica (una curvatura) a configurarse como una superficie anticlástica (dos curvaturas negativas).



Fig. 91. Dobles curvaturas negativas en la naturaleza.

Si se observa con detenimiento, la mayoría de las hojas poseen esta morfología, unas ayudadas, claro está, por otros factores que más adelante se verán. Son superficies anticlásticas, pero no todas son paraboloides hiperbólicos. La curva que está siendo halada por la gravedad se acerca mucho a una curva parabólica trabajando por compresión, pero no se podría decir que todos los ejes de estas curvas son en realidad parábolas. Por otro lado, la curva opuesta tampoco es una catenaria; sí está trabajando por tracción pero la curva está generada más por la fuerza contraria de la planta que por la fuerza de gravedad (ver el capítulo de la forma geométrica: superficies curvas de traslación). Estructuralmente se acercan más a la configuración de un conoide (ver figura 58) que a la de un paraboloides hiperbólico, pero igual hacen un uso adecuado de la distribución de las cargas.

En la figura 91b, se ven ahora flores con morfologías curvas dobles negativas. Son superficies cónicas que poseen la primera curva a partir de la circunferencia que va decreciendo, pero que en el decrecimiento generan la otra curva porque no es una disminución de longitud que siga unas directrices rectas sino curvas. Es decir, desde una vista superior o de planta se ve una circunferencia, y desde una vista frontal o de fachada se ve un perfil curvo. La función de dicha curvatura negativa es la misma: estructurar una delgada membrana para que la flor pueda mantenerse en pie.

Poliedros irregulares

Infinidad de poliedros y superficies irregulares se generan continuamente en la construcción de la naturaleza. La mayoría de ellos, tanto poliedros como superficies, son combinaciones de las configuraciones geométricas antes mencionadas. Entrar a definir las características de estas formas compuestas tomaría más del tiempo que se quisiera. Pero lo que sí es cierto es que tomando las definiciones y los principios de las formas que se acaban de enunciar (lo cual se hará más adelante) se pueden describir, sintetizar y analizar muchas de las formas posibles y probables que emergen en la construcción natural.

Patrones en la naturaleza

Muchos autores han escrito y expuesto cuáles son las formas que se presentan con mayor regularidad en la naturaleza; todos coinciden en encontrar la labor que hizo Thompson como eje fundamental que permite el entendimiento físico que da explicación a dichas formas. Peter Stevens, Wagensberg, Stewart y Golobitsky han hecho sus propias clasificaciones, todas igual de coherentes y pertinentes, aunque se puede observar particularmente la relevancia que le dan a una u otra forma de acuerdo con apreciaciones personales que muchas veces se alejan un poco de una condición enteramente científica. Tomando las categorías de los autores antes mencionados y de otros más, se propone una nueva clasificación para tipificar las formas que se encuentran con mayor frecuencia dentro de la construcción natural, y que corresponden al ordenamiento geométrico enunciado anteriormente (ver figura 92).

Los criterios de selección fueron entonces, en primer lugar, elegir aquellas formas que se comportaran como patrones, es decir, que su presencia en la naturaleza fuera tan alta y relevante que podrían nombrarse como modelos formales que guían funciones especialmente importantes en dicha construcción y en la construcción cultural. En esa relación de forma y función intervino principalmente el ordenamiento que propone Wagensberg, aunque se excluyeron unos y se incluyeron otros patrones.

Varios de los patrones son más bien grupos de patrones en los cuales todos, exceptuando los fractales y las ramificaciones, tienen un parentesco directo con la simetría radial. El círculo, con su homogeneidad y estabilidad, ha sido el maestro primigenio de dichas formas. Wagensberg menciona la experiencia²¹ que tuvo al intentar recolectar piedras en forma de las letras 'L', 'A', 'F', 'O', 'R', 'M', 'A' para una exposición titulada: "¡Y después fue la forma!", en el museo de la fundación La Caixa, el cual él dirige. La primera letra que encontró el primer día mientras caminaba por la playa fue por supuesto la 'O'; para recolectar todas las otras letras se demoró meses, meses de angustia que sentía por embarcarse en tal aventura. La esfera y las formas esferoides son pues el patrón que tiene más probabilidad de existir tanto en la construcción fundamental como en la natural y en la cultural. Solo basta observar los planetas, las frutas, los balones, los globos y las gotas; la simetría circular ha labrado con gran detalle y cuidado una infinidad de formas. Luego se tiene el hexágono y el pentágono, los polígonos más relevantes en las diferentes tipologías constructivas. La espiral, la hélice, los ángulos, puntos y conos; las ondas y formas sinuosas y serpenteantes; y los fractales, las ramificaciones y las explosiones; a todos se les enuncia la función principal, las funciones secundarias, los mecanismos que permiten su emergencia y una aplicación en la naturaleza, y otra en el mundo cultural, esto último para demostrar que los procesos de selección y de ventaja funcional son prácticamente los mismos en ambos mundos.

21. Anécdota escuchada a Jorge Wagensberg en la conferencia "La emergencia de las formas en la naturaleza", que Medellín tuvo el placer de escuchar en el evento BARCELONA EN MEDELLÍN, organizado por la alcaldía en el 2005.

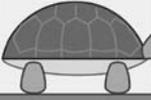
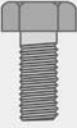
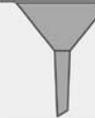
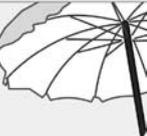
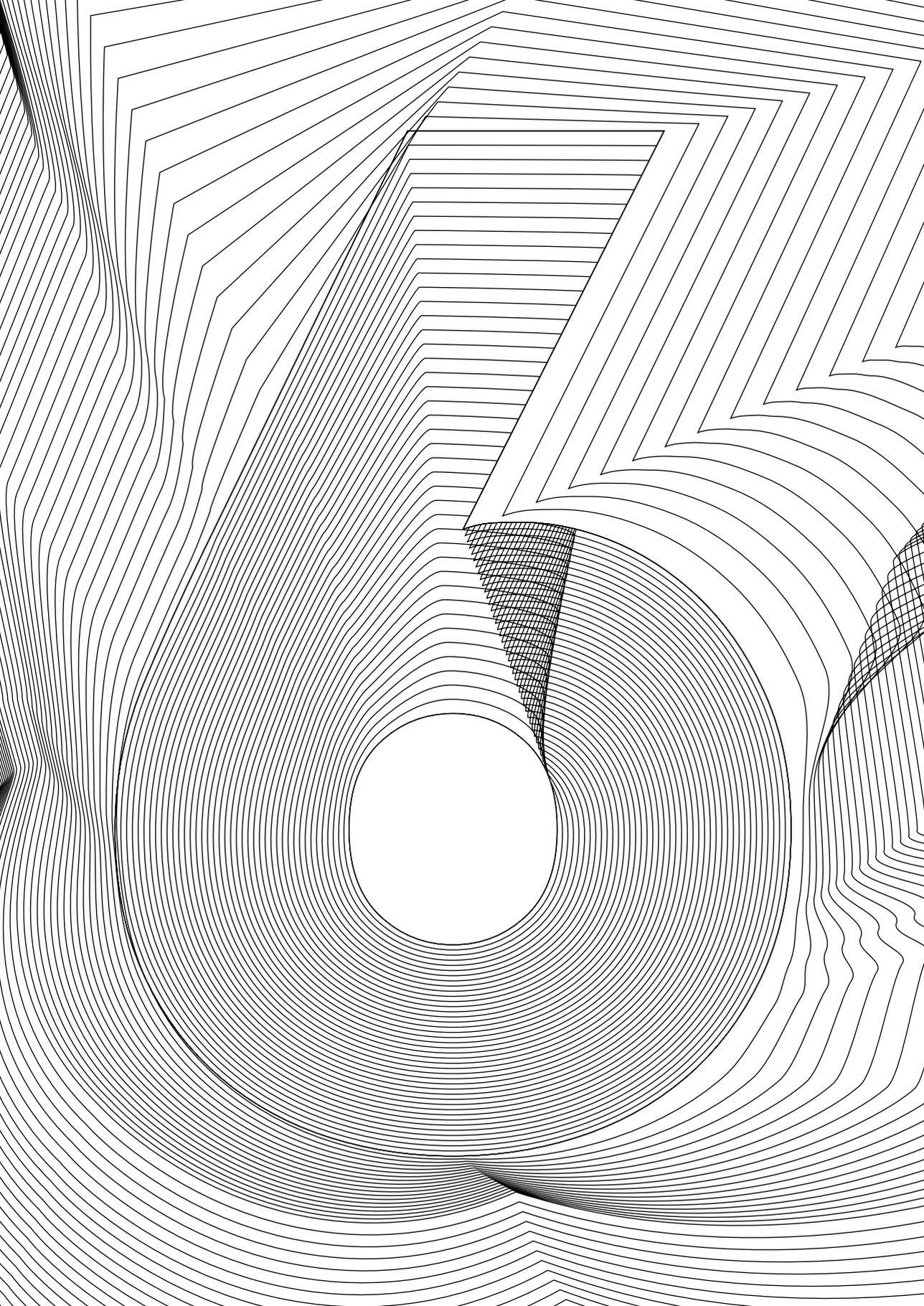
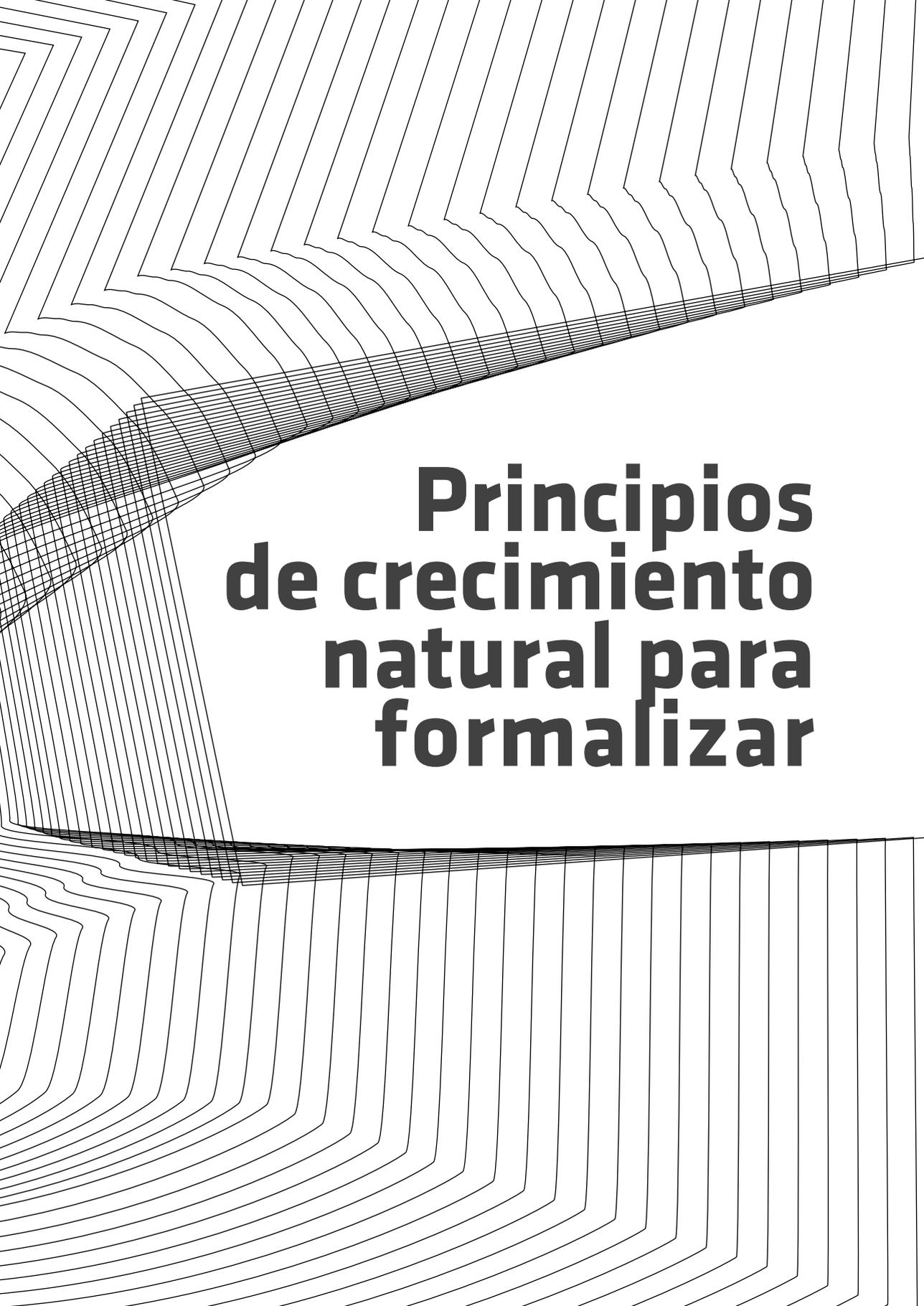
PATRONES en la naturaleza					
Patrón	Función Principal	Función Secundaria	Mecanismos de Emergencia	Aplicación Natural	Analogía Cultural
1 Esfera y formas esferoides	Proteger	<ul style="list-style-type: none"> - Contener - Independizar - Estabilizar estructuralmente - Desplazar - Auto defender 	<ul style="list-style-type: none"> - Isotropía - Rotación - Homogeneidad - Deterioro 		
2 Hexágono y pentágono	Pavimentar (bi y tridimensional)	<ul style="list-style-type: none"> - Auto organizar - Ocupar el espacio - Ahorrar material - Proteger (en caparazones) 	<ul style="list-style-type: none"> - Compresión de círculos - Propagación de fracturas - Cristalización de líquidos - Presión isotropa 		
3 Espiral	Empacar	<ul style="list-style-type: none"> - Guardar - Ahorrar espacio - Permitir movilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento diferencial - Velocidad diferencial - Competencia por luz y agua 		
4 Hélice	Agarrar	<ul style="list-style-type: none"> - Empacar otro material - Aumentar fricción 	<ul style="list-style-type: none"> - Movimiento - Crecimiento diferencial - Competencia 		
5 Puntas y conos	Penetrar	<ul style="list-style-type: none"> - Concentrar - Permitir movilidad - Dispersar - Defender, atacar, comer, excavar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deformación - Concentración 		
6 Ondas y formas sinuosas y serpenteantes	Comunicar	<ul style="list-style-type: none"> - Desplazar - Mover - Ocupar el espacio 	<ul style="list-style-type: none"> - Fluctuaciones periódicas - Orden - Fuerzas contrapuestas 		
7 Fractales, ramificaciones y explosiones	Colonizar	<ul style="list-style-type: none"> - Transportar - Rellenar el espacio - Minimizar (tiempo y material) 	<ul style="list-style-type: none"> - Competencia - Orden 		

Fig. 92. Patrones en la naturaleza, funciones, mecanismos de emergencia y sus analogías en las formas culturales.



The background features a complex, abstract pattern of thin black lines. These lines are arranged in a way that creates a three-dimensional, tunnel-like effect. The lines are most densely packed in the center and become more sparse towards the edges, giving the impression of depth and perspective. The overall composition is clean and modern, with a focus on geometric patterns.

Principios de crecimiento natural para formalizar

<<En efecto: si la formación de cada estructura singular se rigiera por leyes específicas, un solo libro no bastaría para explicarlas y ese saber abarcaría una biblioteca inimaginable>>.
 Hermann Haken

<<¿Cómo sería la realidad si no existiera ni una sola ley de la naturaleza?>>.
 Hermann Haken

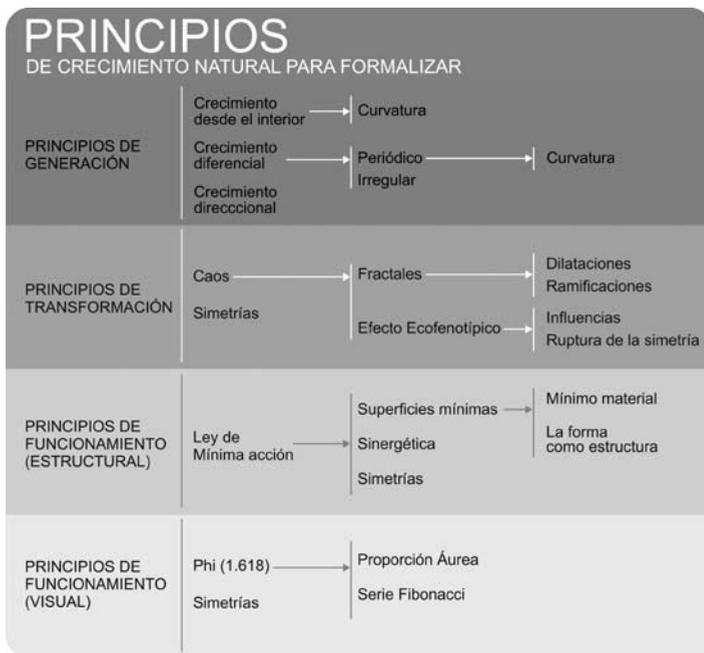


Fig. 93. Principios de crecimiento natural para formalizar.

Mirando las formas y los patrones anteriormente descritos, se puede verificar que aunque son diferentes morfológicamente todos entre sí, comparten rasgos similares que se repiten con cierta regularidad. Esos rasgos se catalogaron como principios de crecimiento natural que puede utilizar el diseñador para proyectar y acercarse de un modo directo a la eficiencia estética y estructural que utiliza la naturaleza para construir. No son todos los principios naturales sino solo aquellos que se pueden materializar en algún proyecto de diseño, ya sea arquitectónico, industrial o artístico.

Los principios que se van a enunciar hacen parte de aquellos preceptos que utiliza la naturaleza viva mientras crece porque siempre está en desarrollo y el crecimiento por sí solo sería ya una característica fundamental. Las máximas, que se pueden observar en la figura 93, se subdividieron en tres grupos: principios de generación, principios de transformación y principios de funcionamiento (estructural y visual).

Principios de generación

Los principios de generación son aquellos lineamientos que sigue la naturaleza en el momento mismo de comenzar el crecimiento, es decir, están inscritos desde la concepción de la forma. Se han clasificado en: crecimiento desde el interior, crecimiento diferencial periódico, crecimiento diferencial irregular, y crecimiento direccional.

Crecimiento desde el interior.

La curva es una cualidad que caracteriza la naturaleza y es resultado de muchos de los principios naturales. En los patrones que se vieron anteriormente, se mencionó el parentesco que tienen 6 de los 7 patrones con la simetría circular. Esta característica es entonces un lineamiento que la naturaleza sigue, no por simple capricho sino porque encuentra en ella muchas ventajas en el momento de construir y funcionar.

Si observamos bien, la célula de la cual están hechos los tejidos, y estos a su vez hacen organismos, es una forma hinchada. Las estructuras hinchadas, ya sean por un gas o por un líquido, tienen una singularidad y es la continuidad de tensión en la membrana ocasionada por la presión constante; esta continuidad provoca casi siempre formas esferoides o redondeadas como la de la figura 94a. Y como lo microscópico refuerza lo macroscópico no es de extrañar que normalmente la gente asocie las formas orgánicas con la naturaleza, ya que esta las prefiere frente a otras.



Fig. 94. Principios de generación

Crecimiento diferencial periódico

La curvatura aparece otra vez cuando las formas presentan un crecimiento diferencial que puede ser periódico convencional o exponencial, como en el caso de la espiral equiangular. En los dos casos, ese crecimiento no es repentino ni agresivo sino por el contrario pausado, lento y tranquilo; ocasionado por fuerzas diferenciales que están continuamente construyendo, estabilizando y adaptando la forma a las exigencias del entorno. El resultado son formas suaves, curvas, estructuras redondeadas que pueden crecer o no desde el interior, pero que de la misma forma son curvas. En la figura 94c se aprecia la huella de un Nautilus; por simple lógica geométrica se puede aseverar que ha crecido más rápido el espiral externo que el interno; además, se ha conservado en una línea de tiempo la misma proporción de velocidades para descubrir a un caracol cuya estructura se ha curvado perfectamente y exponencialmente sobre sí misma.

Crecimiento diferencial irregular

De la misma manera, esas fuerzas diferenciales ocasionan curvas en el momento en que responden a las necesidades que se van presentando. Por ejemplo, la raíz de la figura 94d posee una forma ondulada no por el simple hecho de tener ese principio de construcción a priori, sino porque al crecer la raíz debe encontrar la mejor forma de romper el suelo, buscando el terreno que le posibilite a la planta mantenerse en pie, pero que igualmente no le represente mucho trabajo y por lo tanto mucho gasto energético.

Crecimiento direccional

Decir que la naturaleza viva sólo construye o desde el interior o diferencialmente sería limitar su dimensión. El otro tipo de crecimiento es el que se da desde un punto, el cual coincide la mayoría de las veces con el órgano reproductor, que sigue una dirección determinada por los ejes 'X' o 'Y'. En el crecimiento desde el interior también se presenta un desarrollo desde un punto pero la construcción sigue los tres ejes: 'X', 'Y' y 'Z', lo que se revierte en un volumen cerrado; este tipo de crecimiento, por el contrario, configura superficies cuyo crecimiento se da inicialmente a partir de los dos ejes antes mencionados. Por ejemplo, una rama de una planta cualquiera como la de la figura 94e sigue un recorrido en el eje 'X', tomando en cuenta, claro, su propio eje longitudinal. Por otro lado, la superficie del anturio de la figura 94f, inicia su crecimiento desde el centro del capullo cuando está cerrado, va creciendo en un plano ('X' y 'Y') y se va enroscando ante las restricciones que imponen las paredes de la forma que los contiene.

Principios de generación

Los principios de transformación son aquellos que posibilitan el cambio en el momento que ya se ha comenzado el crecimiento. No se pueden ubicar como una etapa posterior a la generación sino que son mecanismos que imponen otra serie de cambios morfológicos a las formas que están en crecimiento. Se han clasificado en principios del caos y principios simétricos. Se hablará en este momento solamente de los primeros, pues los segundos de alguna manera funcionan en la naturaleza tal y como las herramientas de variación geométrica que se enseñaron en el capítulo de la forma geométrica. De igual forma, se volverán a retomar las simetrías en los principios de funcionamiento estructural.

Caos y azar

Si el aleteo de una mariposa en Tokio puede causar un tornado en New York (Teoría del caos y Poincaré), como no pensar que una forma cualquiera, digamos una hoja de un árbol, puede ser afectada por el caminar del gusano de seda. En general, la teoría del caos estudia la variabilidad de cualquier objeto inmerso en un sistema, es decir, todo lo existente es afectado por tantas variables que es imposible predecir su funcionamiento. Eso que normalmente se nombra como azar, también está condicionado a un conjunto de leyes rígidas e inmutables que determinan en la naturaleza la dirección general de la forma. Dos de esas leyes son la fractalidad y el efecto ecofenotípico.

Fractales

En el siglo XIX, un grupo de matemáticos se empezó a dar cuenta que en la naturaleza se presentaban comúnmente irregularidades y que esas irregularidades no eran excepciones sino que poseían patrones ordenados. Pero fue sólo hasta el siglo XX que Benoit Mandelbrot descifra estas irregularidades y las llama fractales. Los fractales poseen diferentes características que no podían ser descritas o analizadas con las matemáticas de ese entonces: son patrones auto semejantes; una pequeña sección puede ser vista como una réplica a menor escala de todo el fractal, lo que significa que en el sistema hay una dilatación. Son figuras que pueden crecer infinitamente y poseen dimensión fraccionaria; esto significa que están ubicadas simultáneamente en diferentes dimensiones, lo que hace complejo su análisis.

En los dos ejemplos fractales de la figura 95a se puede apreciar fielmente la dilatación y la ramificación del patrón inicial. Por otro lado, en el líquen de la figura 95b, se aprecia mejor el concepto de caos, además de la ramificación y la dilatación de los elementos. En los tres ejemplos se ve claramente la función para la que fue creada esta morfología: para colonizar, para abarcar la mayor cantidad de espacio; es así como las plantas optimizan sus recursos; para poder alimentarse, respirar y realizar la fotosíntesis. En el reino animal se ve un proceso contrario, los fractales no están externos sino internos, como las neuronas, las arterias y las venas pulmonares; su función es básicamente la misma: abarcar la mayor cantidad de espacio para, entre otras cosas, transportar la sangre.

Efecto ecofenotípico

Supongamos que dos plantas de la misma especie crezcan en el mismo terreno, hayan sido germinadas exactamente en el mismo momento y puedan ubicarse en un lugar con condiciones idénticas y controladas. Se podría llegar a pensar que esas plantas crecieron como gemelas mostrando rasgos exactamente iguales, pero la realidad es otra. Estas dos plantas aunque pueden mostrar una morfología característica de su especie, crecen completamente diferentes, y esto se debe al efecto ecofenotípico (eco, de ecológico; fenotipo, de fenómeno). Al respecto, Christopher Williams opina que el resultado de la morfología en la naturaleza está condicionado por los efectos que el medio ambiente ejerce sobre el individuo.

Esta variabilidad e irregularidad es lo que define el caos como la ausencia de un mecanismo adecuado que prediga en su totalidad el posible efecto que pueda tener una causa porque son tantas las causas o variables que es imposible determinarlas. En la figura 98c se observan dos hojas de una misma planta que presentan condiciones formales diferenciadoras; las razones pueden ser muchas: el viento, la exposición al sol, los animales que hayan albergado, en fin, el efecto ecofenotípico influye las formas ya sean vivas o inertes, dándole variedad al mundo.

Los fenómenos del ambiente muchas veces cambian la simetría que poseen los individuos, generando una nueva pauta o patrón. En la figura 95d se ve un tronco de una palma que ha sido modificado en la gráfica dándole una simetría de traslación; es muy posible que genéticamente la palma tenga la información para generar dicha simetría pero por diferentes razones, como se ve en la foto real, se ha presentado una ruptura de la simetría, exhibiendo ligeros cambios de franja a franja.



Fig. 95. Principios de transformación

Principios de funcionamiento estructural

En 1746, el matemático y astrónomo francés Pierre-Louis Moreau de Maupertuis propuso un gran esquema del mundo que denominó la ley de la mínima acción. Esta ley dice que la naturaleza siempre opera con la máxima economía posible, por tal motivo, en todo cambio que se produzca en la naturaleza, la cantidad de acción necesaria debe ser la mínima posible. Por ejemplo, la sinuosidad de un río ocurre por evitar la fricción ocasionada por las orillas, el resultado es una forma curva de cambios suaves de dirección. Este principio general cobija a otros tres más específicos que se rigen por la misma cualidad: las superficies mínimas, la sinérgica y las simetrías.

Superficies mínimas

Muchas de las formas recurrentes en la naturaleza tienen gran semejanza a las superficies periódicas de mínima superficie que los matemáticos denominan superficies minimales. La esfera, el paraboloides hiperbólico, el hiperboloides y el helicoides hacen parte de ellas, como también hacen parte de las formas que se presentan con mucha regularidad en la naturaleza. La propiedad que comparten es encerrar el mayor volumen o cubrir la mayor longitud, con el mínimo material y la mínima superficie.

En la figura 96a se observa una hoja de loto que busca la forma circular porque necesita suspenderse y recibir la mayor cantidad de luz solar abarcando la máxima área. Como ya se vio, hay formas circulares y esferoides por doquier, todas ellas han utilizado el principio minimal para construir eficientemente la forma que ha de contener su vida.

Al igual que como utiliza el ahorro de forma para disminuir material, la naturaleza debe seguir economizando sus recursos; para ella el material es más costoso que la forma; la forma es el resultado de la acción de las leyes físicas, el caos (como se vio anteriormente) y la información genética, pero el material necesita mayores recursos energéticos para su consecución, y significa en algunos casos la nutrición misma, su alimento. Por eso, otra manera de minimizar recursos es dotar a esa forma, o esa superficie, de estructura. En el reino vegetal se ve claramente que la estructura es la forma, la forma no es un disfraz de la estructura; ambas cosas son una, utilizando los recursos de dos necesidades en un solo frente. La mayoría de las superficies minimales también tienen esa característica; son morfologías resistentes por la forma; en diseño estructural se llaman estructuras tipo cáscara, en las cuales la curvatura continua de una superficie distribuye los esfuerzos eficientemente. Otra forma de estructurar minimizando recursos, como menciona Ezio Manzini en su libro *La materia de la invención*, es plegar. Como la cáscara de coco de la figura 96b, la cual está plegada en su totalidad, esto es estructuralmente como si se aumentara el grosor sin necesidad de agregar más material.

Sinergética

<<La suma de las partes como todo es la más perfecta relación de proporciones>>.

Platón

Sinergia es <<la acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales>>²². Después de estudiar a fondo la sinergia, Hermann Haken funda una disciplina llamada sinérgica, la cual tiene por labor explicar el comportamiento de aquellos sistemas compuestos por varios subsistemas que sólo pueden ser comprendidos como un todo que es más que la suma de sus partes

Esto significa que el comportamiento de la totalidad de un sistema no puede predecirse por el comportamiento de sus partes tomadas separadamente; la suma de las partes no es igual que el todo, sino más. En el momento en el cual la naturaleza construye un individuo como un sistema, que a su vez hace parte de un sistema mayor, y no como una suma de elementos separados como hojas, tallo y flores, está buscando la optimización de los recursos disponibles por la totalidad del sistema.

Se dice, por ejemplo, que los domos geodésicos de Fuller, como los de la figura 74, pesan menos que el material del que están hechos. Este concepto puede ser una paradoja pero sirve para explicar que en la medida que los subsistemas, que se llamarán en este caso barras, se configuren con posibilidad de un funcionamiento mucho más eficiente, el sistema compuesto responderá no sólo a razón de la suma de las propiedades del material y la forma de las barras sino también a las propiedades de la configuración final. Por tanto, si las partes son la suma del material y la forma ($P = M+F$) y la estructura es igual a la suma del material, la forma de las barras y la configuración ($E = M+F+C$), el todo, como se dijo anteriormente, es mucho más que la suma de las partes.

Dicha paradoja se puede explicar porque este sistema estructural resulta de la truncación de un icosaedro, y a medida que se trunca nuevamente y se aumenta la frecuencia de los lados y las caras, ésta se acerca mucho más a la forma de una esfera. La esfera, como bien se sabe, es el cuerpo que con la menor superficie puede encerrar mayor volumen; esto quiere decir que puede encerrar gran cantidad de aire, y éste al calentarse podría lograr elevar la estructura; no es que esto realmente suceda, pero teóricamente puede explicarse de esa forma. Una de las ideas de Fuller, por ejemplo, era que si se lograra construir una cúpula del tamaño de una ciudad, esta podría elevarse al menor cambio de temperatura.

Las formas de la naturaleza se comportan de una manera similar; cada una de las configuraciones locales tiene una función particular pero siempre con relación a la función de la configuración global. Por ejemplo, la flor de la figura 96c, abre sus pétalos simultáneamente por el crecimiento o por la influencia de la luz solar, pero nunca una sola parte decide desplegarse independientemente. Es todo el sistema el que, accionado por una especie de bomba hidráulica se abre. El movimiento del conjunto se presenta por la acción de un solo elemento, el cual proporciona sólo una entrada de movimiento, lo que representa varias ventajas, entre ellas, y quizá la más importante, ahorrar energía y minimizar la acción.

22. DICCIONARIO DE LA REAL ACADEMIA DE LA LENGUA ESPAÑOLA. Edición en línea. Disponible en: <http://www.rae.es/rae.html>. Último acceso: 26 de febrero de 2009

Simetrías

Básicamente la función principal de las simetrías en la naturaleza es disminuir la información que necesita para construir. Digamos que para construir al ser humano sólo necesita la mitad de la información genética, eso representa un ahorro grandísimo en capacidad de almacenar información. La mayoría de los seres vivos complejos, es decir, los animales, presentan simetría especular o simetría de espejo. Sólo pensar en el perro de la figura 96d no con una simetría especular sino con una radial, sería un asunto chistoso, no solamente porque ya lo tenemos dibujado en la cabeza de una forma predeterminada sino porque ¿cómo haría el perro para correr? El asunto de movilidad y todas las funciones de supervivencia que ello conlleva le ha hecho elegir a la selección natural entre todas las simetrías posibles y sus variaciones, por la simetría especular.

En el reino vegetal hay un predominio, en cambio, de la simetría radial y la de traslación (ver figura 96d). En la simetría radial hay un eje que se desplaza alrededor de un centro, y en la de traslación los objetos se mueven longitudinalmente a través de un eje recto. Estas simetrías también tienen implícito cierto equilibrio, pero no solamente remitido al orden visual sino también a una morfología ocasionada por una consistencia y una estabilidad de las fuerzas que ocasionan el individuo. La simetría radial nos está hablando de una sola fuerza radial que nace del centro, y la especular de dos fuerzas equilibradas.

Fig. 96. Principios de Funcionamiento estructural.



Principios de funcionamiento visual

La estética en la naturaleza es el resultado, por una parte, de todos los principios antes mencionados y muchos más mecanismos biológicos y físicos, pero muchas veces también tiene una función particular referente a la comunicación propiamente dicha. Los colores, por ejemplo, desempeñan una labor específica en cada animal o vegetal de la tierra: ya sea ayudar al apareamiento, a la protección o a la supervivencia. La estética en cuanto a la morfología tiene dos parámetros importantes, el primero corresponde a las simetrías, que atiende una función remitida a la movilidad pero cumple otra en el sentido de que proporciona en muchos individuos un sentido de belleza necesario para realizar diversas funciones, todas vitales. El segundo parámetro es la proporción. Se relacionará una particular, de la cual han hablado más los biólogos que los artistas, y es la proporción áurea.

Phi (fi), el número de oro

Platón decía que para combinar bien dos cosas es necesaria una tercera, que cree una relación entre ellas y las ensamble. Y con ese tercer elemento se refería a la proporción y específicamente a la proporción áurea. Los griegos la emplearon; Vitruvio la utilizó y Leonardo la popularizó. Se basa en el número de oro, Φ , representado por la cantidad numérica: 1.6180339..., pero no es solamente un número sino ante todo una proporción. Es decir, es un cociente que compara dos tamaños, dos cantidades, calidades o ideas distintas.

En la naturaleza, todas las formas que vinculen en su construcción al pentágono o a la espiral logarítmica, están proporcionadas por consiguiente, utilizando el número dorado. El pentágono, dice Pablo Tosto, es la figura geométrica más extraordinaria ya que casi todas las relaciones naturales de su forma, medidas y ángulos están en Φ , además de todas las formas externas o internas, consecuencia de los ejes de éste. Como la estrella de mar de la figura 97a, en el cual su contorno coincide con los ejes internos del pentágono, configurando la estrella pentagonal.

El número de oro también se ve representado por la llamada serie Fibonacci, la cual es una progresión especial en la que dos números iniciales sumados dan como resultado uno tercero, y así indefinidamente. Por ejemplo, $1+1=2$, $2+1=3$, $3+2=5$, $5+3=8$, y $8+5=13$, la serie sería entonces: 1, 1, 2, 3, 5, 8 y 13, pero podría crecer hasta el infinito. Lo interesante es que al dividir algún número por su inmediatamente anterior, el resultado siempre se aproxima a Φ (ó a Φ^2 , Φ^3 , etc.). Por ejemplo, 8 dividido 5 es igual a 1.6.

El girasol, como el de la figura 92, posee la mayoría de las veces 55 espirales dextrógiras (en sentido de las agujas del reloj) y 34 u 89 espirales levógiras superpuestas; los tres números hacen parte de la serie Fibonacci. Las ramificaciones de la estructura del árbol de la figura 97b están ordenadas con la serie Fibonacci, tal y como se muestra en la figura. Si comparamos este esquema con el del árbol de la figura 92, podemos ver que aunque los dos presentan ramificaciones, la representación del árbol con la serie Fibonacci de la figura 97b corresponde a una imagen mucho más fiel de la estructura de un árbol real. La serie se presenta también en la relación de los huesos de los dedos, la mano y el brazo humanos, en la distribución de las hojas de la planta alrededor de un tallo, y en general, en muchas de las construcciones de la naturaleza.

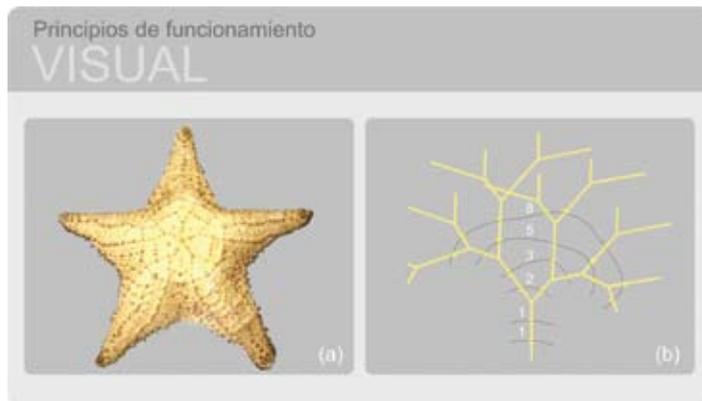
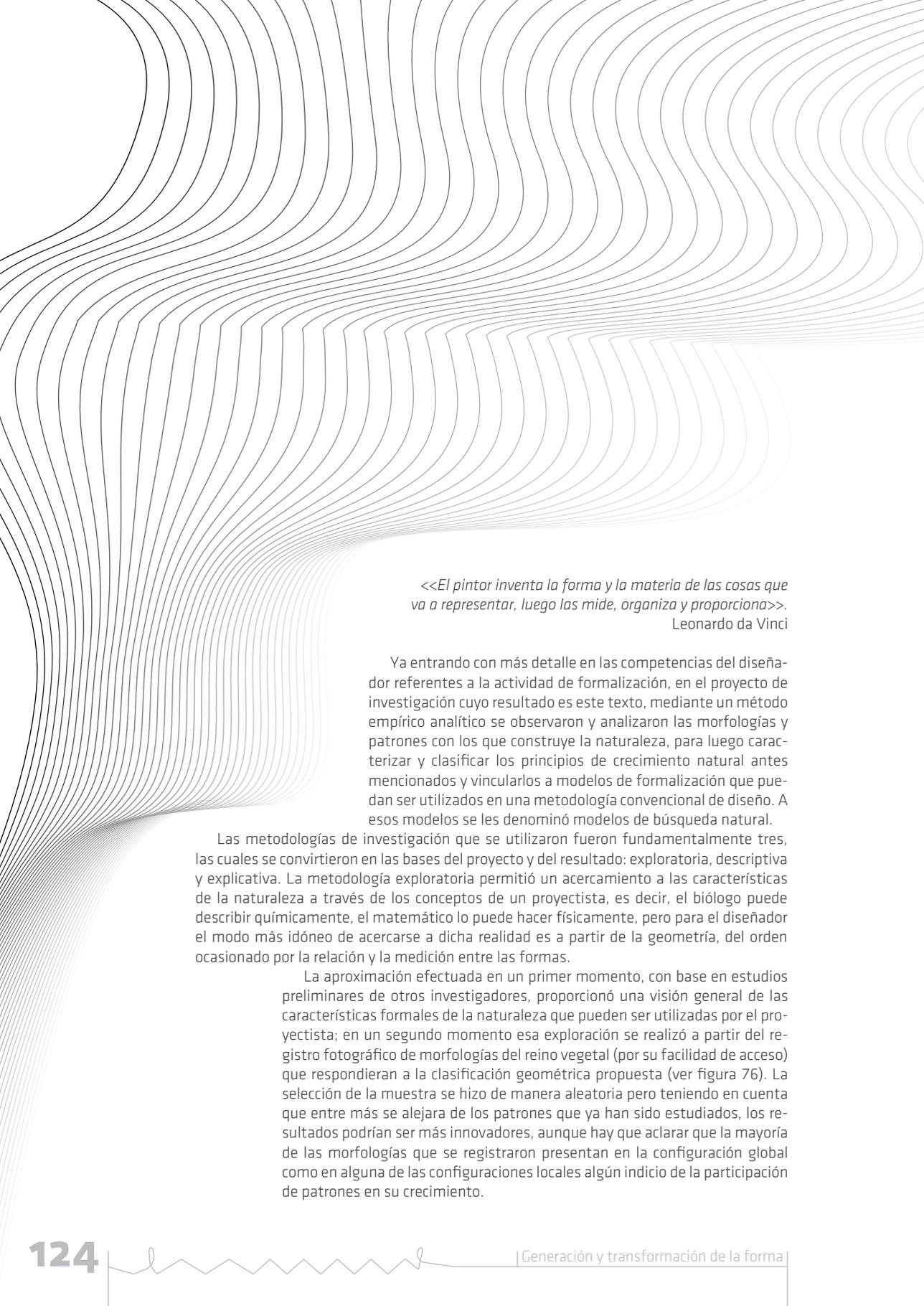


Fig. 97. Principios de funcionamiento visual





Modelos de búsqueda natural



<<El pintor inventa la forma y la materia de las cosas que va a representar, luego las mide, organiza y proporciona>>.
Leonardo da Vinci

Ya entrando con más detalle en las competencias del diseñador referentes a la actividad de formalización, en el proyecto de investigación cuyo resultado es este texto, mediante un método empírico analítico se observaron y analizaron las morfologías y patrones con los que construye la naturaleza, para luego caracterizar y clasificar los principios de crecimiento natural antes mencionados y vincularlos a modelos de formalización que puedan ser utilizados en una metodología convencional de diseño. A esos modelos se les denominó modelos de búsqueda natural.

Las metodologías de investigación que se utilizaron fueron fundamentalmente tres, las cuales se convirtieron en las bases del proyecto y del resultado: exploratoria, descriptiva y explicativa. La metodología exploratoria permitió un acercamiento a las características de la naturaleza a través de los conceptos de un proyectista, es decir, el biólogo puede describir químicamente, el matemático lo puede hacer físicamente, pero para el diseñador el modo más idóneo de acercarse a dicha realidad es a partir de la geometría, del orden ocasionado por la relación y la medición entre las formas.

La aproximación efectuada en un primer momento, con base en estudios preliminares de otros investigadores, proporcionó una visión general de las características formales de la naturaleza que pueden ser utilizadas por el proyectista; en un segundo momento esa exploración se realizó a partir del registro fotográfico de morfologías del reino vegetal (por su facilidad de acceso) que respondieran a la clasificación geométrica propuesta (ver figura 76). La selección de la muestra se hizo de manera aleatoria pero teniendo en cuenta que entre más se aleja de los patrones que ya han sido estudiados, los resultados podrían ser más innovadores, aunque hay que aclarar que la mayoría de las morfologías que se registraron presentan en la configuración global como en alguna de las configuraciones locales algún indicio de la participación de patrones en su crecimiento.

Luego de realizar el registro se procedió a analizar dicha información, la cual se hizo utilizando una metodología descriptiva que permitiera poner de manifiesto la estructura y las características fundamentales de las morfologías estudiadas para encontrar nuevos patrones formales y geométricos. Posteriormente se desarrolló la estrategia que iba a redefinir las propiedades formales encontradas, modificando la estructura y la forma del objeto estudiado. Utilizando una metodología explicativa se delimitaron las relaciones causales existentes entre los orígenes y las condiciones que estos producen, de donde surgieron dos modelos de búsqueda natural que pueden ser empleados por los proyectistas para la formalización de un proyecto de diseño.

De esas tres etapas se precisaron las bases conceptuales metodológicas, actitudinales y aptitudinales, fundamentales en la investigación y los modelos resultantes.

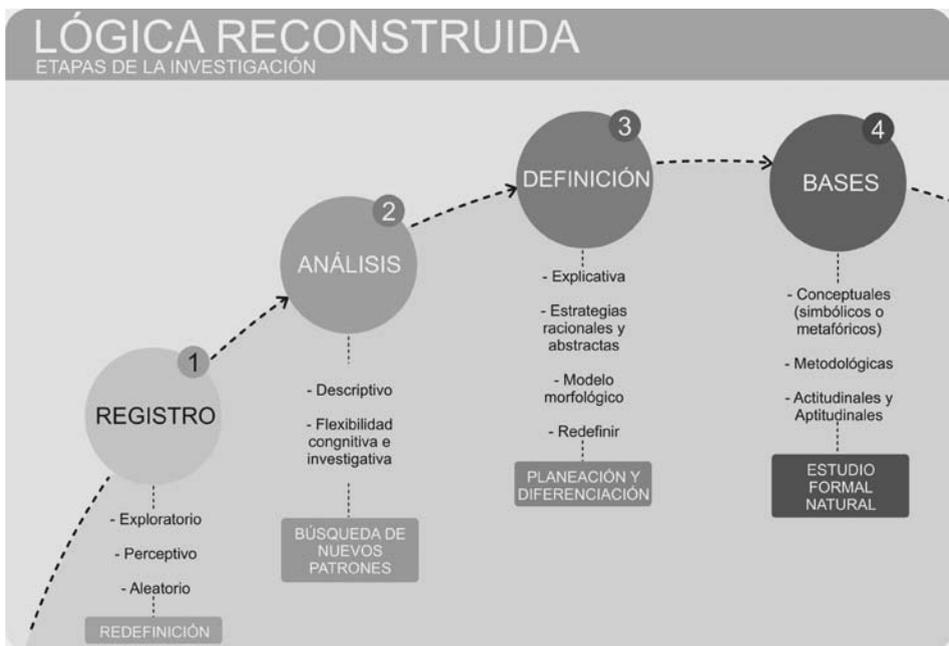


Fig. 98. Lógica reconstruida.

Lógica reconstruida

El diseño metodológico que se plantea para esta investigación consiste en generar estrategias para evolucionar la forma más allá de la función misma que ésta físicamente contenga, basada en las técnicas constructivas naturales.

En un primer momento, la función que en principio sólo se representa mecánicamente se le introduce transformaciones de manera aleatoria y exploratoria en el cual la manipulación de ensayo y error se da como una alternativa para la búsqueda formal.

En el segundo momento, se dan cambios y transformaciones en las formas tomadas de los registros fotográficos, para lograrlo se implementan varios enfoques metodológicos como son algunas técnicas creativas, utilizando un pensamiento heurístico y un pensamiento holístico hacia la búsqueda de los resultados, para ello se cuenta con el grupo de estudiantes investigadores de la Universidad Pontificia Bolivariana, integrantes del proyecto en mención.

Estas metodologías permiten interpretaciones a través de unas rutas lógicas, sistemáticas y técnicas que posibilitan la deconstrucción y la reconstrucción de las nuevas morfologías encontradas. Facilitando el cambio de los conceptos y en la mayoría de los casos la generación de nuevas formas, cada exploración formal genera otras múltiples posibilidades, que se basan no sólo en la percepción de una sola observación, sino que ésta debe tener una mirada que permita varios puntos de interpretación de la forma analizada.

A continuación se presenta las etapas desarrolladas en la investigación:

Como punto de partida se puede ver la figura 98, aquí observamos los niveles de desarrollo para el pensamiento y la organización para la producción intelectual de cada investigador, esta estrategia o metódica admitió la libertad para la proposición de los nuevos conceptos morfológicos. Las etapas desarrolladas son las siguientes:

1. Registro: La recopilación de datos, contribuyó con la exploración inicial del proyecto, esta se realizó por medio de fotografías, videos, lecturas de textos recomendados y experiencias con expertos.

2. Análisis: Las pautas de registro diseñadas para el desarrollo de esquemas y de dibujos permitió definir la búsqueda de nuevas formas, resultados que arrojaron como derivaciones la construcción de los nuevos patrones.

3. Definición: Articula la planificación propia del auxiliar de investigación de acuerdo con unas estrategias previstas con el investigador principal que orientó el desarrollo e implementó el modelo morfológico a seguir, para que se pueda vincular finalmente de manera ordenada y sistematizada la información.

4. Bases: Finalmente para recoger la información se requirió diferenciar la conceptualización, para no perder ninguna situación planteada durante el proceso, inclusive aquella que se presentara en forma elemental.

Las metodologías previstas como recurso para abordar los conceptos y poderlos finalmente representar fue muy importante, su base conceptual permitió implementar el grado de complejidad del proyecto y de esta manera diferenciarlo en dos momentos uno de primer orden: modelo de síntesis y otro de segundo orden: modelo de crecimiento.

El punto que define la fundamentación en la reconstrucción metodológica precisa lo siguiente:

- Para el desarrollo del proyecto se definieron las aptitudes y actitudes que deberían estar presentes en el equipo de trabajo para estudiar las formas y lograr el éxito en la búsqueda de la morfología ideal; la actitud se plantea como la predisposición positiva frente a las metodologías propuestas por el investigador principal, con una disposición abierta para el intercambio de ideas y opiniones en grupo que faciliten un desarrollo ágil en las puestas en común y en aportes concretos para la investigación y la aptitud como estructura fundamental para el éxito del proyecto, ya que se requirió de absoluta habilidad técnica para el manejo de la información y manipulación de la forma, también se presento de forma contundente para la interpretación y la síntesis de textos complejos .

Etapas metodológicas

El objetivo propuesto para esta metodología se fundamenta por medio de cinco niveles ver (figura 99 y 100) estos, expresivo y perceptual, formalizador y perceptual, desarrollo y aprehensión, innovador y propositivo, y por último emergente e integrativo, se definen a través de actividades sucesivas para desarrollar el proceso de reconstrucción continuo de la forma. Estos cinco niveles propuestos van a expresar el estudio detallado de la forma bajo la noción de modelo de síntesis definido como de primer orden y la noción de modelo de crecimiento definido como de segundo orden, los cuales se encuentran especialmente diferenciados solo en el nivel cuarto.

Los objetivos y las actividades de los otros niveles son compartidos por ambos modelos buscando siempre la re-configuración de sistemas naturales encontrados en los ambientes biológicos observados.

Ahora bien, el modelo de síntesis busca sintetizar, deconstruir y modificar una forma a partir de conceptos y herramientas de variación geométrica, y el modelo de crecimiento aunque tiene implícita la síntesis geométrica, busca no solo deconstruir, sino reconstruir, modificar y desarrollar la forma, utilizando los principios de crecimiento natural para proyectar lo anteriormente enunciado.

En conclusión se puede decir que a grandes rasgos el modelo de crecimiento vuelve complejo el modelo de síntesis en la medida que utiliza toda la experiencia de la naturaleza para formalizar, en busca de resultados con mayor profundidad, y así mismo con mayor conceptualización y optimización morfológica.

Nivel 1. Expresivo y perceptual

El primer nivel es el expresivo y perceptual (ver figura 99). En él, al igual que la investigación para llegar a los modelos, se parte de la exploración; se realiza una recolección y un registro de la información necesaria para comenzar el estudio. Dicha información es de campo, recolectada luego de hacer un reconocimiento preliminar por medio de herramientas fotográficas. Su objetivo general es explorar mediante la indagación, la revisión, la detección, la observación, el registro y reconocimiento de formas presentes en la naturaleza.

Se presenta una aproximación inicial identificando características evidentes, relevantes o repetitivas que permitan establecer nuevos patrones o nuevas composiciones morfológicas, este primer paso para el nuevo patrón, se obtiene como resultado de la inesperada conjunción de formas y figuras.

Estas características no solamente están dadas por la forma como forma, sino la forma como estructura, o como soporte de la función. Es decir, se pueden elegir configuraciones que sobresalgan por los atributos estéticos, estructurales o por cualidades funcionales que se encuentren representadas formalmente.

Luego de realizar el registro fotográfico se puede consignar una búsqueda específica de las vistas más relevantes, los detalles, y perspectiva, luego se procede a clasificar geométricamente (formas a partir de la recta y a partir de la curva) y a estudiar gráficamente la forma seleccionada, para comprender directamente la razón de su morfología y de los elementos que intervienen en su estructura.

Nivel 2. Formalizador y perceptual

En el segundo nivel se empieza la etapa que corresponde a la formalización. Su objetivo general es describir la forma registrada, donde servirá como base el análisis gráfico antes elaborado y las propiedades de la frontera presentes en todo tipo de forma: tamaño, proporción, superficie, textura y simetría; los cuerpos o figuras geométricas que determinan las directrices constructivas, y por último, los patrones predominantes en la naturaleza, que pueden estar presentes como configuración global o como configuración local.

Este nivel proporciona un incremento en el proceso constructivo mediante la codificación, identificación, definición y caracterización de la forma estudiada. Al adquirir mayor profundidad en este estudio se implementa las pautas formales y se describe las relaciones internas de composición, morfología y funcionamiento.

Las actividades de este nivel son básicamente dos, una descripción general del objeto de estudio y una definición de las propiedades y características morfológicas más relevantes, las cuales pueden variar según la intención de la investigación: dimensiones, simetrías, superficies, presencia de dilataciones y patrones encontrados.

Nivel 3. De desarrollo y aprehensión

Este es el nivel intermedio entre la formalización y la proposición; en él se concluye el análisis gráfico y textual de la forma estudiada para pasar a la modificación y transformación formal. Su objetivo es analizar a través de la comparación, la descomposición y la síntesis geométrica del objeto de estudio.

El inicio del desarrollo formal y estructural está dado, en este caso, por las pautas formales cuyas características contrastadas son cada vez más claras y donde el recurso de la geometría permite la resignificación de los elementos, para generar una nueva molécula primigenia de donde va a nacer una forma diferente desprendiéndose así las posteriores modificaciones.

Las actividades que se realizan en este nivel son: primero, la descomposición de la configuración global para seleccionar nuevamente dentro de esos elementos desprendidos cuál es la forma que posee mayor riqueza estética, que tiene mayor importancia dentro de la función estructural o que se repite con mayor regularidad dentro de la planta. Segundo se debe hacer una síntesis geométrica, que puede ser una *geometrización* o análisis geométrico, es decir, una nueva lectura de la forma desde las figuras y cuerpos geométricos. Y finalmente, como un tercer paso, se puede dar una abstracción simplificada de la forma generada.

Nivel 4. Innovador y propositivo

El objetivo de este nivel es quizá la cima de la metodología, en la que se culmina la etapa de formalización. Su objetivo general es proponer a partir de la modificación y reinterpretación de lo analizado; esto se logra a través de la exposición, y además trata de plantear y diseñar formas guiadas por alguno de los modelos de búsqueda natural.

Para proponer en esta fase del proceso se busca predecir cuál será el posible resultado, anticipándose al encuentro de una conclusión fallida. Luego se modifica las configuraciones básicas, cambiando y reemplazando elementos, transformando la síntesis geométrica, y organizando y mejorando los resultados.

Por último se explica no solamente el efecto como resultado, sino también las causas de dicho fenómeno, ya estos ayudarán a comprender por un lado el modelo, y por otro los principios y las morfologías que la naturaleza utiliza para construir, enfatizando de esta manera las relaciones de causalidad que finalmente acceden en la modificación de dichos principios ya establecidos y la repetición del modelo en otros proyectos.

Aunque el objetivo de este nivel es el mismo para los dos modelos, las actividades son diferentes y cambian en complejidad en ambos (ver figura 100). Las actividades del modelo de síntesis son: primero, realizar una modificación de la estructura sintetizada a partir de herramientas de variación geométrica y en forma paralela, hacer una interpretación gráfica que facilite el desarrollo tridimensional; segundo, nuevamente se modifica con las herramientas de variación geométrica (simetría de espejo, de rotación, y de traslación) y con las herramientas de variación formal básicas, como son las dilataciones y la ruptura de la simetría, mientras se homologa lo que se transforma al espacio tridimensional construyendo cuerpos y sistemas espaciales.

Las actividades del modelo de crecimiento son la modificación gráfica bidimensional de la estructura sintetizada a partir de los dos primeros principios de crecimiento natural (generación y transformación). Para luego interpretar sólo en el momento de aplicar los principios de funcionamiento estructural y visual, y crecer el patrón tridimensionalmente.

Esto quiere decir que luego de sintetizar y seleccionar la forma se procede primero a influenciar dicha estructura con alguno de los principios de generación; por ejemplo haciendo una abstracción de cómo crecería una forma si se hinchara desde el interior, o si la geometría tuviera un crecimiento diferencial periódico. Luego esa nueva forma se le efectúa uno o varios principios de transformación: fractales ramificados o dilatados básicos, efecto ecofenotípico básico, ruptura de la simetría, y simetrías. Y por último se interpreta para crecer tridimensionalmente el patrón mientras se le aplican los principios de funcionamiento estructural y visual, que no es otra cosa que, como dice Leonardo da Vinci, una organización, medición y ordenamiento de la forma “inventada”.

Es decir, la última modificación no debe ser extrema, ya que sí se sigue metódicamente el modelo, cuando se llegue a la última modificación las formas deben tener intrínsecamente algún principio; sólo que se deben moldear la forma “inventada” para obtener un resultado mucho más equilibrado, estético, y estructural.

Nivel 5. Emergente e integrativo

Su objetivo es verificar que los resultados hayan utilizado el modelo de búsqueda natural, y por ende, los principios con los que construye la naturaleza para generar nuevos principios y nuevas configuraciones. Se integran las relaciones de cambio, determinando los elementos que le den un sentido al sistema final, confirmando y evaluando la validez del resultado. La única actividad de este nivel es la definición y descripción de las características y propiedades de la nueva forma, lo que ayudará a valorar tanto el desarrollo de las etapas metodológicas como el crecimiento tridimensional final efectuado.

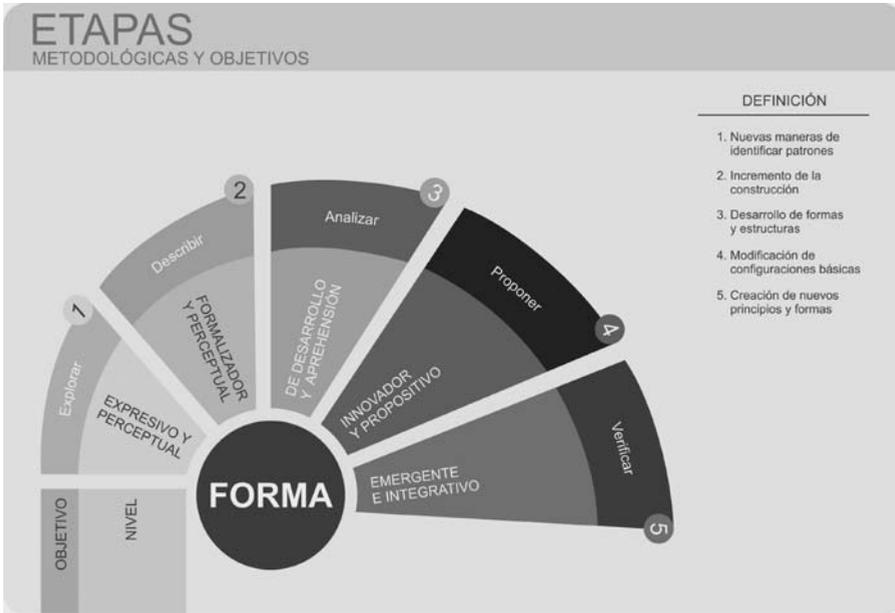


Fig. 99. Etapas metodológicas y objetivos

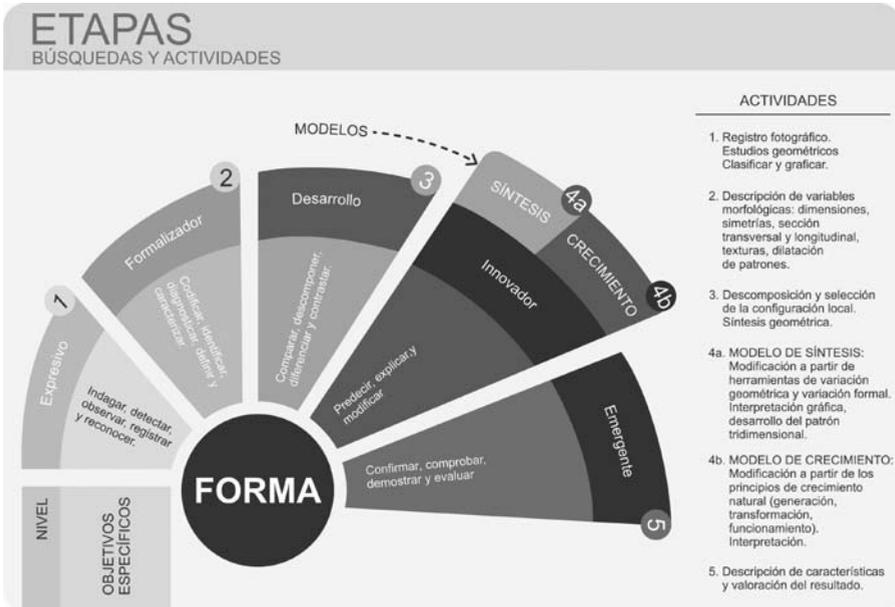


Fig. 100. Etapas metodológicas y actividades

Fundamentación de la metodología

Para poder concluir los niveles y comprender la aplicación del primero y segundo orden se hace necesario identificar una estructura que proyecte este ciclo de construcción al cual denominaremos lógica reconstruida como base de la fundamentación metodológica propuesta para esta investigación (ver figura 101).

Esta lógica conceptual articula y ordena cada pauta propuesta a través de los instrumentos para el análisis formulado, y precisa los momentos importantes en el desarrollo y proceso de la investigación; finalmente, comprueba la fundamentación de la metodología estructurada para la generación y transformación de la forma, expresado en la búsqueda permanente de nuevas morfologías. Para entender la propuesta de esta lógica se hace una clasificación de la siguiente manera:

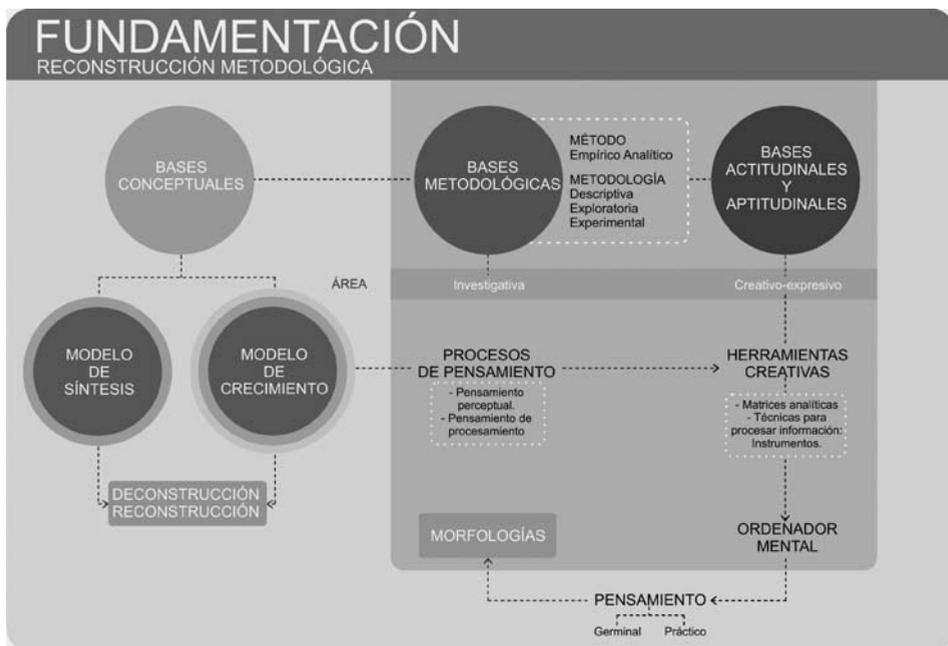


Fig. 101. Fundamentación de la metodología

Bases conceptuales

Éstas son muy importantes porque dan la pauta para identificar la iniciación del proyecto. De la misma forma se presentan como la estrategia para fundamentar la exploración de la información, ubicada en textos de ingeniería, medicina y filosofía, entre otros; además establece los parámetros para la discusión con expertos en temas acordados para la disertación en los encuentros y puesta en común. De estas bases conceptuales se desglosa lo siguiente: un primer orden estableciendo como un modelo de síntesis de la forma y un segundo orden estableciendo como un modelo de crecimiento de la forma. En este proceso es necesario identificar algunos procesos de pensamientos planteados para el resultado cognitivo del investigador auxiliar.

Para estructurar la competencia de formación en este proyecto se define el ordenador mental para la configuración de las ideas, ver la tabla de la figura 102. en esta se implementan los procesos de pensamientos y como se vinculan progresivamente; la estrategia que se plantea para el logro de la competencia permite alcanzar las respuestas creativas e inventivas en el taller; para su clasificación entonces se habla de la deconstrucción a través de un proceso germinal y de la reconstrucción a través de un proceso práctico. En las bases conceptuales se identifican dos aspectos necesarios para la implementación de la reconstrucción metodología: las bases metodológicas y las bases actitudinales y aptitudinales.

ORDENADOR MENTAL PARA LA CONFIGURACIÓN DE LAS IDEAS		
PROCESOS DE PENSAMIENTO APLICADO	DECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
	PROCESO GERMINAL	PROCESO PRÁCTICO
	Inductivo	Deductivo
	Cualitativo	Cuantitativo
	Abstracto	Concreto
	Imaginativo	Lógico

Fig. 102. Ordenador mental y procesos de pensamiento

Bases metodológicas

Estas bases se refieren al sistema para abordar los procesos de búsqueda, determinados por un método empírico analítico que permite las interpretaciones aleatorias, pero de la misma manera generar unas rutas lógicas para identificar las formas analizadas; la empírica utilizada avala la indagación a través del ensayo y error, importante en la exploración de este proyecto. La otra base metodológica se construye en forma particular para cada paso en la evolución del plan de trabajo; son instrumentos diseñados particularmente según el análisis requerido donde se propicia la indagación descriptiva, exploratoria y experimental.

Bases actitudinales y aptitudinales

Para el buen desempeño del método y la metodología propuesta es fundamental implementar los perfiles que se definieron anteriormente en la lógica reconstruida para las etapas de la investigación (bases). El equipo de trabajo debe ser equilibrado y sinérgico desde el comienzo.

Luego de definir los aspectos estructurales para la metodología, se continúa con la interpretación del cuadro de fundamentación en la reconstrucción metodológica.

Si se observa: tanto para el modelo de síntesis como para el modelo de crecimiento, se involucran unos procesos de pensamiento que van a ayudar a la configuración de las ideas, para ello se construyen dos fases:

- Pensamiento perceptual: Esta fase permite la identificación de pautas de análisis de la forma desde una mirada geométrica y abstracta.

- Pensamiento de procesamiento: Esta fase utiliza la lógica para la lectura formal.

Las dos fases, la perceptual y de procesamiento se desarrollan de forma paralela a las herramientas creativas; este proceso consi-gue visualizar y materializar gráficamente los análisis de las formas, para ello se requieren matrices de dos variables obteniendo lecturas posteriores de análisis, también se recurre a otras técnicas que ordenan y sistematizan las múltiples Interpretaciones efectuadas.

Finalmente, al concluir con el ciclo propuesto en el cuadro que se viene analizando pasaremos a hablar del ordenador mental que es el que va materializando los resultados de esta metodología. El ordenador mental, que se puede ver en la figura 103. este cuadro se define de acuerdo al grado de complejidad cognitiva que tiene cada miembro del equipo; el ordenador se precisa bajo dos fases que se pueden dar en forma paralela y desordenada según cada integrante, cada momento de la fase puede visualizar al tiempo una forma abstracta metafórica desde lo ger-



Fig. 103. Paralelo del ordenador mental

minal y simultáneamente una fase práctica desde lo técnico. En la figura se observa un paralelo del ordenador.

Modelo de síntesis

A continuación se muestran veinte instrumentos de registro resumidos que se basan en este modelo, donde se exponen parte de las observaciones y los análisis que se hicieron dentro de la investigación, delimitando cada proceso con el respectivo nivel metodológico. Y al final se encuentran cuatro matrices donde se vinculan los resultados de cada uno de los análisis con las variables de modificación..

MODELO DE SÍNTESIS

Anturio Blanco / Spathiphyllum



Nivel 1

MODELO DE SÍNTESIS

Eriocaulis



Nivel 2

MODELO DE SÍNTESIS

Anturio Blanco / Spathiphyllum



Nivel 1

MODELO DE SÍNTESIS

Eriocaulis



Nivel 2

MODELO DE SÍNTESIS

Anturio Blanco / Spathiphyllum



Nivel 1

MODELO DE SÍNTESIS

Eriocaulis



Nivel 2

MODELO DE SÍNTESIS

Anturio Blanco / Spathiphyllum



Nivel 1

MODELO DE SÍNTESIS

Eriocaulis



Nivel 2

Fig. 104. Instrumento modelo de síntesis 1 y 2

MODELO DE SÍNTESIS

Bromelia fasciata / Aechmea



NIVEL 1

Descripción

Hojas con doble curvatura negativa, que se rotan y se repiten en orden ascendente. Crecen desde el centro de la planta. Poseen una estructura rígida, debido al tipo de configuración y a las propiedades de la superficie.

NIVEL 2

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 15 x 6 x 4 cm.
- Simetría: Radial y espejular.
- Dilataciones: no presenta
- Superficies: dobles curvaturas negativas.
- Patrón: Paraboloide hiperbólico

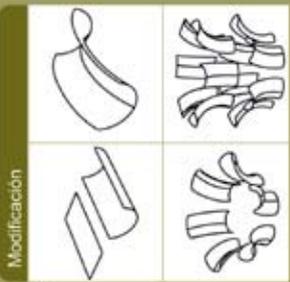
Síntesis geométrica



NIVEL 3

Investigador: Oscar Cubillos

Modificación



NIVEL 4

MODELO DE SÍNTESIS

Cactus / Ferocactus glaucescens



NIVEL 1

Descripción

El cactus esférico tiene 11 estrías, cada una de las cuales soporta otro cactus secundario con las mismas características pero diferente dimensión. Presenta una estructura en explosión, cuyas terminaciones son también explotadas, generando un modelo de ramificación.

NIVEL 2

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 10 x 10 x 5cm
- Simetría: Radial
- Dilataciones: Configuración global positiva.
- Superficies: dobles curvaturas
- Patrón: Estrías.

Síntesis geométrica



NIVEL 3

Investigador: Oscar Cubillos

Modificación



NIVEL 4

Fig. 105. Instrumento modelo de síntesis 3 y 4

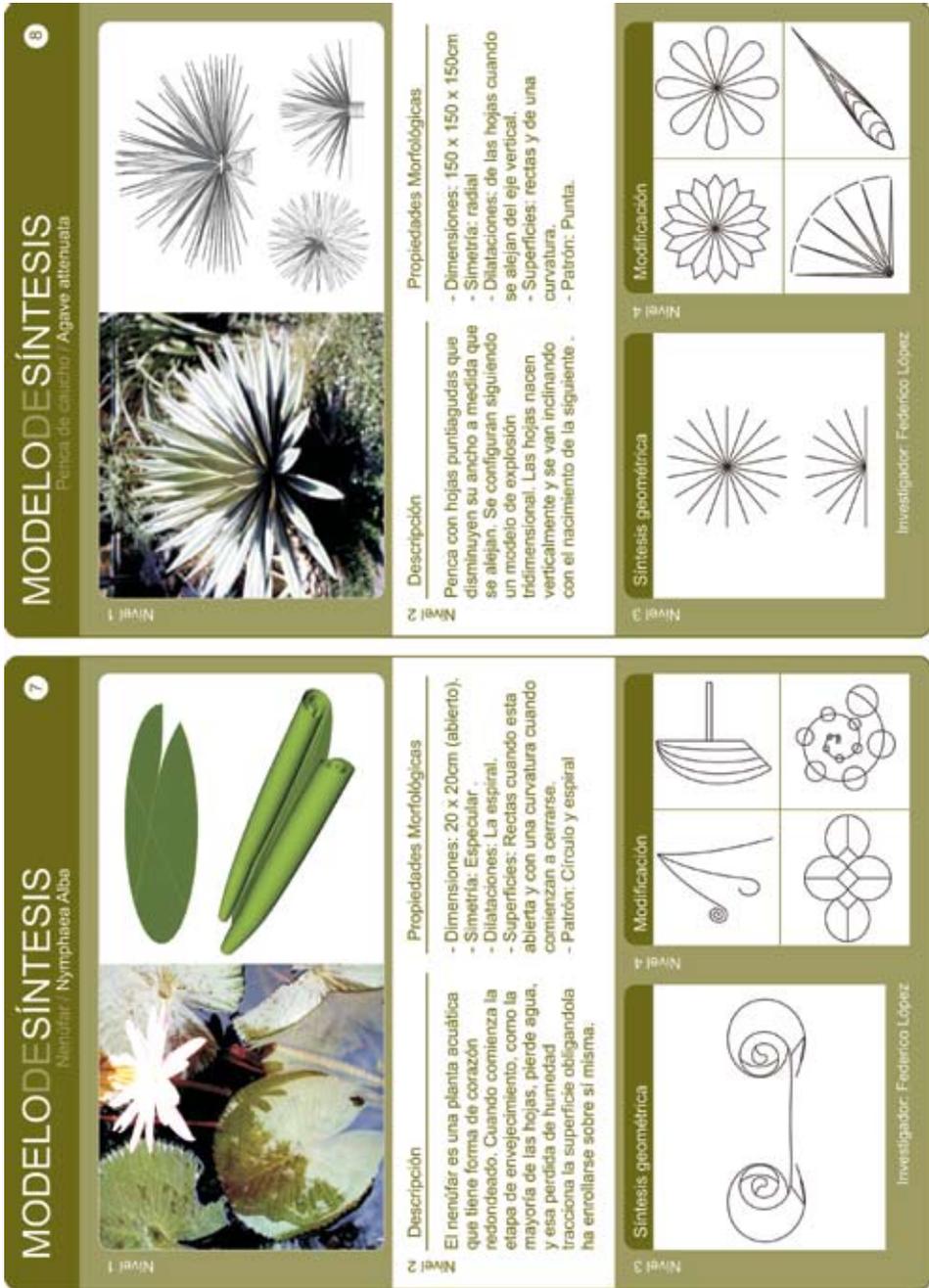


Fig. 106. Instrumento modelo de síntesis 5 y 6

7

MODELO DE SÍNTESIS

Nepenthes / Nymphaea Alba



Nivel 1

Descripción

El nenúfar es una planta acuática que tiene forma de corazón redondeado. Cuando comienza la etapa de envejecimiento, como la mayoría de las hojas, pierde agua, y esa pérdida de humedad tracciona la superficie obligándola a enrollarse sobre sí misma.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 20 x 20cm (abierto).
- Simetría: Especular.
- Dilataciones: La espiral.
- Superficies: Rectas cuando está abierta y con una curvatura cuando comienzan a cerrarse.
- Patrón: Círculo y espiral

8

MODELO DE SÍNTESIS

Peperca de calacho / Agave attenuata



Nivel 1

Descripción

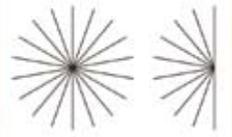
Peperca con hojas punsiagudas que disminuyen su ancho a medida que se alejan. Se configuran siguiendo un modelo de explosión tridimensional. Las hojas nacen verticalmente y se van inclinando con el nacimiento de la siguiente.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 150 x 150 x 150cm
- Simetría: radial
- Dilataciones: de las hojas cuando se alejan del eje vertical.
- Superficies: rectas y de una curvatura.
- Patrón: Punta.

Nivel 3

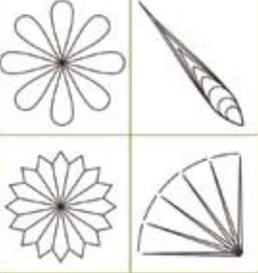
Síntesis geométrica



Investigador: Federico López

Nivel 4

Modificación



Nivel 3

Síntesis geométrica



Investigador: Federico López

Nivel 4

Modificación

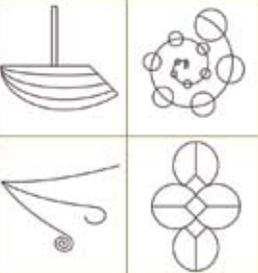


Fig. 107. Instrumento modelo de síntesis 7 y 8

MODELO DE SÍNTESIS

Palma cola de zorro / *Wodyetia bifurcata*



Nivel 1

Nivel 2

Descripción

Esta conformada por líneas curvas que giran en torno a un eje de simetría. Las curvas se van intercalando entre dos tipos de diámetro, formando "valles y montañas". Cada par de curvas están unidas por superficies de doble curvatura positiva.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 15 x 15 x 25 cm
- Simetría: radial en 180°
- Dilataciones: en los pliegues.
- Superficies: Dobles curvaturas positivas.
- Patrón: zig zag

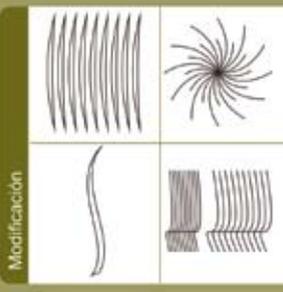
Nivel 3

Síntesis geométrica



Investigador: Federico López

Modificación



MODELO DE SÍNTESIS

Cascabel arrojado



Nivel 1

Nivel 2

Descripción

Este contenedor de semillas se abre para dejarlas caer al suelo. Cada configuración local está compuesta por secciones transversales curvas que crecen a medida que se acercan al centro del eje vertical, y se repiten radialmente cada 60°.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 15 x 15 x 7cm
- Simetría: radial
- Dilataciones: no presenta
- Superficies: Dobles curvaturas positivas
- Patrón: Cilindro.

Nivel 3

Síntesis geométrica



Investigador: Federico López

Modificación



Fig. 108. Instrumento modelo de síntesis 9 y 10

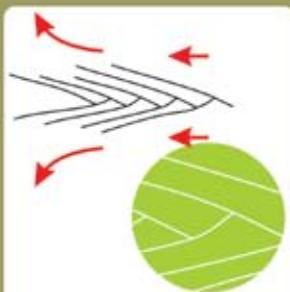
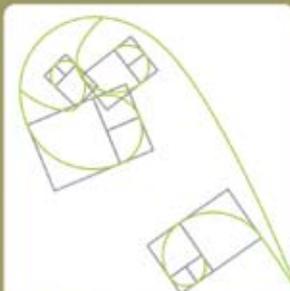
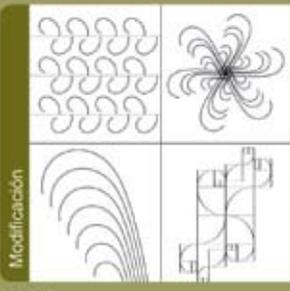
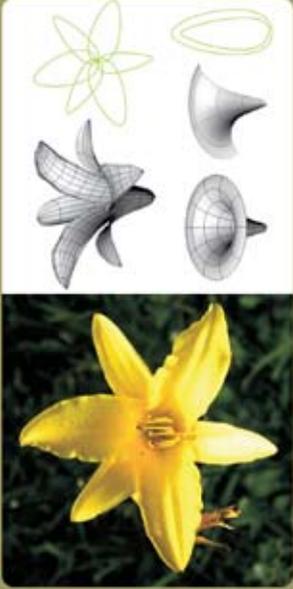
<p>11</p> <p>MODELO DE SÍNTESIS Palma piatamillo</p>  <p>Nivel 1</p>	<p>Descripción</p> <p>Se presenta un crecimiento basado en la dilatación y la simetría de traslación. Las ramas de esta planta van saliendo secuencialmente hacia arriba y luego se van extendiendo lateralmente.</p> <p>Propiedades Morfológicas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 40 x 20 x 300 cm - Simetría: traslación - Dilataciones: las configuraciones locales decrecen a medida que se alejan de la tierra. - Superficies: Dobles curvaturas positivas. - Patrón: zig zag 	<p>12</p> <p>MODELO DE SÍNTESIS Helecho</p>  <p>Nivel 1</p>	<p>Descripción</p> <p>El helecho tiene un crecimiento que está regido por la espiral de fibonacci, que implica crecer de manera exponencial a medida que se aleja de su centro. El patrón se va repitiendo a diferentes escalas.</p> <p>Propiedades Morfológicas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 7 x 4 x 0.5 cm - Simetría: radial con dilatación - Dilataciones: en las configuraciones locales - Superficies: Dobles curvaturas positivas - Patrón: Espiral. 	<p>Nivel 3</p> <p>Síntesis geométrica</p>  <p>Nivel 4</p> <p>Modificación</p>  <p>Investigador: Camilo Martínez</p>	<p>Nivel 3</p> <p>Síntesis geométrica</p>  <p>Investigador: Camilo Martínez</p> <p>Nivel 4</p> <p>Modificación</p> 
--	--	--	---	--	---

Fig. 109. Instrumento modelo de síntesis 11 y 12

MODELO DE SÍNTESIS

Azucena amarilla / Iris pseudacorus



Nivel 1

Nivel 2

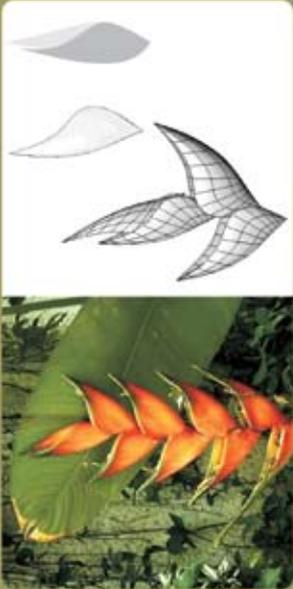
Descripción
Se observa como los pétalos de la flor forman triángulos con la unión de sus puntas. Los pétalos que tienen mayor antigüedad presentan una dilatación formal con respecto a los más jóvenes. La configuración global posee estructura cónica.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 11 x 10.5 x 9 cm
- Simetría: radial irregular
- Dilataciones: los pétalos
- Superficies: Dobles curvaturas negativas.
- Patrón: cono.

MODELO DE SÍNTESIS

Heliconia / Heliconiaceae Stricta



Nivel 1

Nivel 2

Descripción
La manera como crece la heliconia forma una complementariedad de dos elementos que crecen basados en una simetría especular que se trasladan. Las configuraciones locales poseen una superficie cónica que las ayuda a contener a las demás.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 35 x 20 x 4cm
- Simetría: especular y traslación
- Dilataciones: en las configuraciones locales
- Superficies: Dobles curvaturas positivas
- Patrón: conoides.

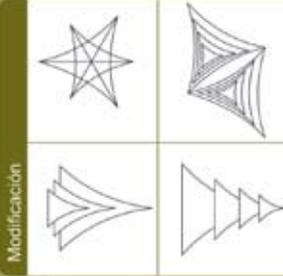
Nivel 3

Síntesis geométrica



Nivel 4

Modificación



Investigador: Camilo Martínez

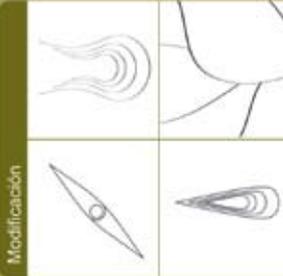
Nivel 3

Síntesis geométrica



Nivel 4

Modificación



Investigador: Camilo Martínez

Fig. 110. Instrumento modelo de síntesis 13 y 14

MODELO DE SÍNTESIS

Cactus / Cereus

16



Nivel 1

Nivel 2

Descripción

Este tipo de cactus se presenta regularmente con 5, 6, o 7 costillas, las cuales hacen las veces de soportes estructurales, y son el resultado de la necesidad de contener líquidos.

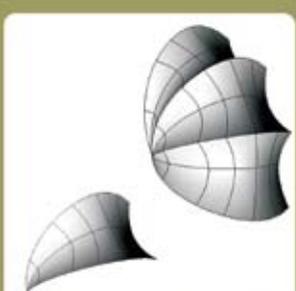
Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 12 x 12 x 110 cm
- Simetría: radial
- Dilataciones: no presenta.
- Superficies: Rectas y dobles curvaturas positivas.
- Patrón: pentágono.

MODELO DE SÍNTESIS

Yarumo / Cecropia telestiba

15



Nivel 1

Nivel 2

Descripción

El decrecimiento causa que la parte gruesa y fuerte conforme curvaturas abiertas y suaves. La superficie quebrada y delgada forma curvaturas agudas. El decrecimiento estimula la generación de dobles curvaturas.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 25 x 23 x 11 cm
- Simetría: radial
- Dilataciones: no presenta
- Superficies: Dobles curvaturas negativas
- Patrón: paraboloides hiperbólico.

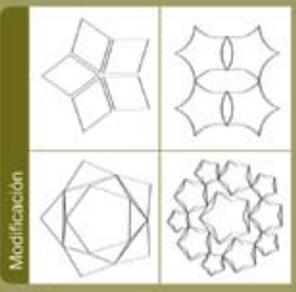
Nivel 3

Síntesis geométrica



Nivel 4

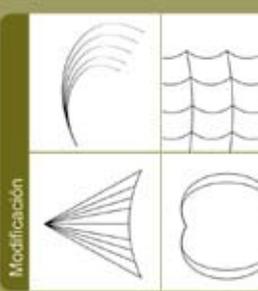
Modificación



Investigador: Camilo Martínez

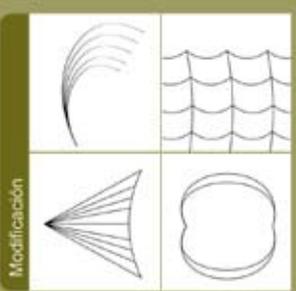
Nivel 3

Síntesis geométrica



Nivel 4

Modificación



Investigador: Camilo Martínez

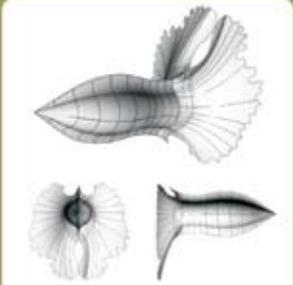
Fig. 111. Instrumento modelo de síntesis 15 y 16

MODELO DE SÍNTESIS

Orquídeas / Cattleya trianae



Nivel 1



Nivel 2

Descripción

Las semillas se protegen en un cuerpo cilíndrico, que al abrirse en los extremos comienza a ondularse en el borde hasta adoptar una línea sinuosa. En general es una configuración con superficies de una curvatura y dobles curvaturas positivas y negativas.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 6 x 10 x 8 cm
- Simetría: Especular
- Dilataciones: no presenta.
- Superficies: una curvatura, dobles curvaturas positivas y negativas.
- Patrón: líneas sinuosas.

Nivel 3

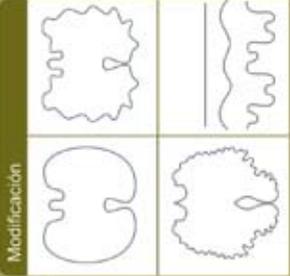
Síntesis geométrica



Investigador: Oscar Cubillos

Nivel 4

Modificación



MODELO DE SÍNTESIS

Guayacán rosado / Tabebuia rosae



Nivel 1



Nivel 2

Descripción

La forma ondulante de las ramificaciones se deben al principio de crecimiento diferencial, que son la evidencia del transporte interno de los nutrientes y de las influencias externas. Localmente son secciones de círculos que se rellenan.

Propiedades Morfológicas

- Dimensiones: 35 x 80 x 10cm (aprox. Cada rama)
- Simetría: traslación irregular
- Dilataciones: no presenta
- Superficies: Dobles curvaturas positivas y con una curvatura.
- Patrón: sección de círculo.

Nivel 3

Síntesis geométrica



Investigador: Oscar Cubillos

Nivel 4

Modificación

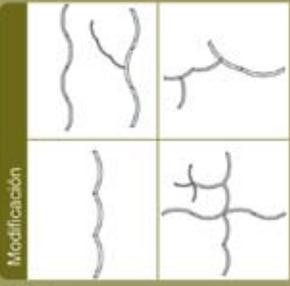


Fig. 112. Instrumento modelo de síntesis 17 y 18

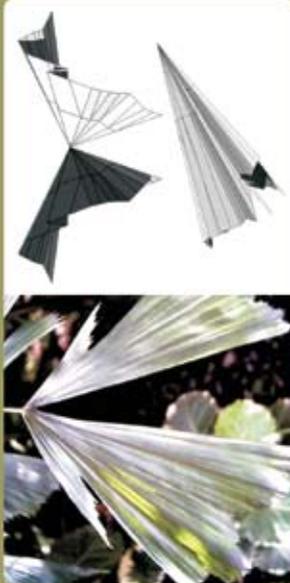
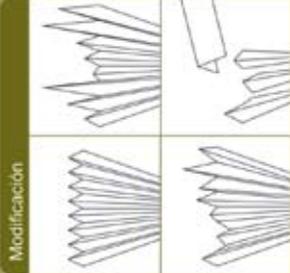
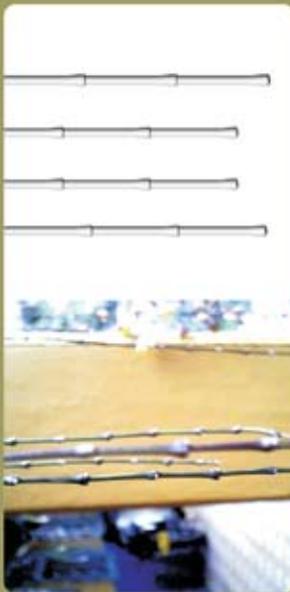
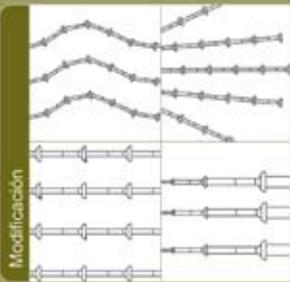
<p>MODELO DE SÍNTESIS Palma matriposa</p> <p>Nivel 1</p> 	<p>Nivel 2</p> <p>Descripción</p> <p>La hoja de esta palma tiene pliegues agudos que poseen diferentes longitudes y están a lugar a puntas en los extremos de éstos.</p> <p>Propiedades Morfológicas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 20 x 8 x 3 cm - Simetría: Especular - Dilataciones: no presenta. - Superficies: rectas. - Patrón: líneas en zig zag. 	<p>Nivel 3</p> <p>Síntesis geométrica</p>  <p>Investigador: Oscar Cubillos</p> <p>Nivel 4</p> <p>Modificación</p> 
<p>MODELO DE SÍNTESIS Thunbergia / Thunbergia</p> <p>Nivel 1</p> 	<p>Nivel 2</p> <p>Descripción</p> <p>Al poseer los tallos de esta planta formas muy esbeltas, deben generar protuberancias aproximadamente cada 3cms para desarrollar la estructura necesaria. Se configuran como columnas delgadas encadenadas.</p> <p>Propiedades Morfológicas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones: 0.4 x 0.4 x 100cm - Simetría: traslación - Dilataciones: las configuraciones locales cambian de escala. - Superficies: predominan las superficies con una curvatura. - Patrón: cilindro. 	<p>Nivel 3</p> <p>Síntesis geométrica</p>  <p>Investigador: Oscar Cubillos</p> <p>Nivel 4</p> <p>Modificación</p> 

Fig. 113. Instrumento modelo de síntesis 19 y 20

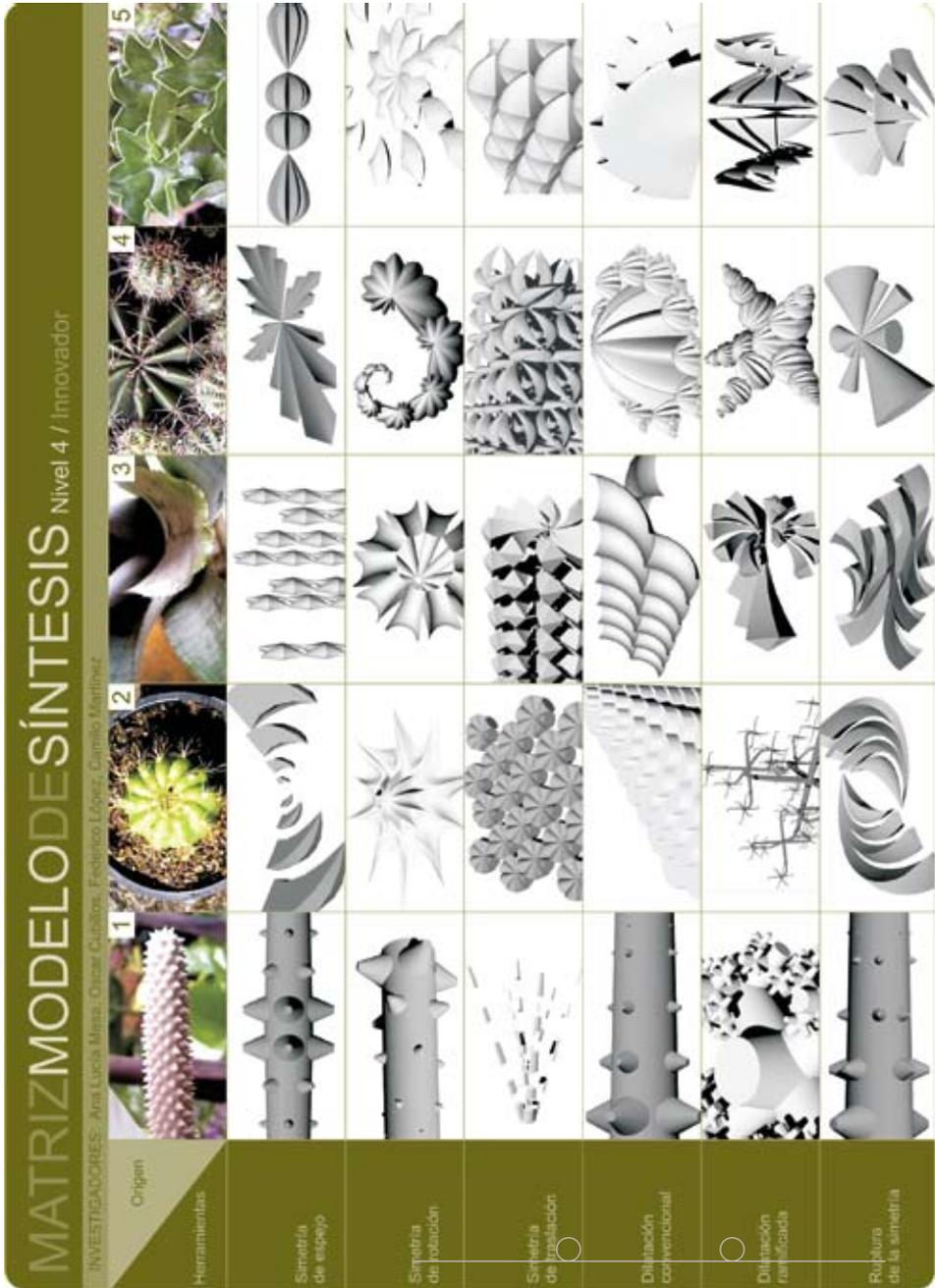


Fig. 114. Matriz modelo de síntesis 1

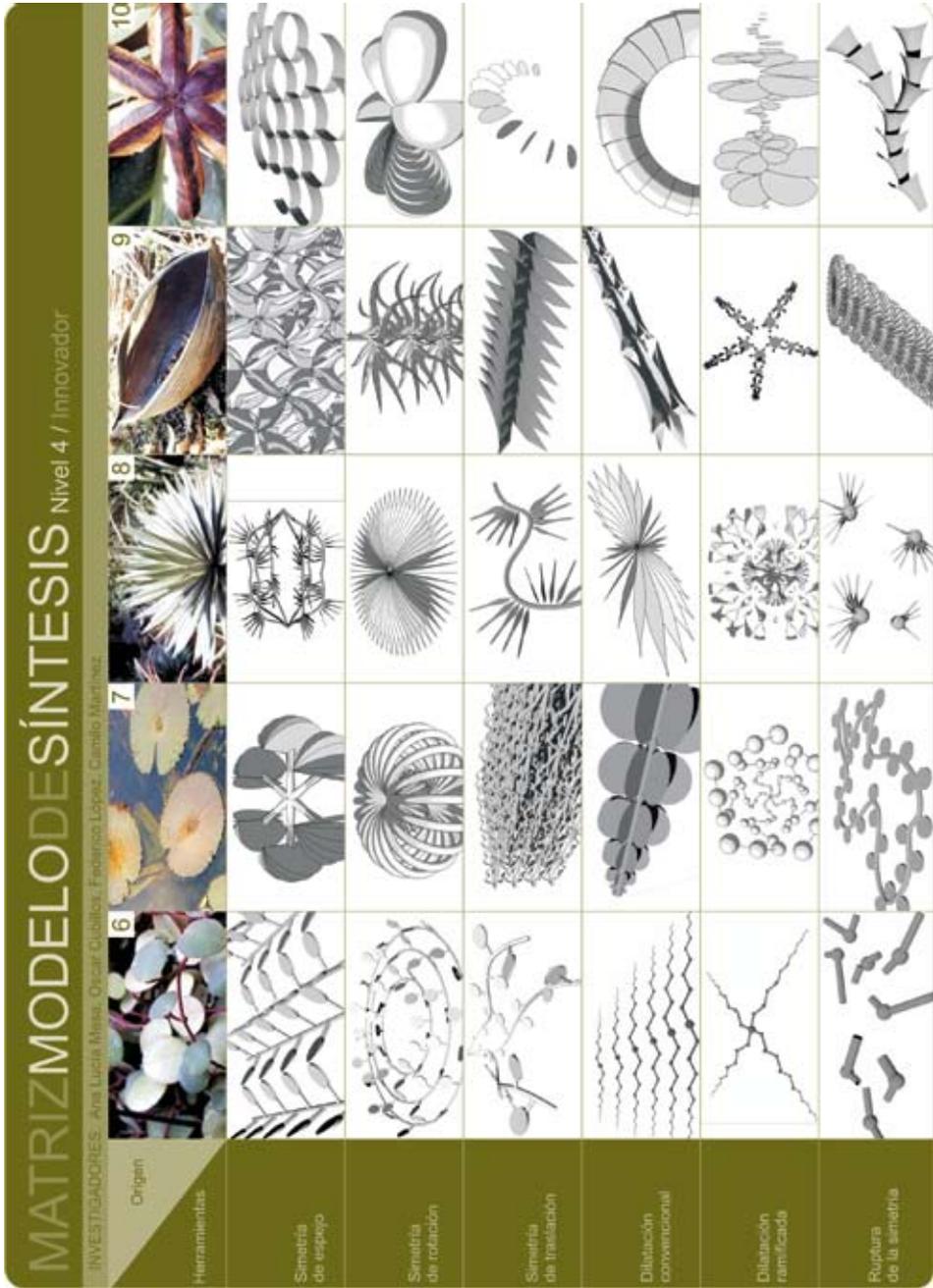


Fig. 115. Matriz modelo de síntesis 2

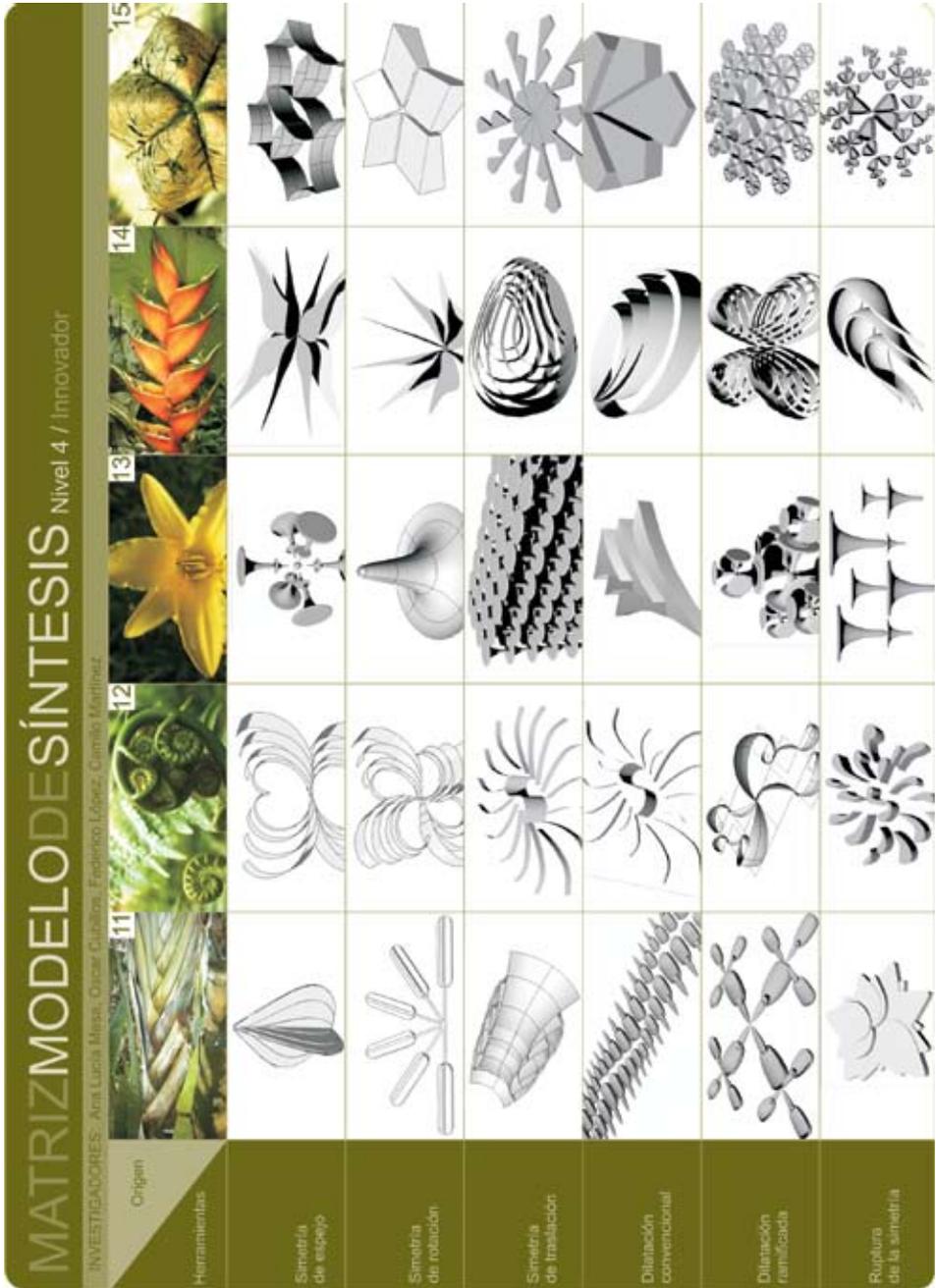


Fig. 116. Matriz modelo de síntesis 3

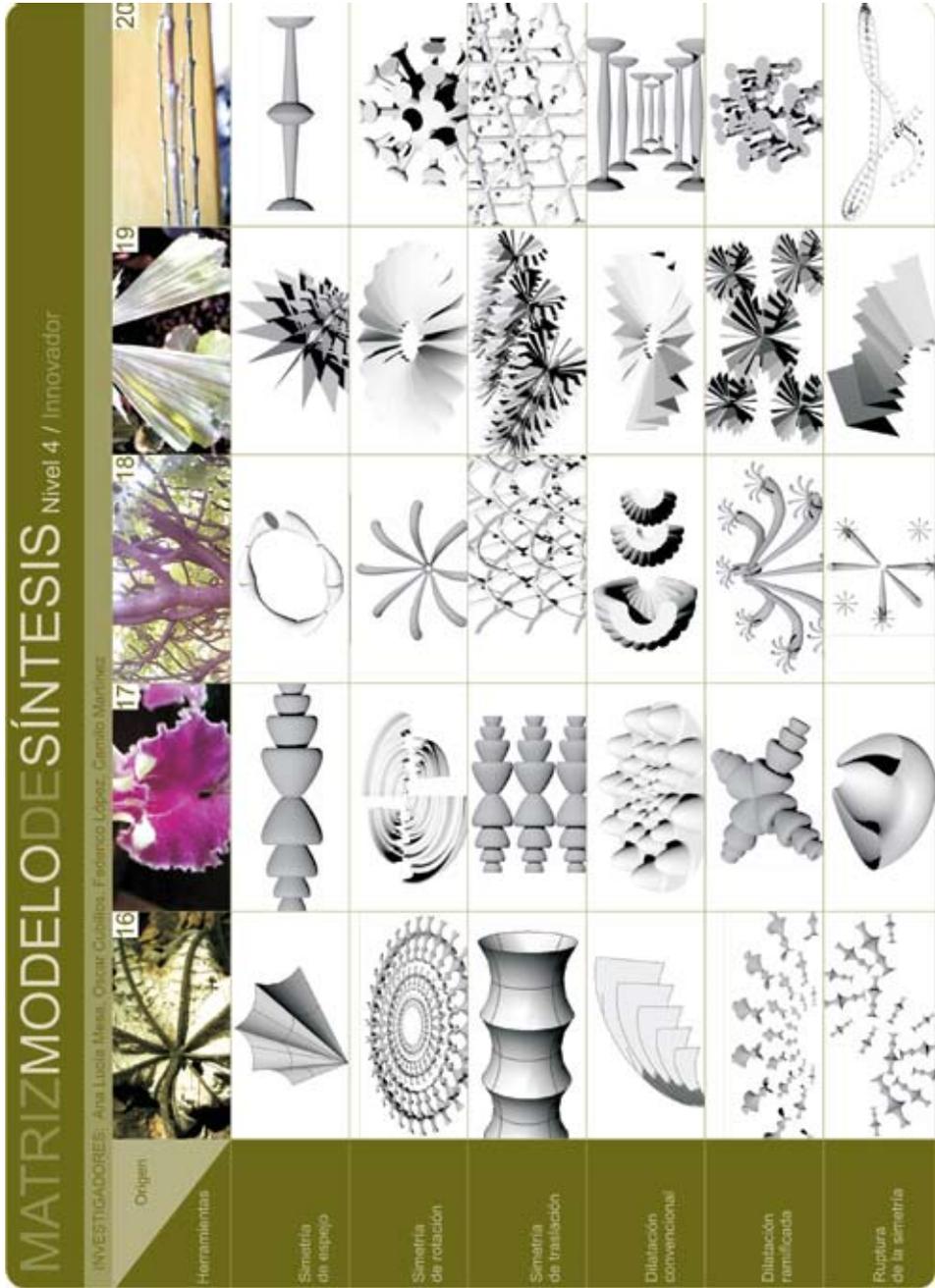


Fig. 117. Matriz modelo de síntesis 4

Modelo de crecimiento

A continuación se muestran algunos de los estudios y desarrollos que se hicieron utilizando el modelo de crecimiento, aunque sólo se puede observar la etapa 4 de los análisis, que corresponden al nivel innovador y propositivo.



Fig. 118. Instrumento modelo de crecimiento 1 y 2

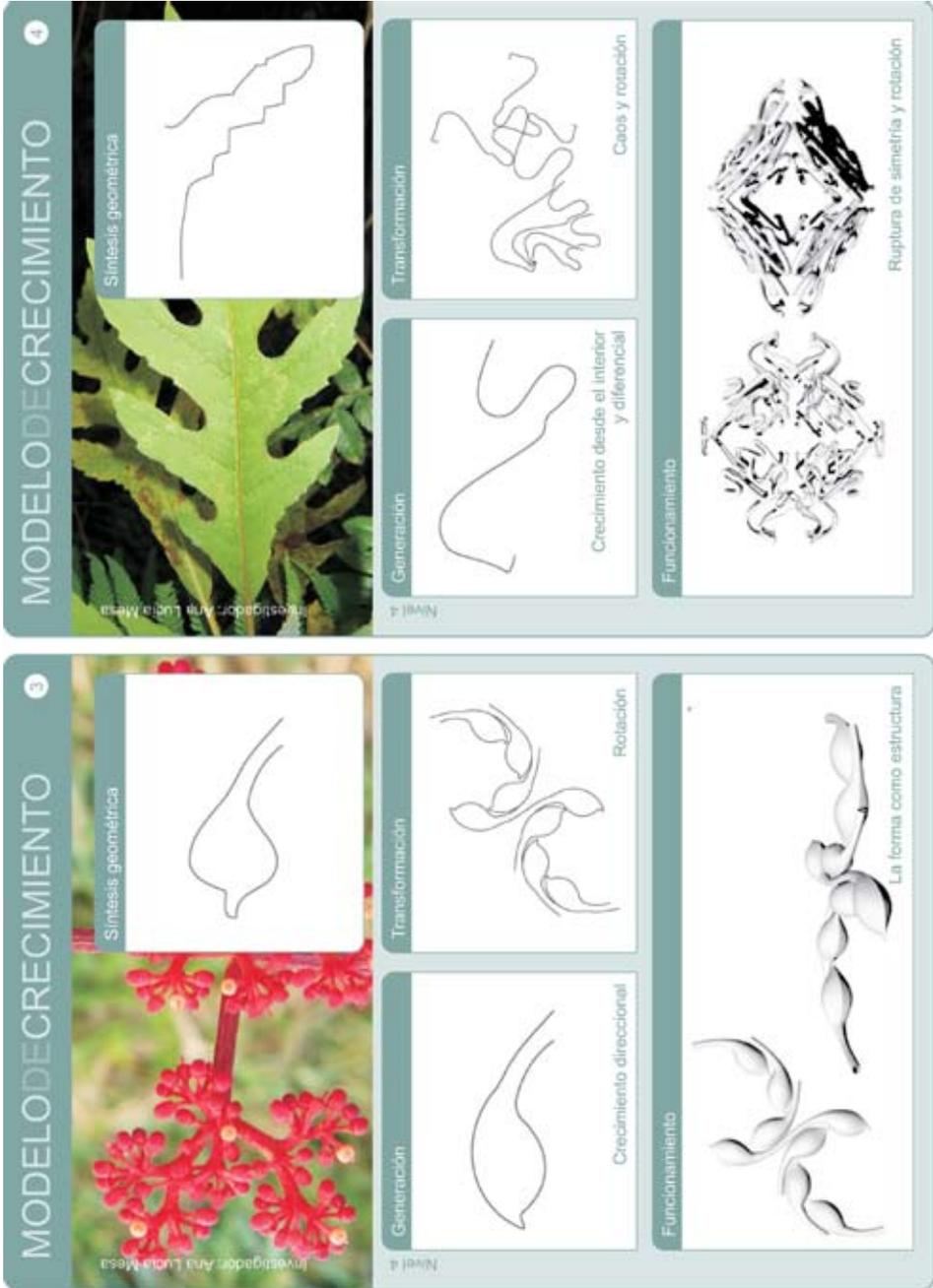


Fig. 119. Instrumento modelo de crecimiento 3 y 4

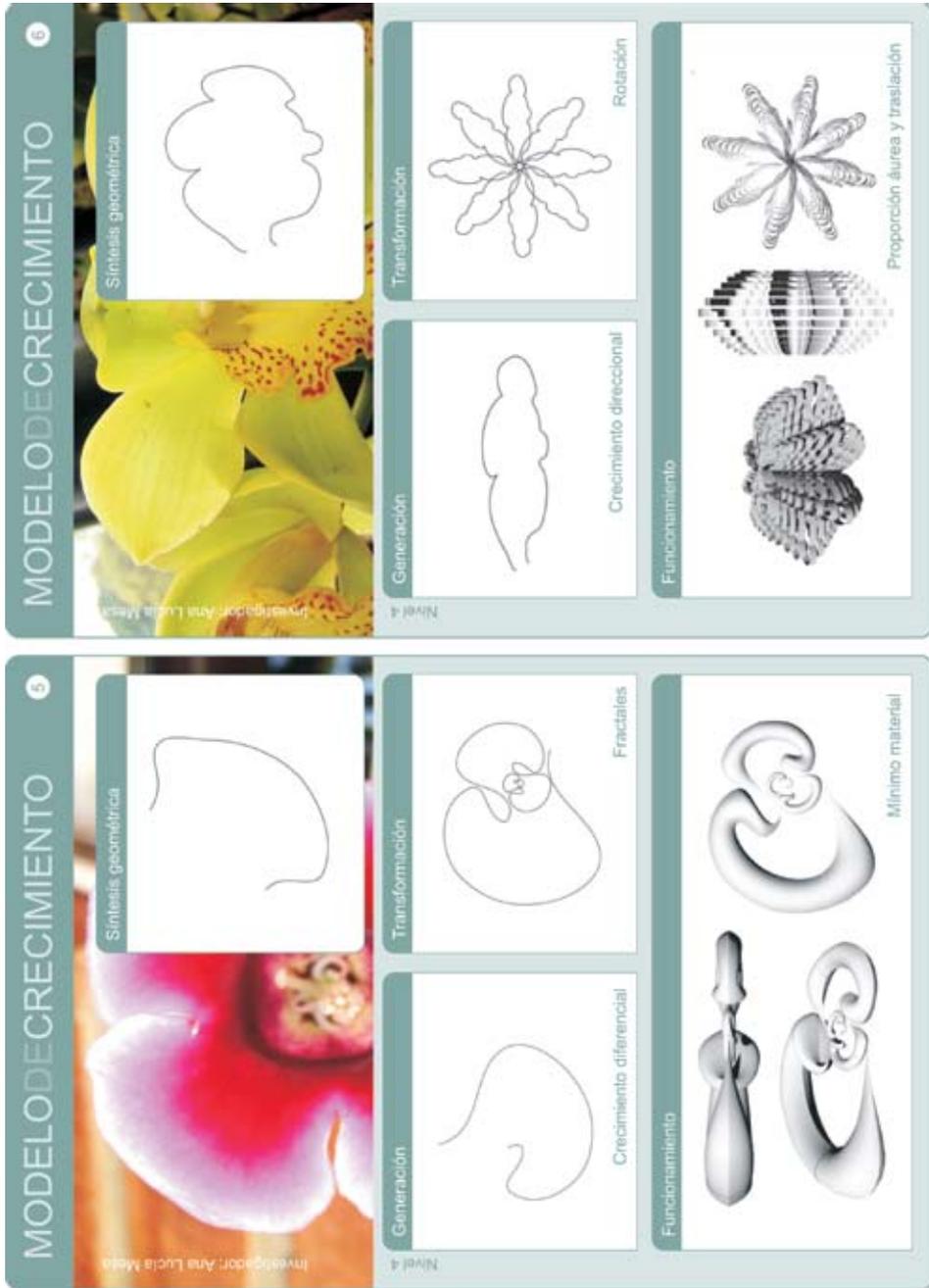


Fig. 120. Instrumento modelo de crecimiento 5 y 6

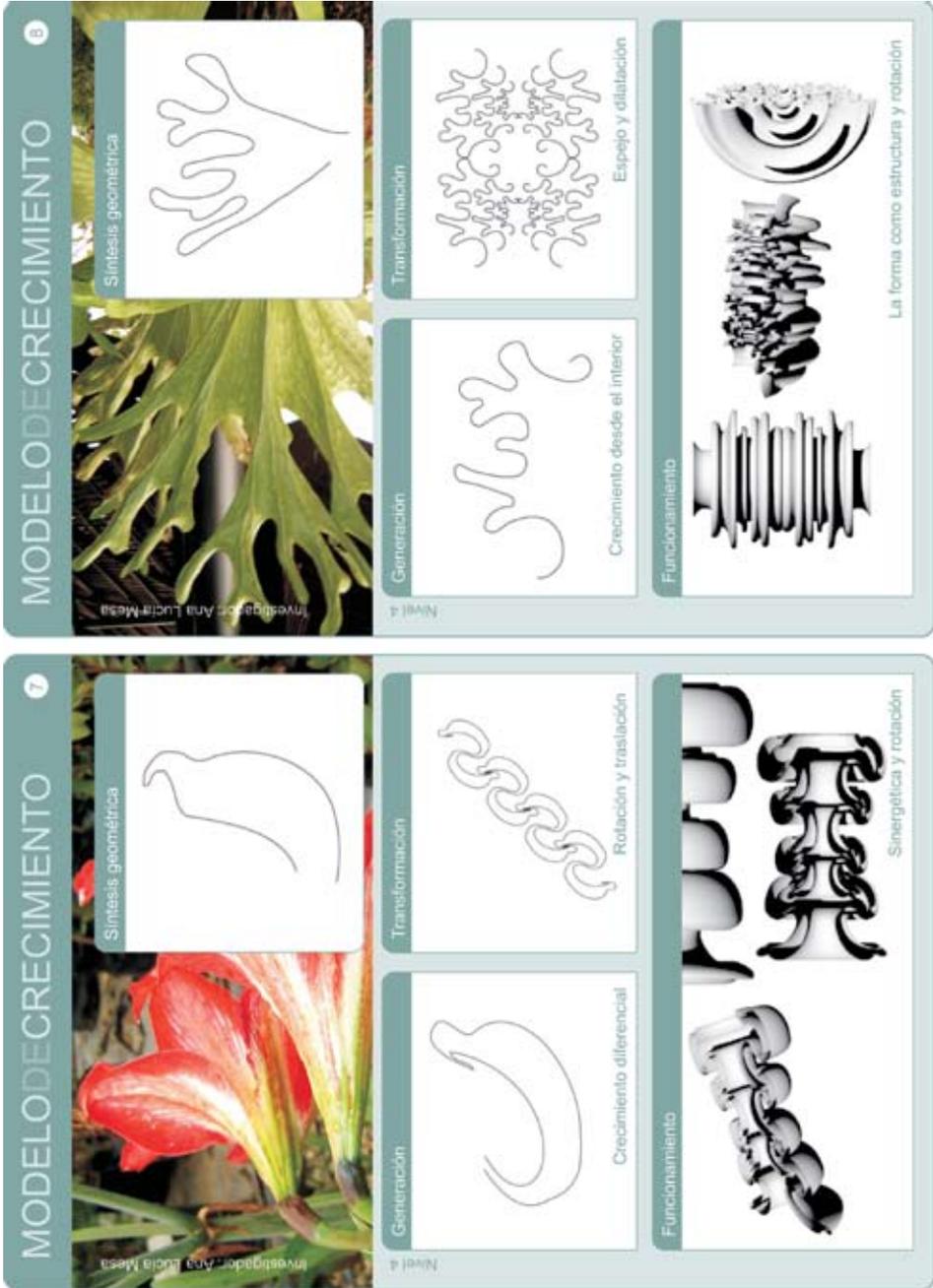
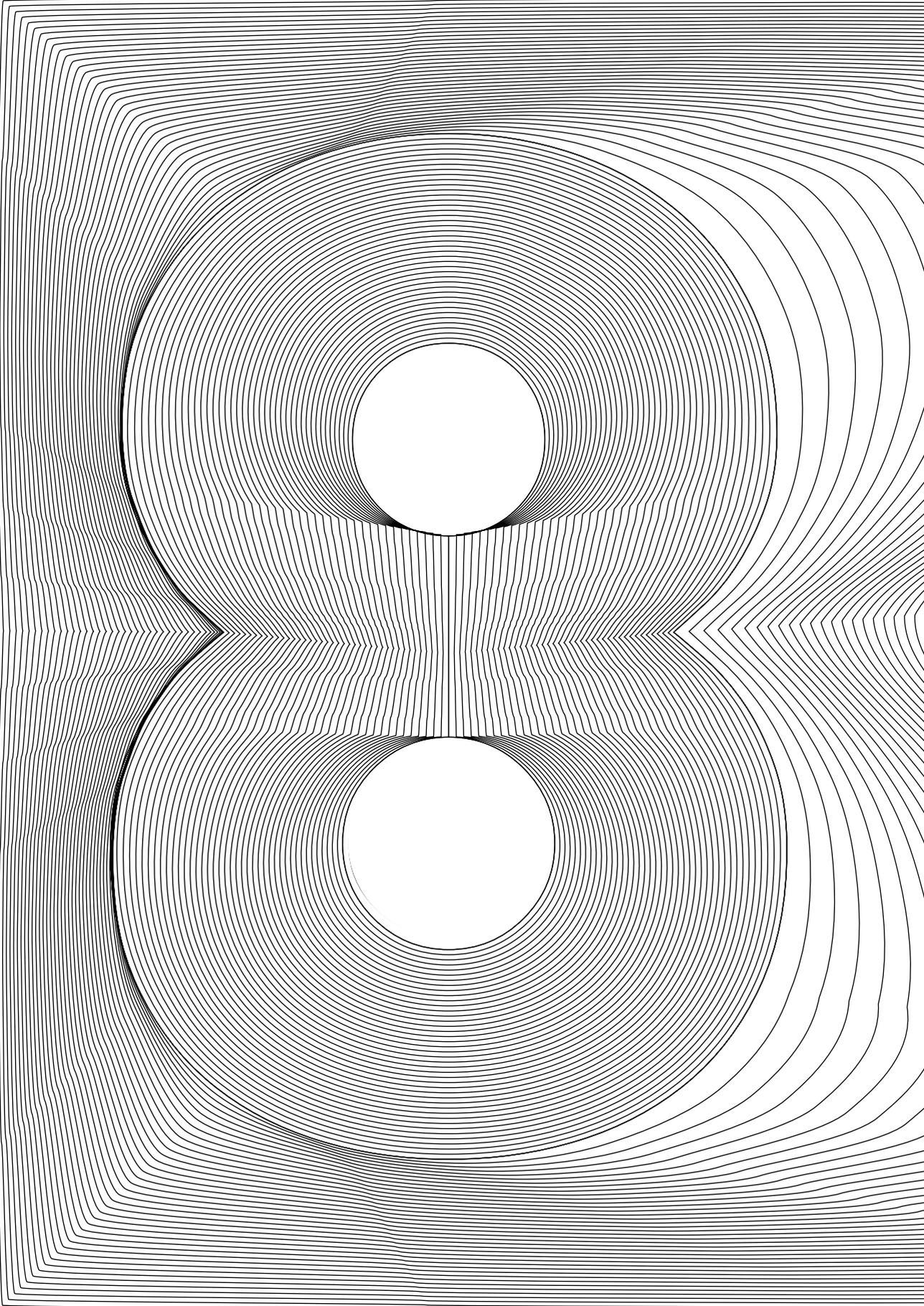


Fig. 121. Instrumento modelo de crecimiento 7 y 8



The background of the image is a complex, abstract pattern of numerous thin, black, curved lines. These lines are arranged in a way that creates a sense of depth and movement, resembling a stylized, flowing shape that could be interpreted as a large, open letter 'C' or a similar organic form. The lines are most densely packed in the center and become more sparse towards the edges, creating a gradient effect. The overall composition is clean and modern, with a strong emphasis on geometric and organic forms.

La forma en la construcción humana

The background of the page is composed of numerous thin, curved lines that flow from the top left towards the bottom right, creating a sense of movement and depth. The lines are more densely packed in some areas and more sparse in others, creating a gradient effect.

La mayoría de los factores que inciden en los cambios de la naturaleza se han dado históricamente por la manipulación del hombre, desde lo más artesanal y primitivo hasta pasar y alcanzar los límites de la tecnología. La historia de la evolución del mundo presenta un espectáculo moldeado frente a las formas y los cuerpos, presentados como estructuras funcionales básicas y fundamentales para la construcción y materialización de los objetos o artefactos cotidianos, es decir, formas que han superado la selección cultural.

Todo a nuestro alrededor, y en sí, el mundo como tal, deja divisar que algunas veces las ideas y los conceptos toman forma. Si se piensa el hombre a sí mismo, se ve como un conjunto de células que se entretajan unas con otras para formar un sistema; de la misma manera las moléculas de los elementos se reúnen para ir formando estructuras que dan origen posteriormente a los materiales. Ahora bien, en esta dimensión de los crecimientos estructurales y en la percepción que el hombre tiene del mundo, es lógico decir que los seres humanos conocen el mundo porque lo ven a través de sus formas, que se generan paso a paso en el tiempo desde lo más simple y esencial hasta llegar a hacer organizaciones o estructuras muy complejas; es aquí donde es importante teorizar que a través de estos acontecimientos el ser humano aprendió a aprehender y logró con la observación reconocer los elementos, como también inspeccionó las características que lo formaban, con lo cual finalmente concluyó que todo lo que está en el Universo surgió espontáneamente en el principio del tiempo desde su propia complejidad y orden y que a través de sus leyes naturales se imponía lentamente la creación de nuestro cosmos.





Fig. 122. Diferentes tipos de aletas

Pero así como el hombre reconocía las formas y las estructuras en el espacio, también se hacía necesario reflexionar sobre el hombre y su acontecer en el mundo de las cosas. André Ricard²³ en la aventura creativa habla sobre el tema del proceso evolutivo, y hace la siguiente acotación: <<Si repasamos los mecanismos que la naturaleza aplica en su evolución, descubrimos que el hombre, al crear todo lo que configura su entorno artificial, ha seguido las mismas pautas (aunque no tan eficientemente) de la naturaleza>>. Estas pautas naturales son las mismas que hoy se utilizan para articular los sistemas, a través de los cuales el hombre realiza la construcción y desarrollo de los objetos, sus aplicaciones son variadas en su morfología. Las aletas para bucear de la figura 122, por ejemplo, es un claro ejemplo de cómo el mismo requerimiento es solucionado por la naturaleza y por el hombre de la misma manera, el punto del que difieren las dos aplicaciones, es que en el mundo generado por el hombre existen otros factores que influyen de un modo no tan óptimo la forma resultante, los cuales pueden ser la moral, la emoción, el comercio, la necesidad de lucro, ninguno de los cuales esta inserto en los principios de crecimiento natural.

No se presenta una sola mirada para reconocer los cambios que genera la evolución y transformación de la naturaleza, ellos son muchos y múltiples, podemos decir que la huella impuesta por la artificialidad en el tiempo da fe de las permutaciones que se van generando desde el comienzo de la humanidad. La evolución tecnológica nos da como resultado los avances universales con aportes significativos para el diseño, también es importante anotar que la marca que adquieren los objetos modificados permiten lecturas e interpretaciones de la cultura a la que pertenecen.

Hoy hablar de la evolución de lo artificial –observa nuevamente Ricard²⁴–, <<...se puede comparar con la materia viva, ya que la evolución de lo que el hombre crea es también el resultado de una incesante transformación de las cosas que ya existen, donde el resultado de estas cosas representan la huella del hombre en una cultura en espacio y en un tiempo>>.

23. RICARD, André. La aventura creativa Barcelona: Ariel, 2000. p.11

24. RICARD, Op. Cit. Pág.21

Es por esto que no es posible desconocer la importancia que deja el paso del tiempo en la cultura; ésta irrumpe drásticamente la transformación de los objetos, donde la lectura en primer lugar histórico-genética (morfogénética), se presenta como un análisis que busca explicar el origen y las causas tanto materiales como sociales y culturales de los objetos, y que en un segundo momento, también desde su morfología, busca la exploración de su configuración y sus propiedades formales. En la figura 123 se puede ver ese paso del tiempo, tanto en las configuraciones locales como en las globales, y además en las propiedades interiores, exteriores y de frontera.

Al contemplar la naturaleza entonces, se tiene como resultado que las estructuras naturales se repiten y se producen espontáneamente, siendo estas las que permiten identificar las manifestaciones dentro de la cultura humana, donde la artificialidad comienza a tener una expresión más clara en busca de algunos casos de calidad de vida, que investiga sobre la resignificación de las formas y a su vez posibilita su creación, modificando con ello el mundo del diseño y su entorno.

La idea que plantea Tomás Buch sobre el naturfacto es interesante cuando se refiere a las formas naturales con un valor artificial. Aclara Buch que si se piensa en un objeto natural, como una rama o una piedra, se transforma en objeto tecnológico al ser resignificado como herramienta, teniendo en cuenta que desde la historia (revolución neolítica) se dan continuamente resignificaciones.



Fig. 123. Diferencias interiores y exteriores de relojes en el tiempo

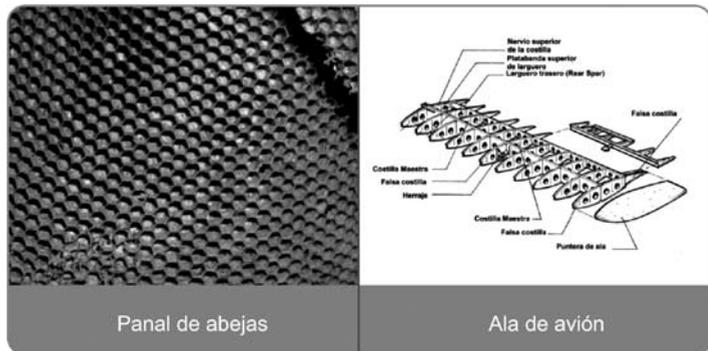


Fig. 124. La estructura interna del ala del avión, basada en el principio del panel de abejas, actúa como herramienta para hacer funcionar correctamente el avión.

25. Dice Tomás Buch en el texto *Sistemas Tecnológicos: Un objeto natural como una rama o una piedra, se transforma en Objeto Tecnológico ("Naturfacto") al ser resignificado como herramienta.* p.30.

Este *paneo* por la naturaleza nos muestra cómo el hombre la utiliza para su beneficio, no siempre de la manera más precisa y eficiente, retomando estructuras, materiales y formas, y poniéndolas a disposición de su ingenio; y es aquí, en el momento de lo creativo, en que entra la tecnología como la herramienta que posibilita la materialización. Él hombre entonces se encarga de la tecnología y plantea la utilización de la técnica, él como habitante del Universo se presenta como informador del ambiente que se mueve, y es quién dispone del espacio, determinando el papel que deben desempeñar finalmente los objetos creados por éste.



Fig. 125. Estructura, sistema y objeto

La forma natural con tecnología humana

Pensar sólo lo natural sin la combinación tecnológica sería una utopía. El hombre, inscribiéndolo o circunscribiéndolo en el mundo de las cosas, está atravesado por la esencia de lo natural, y cuando se vincula con la civilización humana, él, tiene que tener en cuenta que la tecnología es el eje transversal que va marcando y marcará siempre la pauta en la evolución misma de las sociedades en las que diariamente interactúa. (Ver figura 126)



Fig. 126. Transformación de herramienta de corte



Fig. 127. Automóvil solar

También se debe hablar de la evolución y el sentido de adaptación de la evolución natural; aquí se tendría que definir el concepto de forma natural y el concepto de tecnología adaptada por el hombre, para comprender la función que tiene en la <<fabricación de las formas culturales>>, donde los conceptos físicos, matemáticos, empíricos, entre otros, muestren el camino para las experiencias, formalización que se da a través de modelos experimentales.

El concepto de natural lo definimos como aquello que por esencia es así y sólo así; esta situación de natura no recibe ninguna causa que motive su cambio formal, estructural o funcional; según la teoría aristotélica <<la natura es el elemento primario del que está hecho un objeto o del cual proviene>>. Esta reflexión nos obliga a pensar sobre el concepto de naturaleza o materia en su más profunda idea. Si la observamos como mayor detenimiento notaríamos los cambios que espontáneamente genera, como el crecimiento, parte de su propia esencia. También podríamos encontrar que el mismo ambiente de forma extrínseca la puede transformar naturalmente adaptándola a un ambiente en particular.

Por lo tanto, la existencia de lo artificial no es un experimento, hoy es una realidad; esta artificialidad es la que diferencia al hombre de las demás especies de la naturaleza, como mostró en su teoría Darwin²⁶: <<...que, como especie, no éramos una entidad invariable creada en nuestra condición actual, sino el resultado de una larga historia evolutiva de los seres vivos>>. Además, el principio fundamental teórico al que llegó, planteaba que <<...la lucha por la existencia en el mundo orgánico dentro de un ambiente cambiante engendra alteraciones orgánicas en el curso de las cuales sobreviven sólo los más aptos, los cuales transmiten a sus descendientes las modificaciones que han resultado victoriosas. Y así, es como se produce la selección natural>>.

26. MORA, J. Ferrater. Diccionario de filosofía tomo I (A-D) Barcelona: Ariel, 2004. p 774



Fig. 128. La artificialidad de la madera, en primer momento, responde a la solución de necesidades básicas, como la canoa que necesita el hombre para transportarse y buscar alimento. Pero en segundo momento, y no necesariamente en sentido cronológico, responde a necesidades emotivas, afectivas o religiosas.

Ahora, al analizar el término tecnología, como concepto ideal, habría que decir que se presenta como una actividad en continua búsqueda para el mejoramiento y la calidad de vida, en donde el funcionalismo de los artefactos, el formalismo y el estilismo se dan como una amalgama en busca de generar el objeto ideal, en combinación de su dimensión semántica, sintáctica y pragmática.

Según Tomás Buch,²⁷ la reflexión, racional o mítica acerca del estar en el mundo está implícita en casi todas las manifestaciones de la cultura humana. Y agrega: <<la existencia de lo artificial es aceptada como hecho elemental de nuestro ser como humanos>>. (Ver figura 128)

Entonces, si se piensa en la naturaleza del hombre como Homo faber, se debería comenzar por comprender el alcance y la capacidad de creación de objetos y artefactos que éste tiene; el hombre al estar en el mundo intenta controlarlo y fundamentalmente lo va transformando para su provecho y comodidad, que en muchos casos no responde a necesidades reales o relevantes, sino solamente creadas por la misma cultura, donde esta él inserto (ver figura 128).

Si se une el concepto de esencia y el concepto de actividad, se obtiene como resultado la inmanencia de la naturaleza articulada a la creatividad del pensamiento humano, que busca la producción finalmente de conocimiento, conocimiento que se representa en constructos para el hombre. Esta producción en simultáneo de constructos es el resultado de la observación y la copia que el hombre ha realizado de la natura durante el tiempo de evolución del mundo. La función cultural que el hombre técnicamente realiza sobre los <<objetos>> se da con la combinación de la natura, de la naturaleza y la tecnología (ver figura 129).

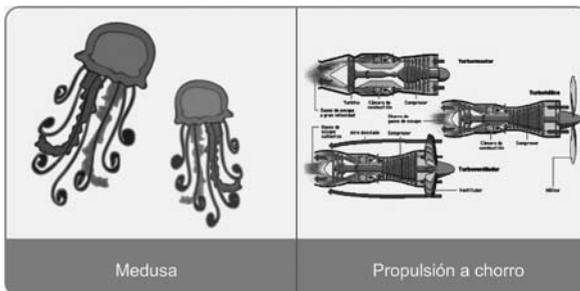


Fig. 129. El principio del movimiento de las medusas es el mismo que actualmente se utiliza en la propulsión a chorro.

27. BUCH, Tomás. Sistemas tecnológicos. Contribuciones a una teoría general de la artificialidad. Argentina: AIQUE, 1999. p. 19

Ahora bien, la tecnología humana involucra los conocimientos aplicados de múltiples investigaciones que en su momento sólo fueron experimentales, pero que con el avance de la ciencia y la tecnología fue posible su materialización en productos y artefactos, que posteriormente, en algunos casos fueron evaluados por el hombre de manera objetiva.

Hasta el momento se han aclarado ideas en un acercamiento al concepto sobre la forma natural con tecnología humana; en la figura 130 se identifican formas naturales y estructuras naturales transformadas en estructuras tecnológicamente reinterpretadas.

Una primera conclusión acerca de la esencia de lo artificial puede surgir observando la morfología de los naturfactos: en el sistema funcional de los objetos, representación dada a través de analogías que muestran el esquema estructural evolutivo del objeto, el dinamismo estructural implícito en éste está enmarcado dentro del sistema cultural al que pertenece.



Fig. 130. Proceso de la forma reinterpretada

Desde entornos tradicionales ver figura 131.

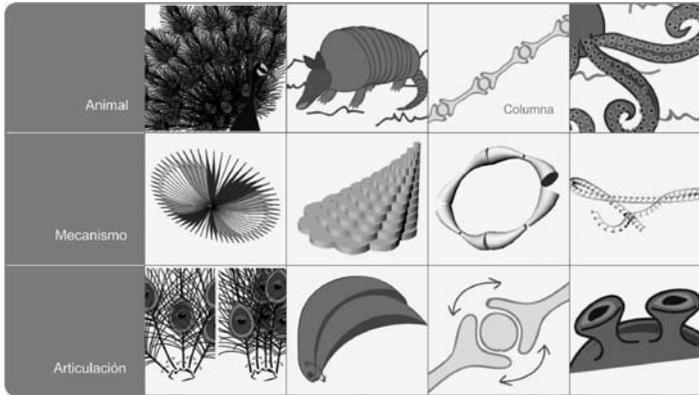


Fig. 131. El animal, su mecanismo, y su articulación.

Se puede entonces definir desde esta óptica que el concepto histórico de la tecnología cambia y evoluciona de acuerdo con condiciones fundamentales que lo afecten, como pueden ser cambios físicos, químicos, bioclimáticos, entre otros; pero la condición más reveladora se da a través de los cambios en la génesis de las estructuras que finalmente son las que van a determinar la funcionalidad propia de los naturfactos.

Una segunda conclusión también sería apreciar algunas estructuras adaptativas que se manifiestan como prótesis o extensiones que generan otras alternativas estructurales a los objetos, articulándose dentro de su sistema, procurando un uso funcional perfecto, que pueden multiplicar las capacidades de uso y subsanar las carencias de las funciones para las cuales pueden ser utilizadas.



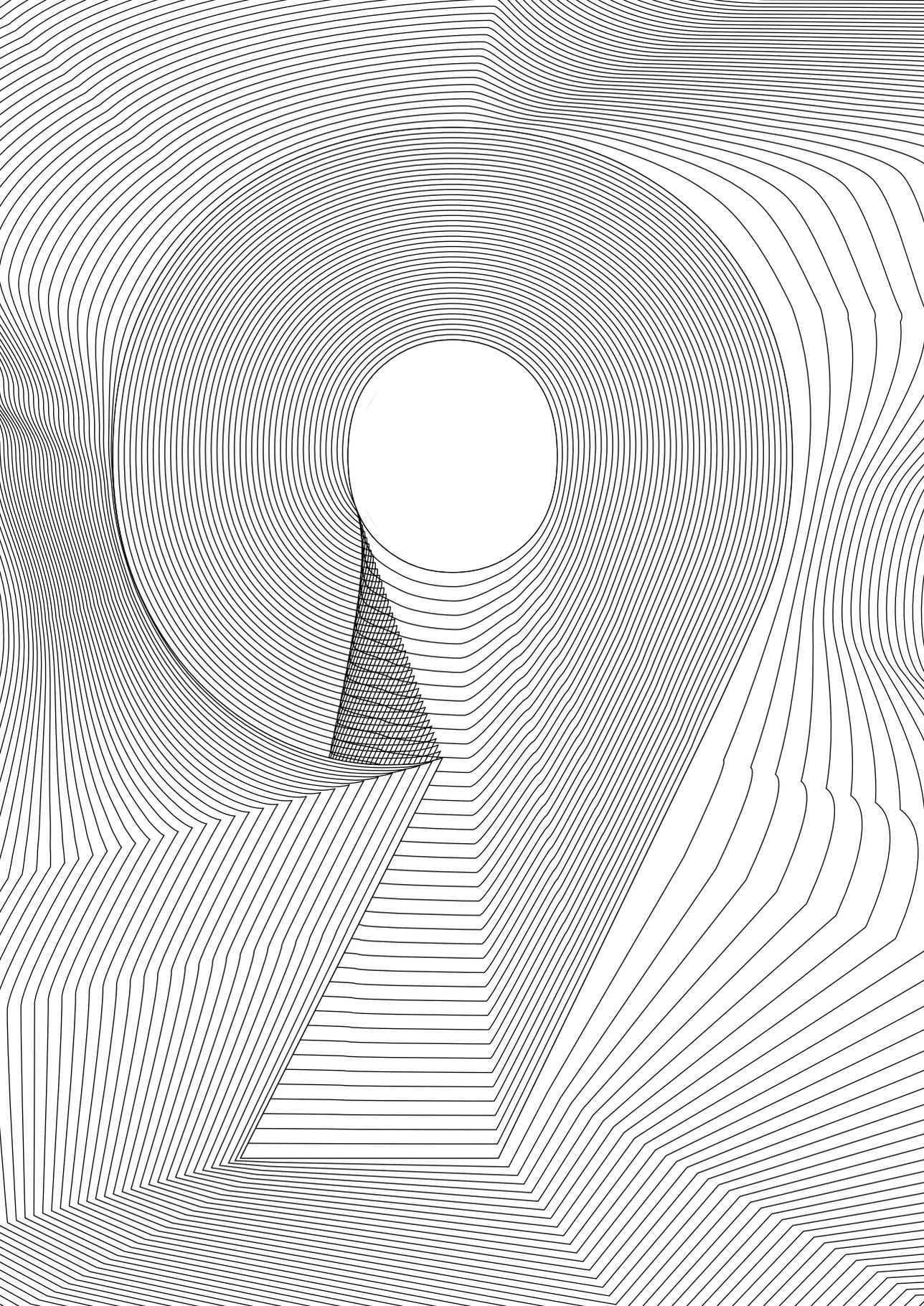
Fig. 132. Prótesis.

Puede percibirse cómo estos ejemplos se articulan y dominan los comportamientos de los seres humanos dentro de las diferentes culturas tratando estos avances de contribuir con el bienestar de los individuos.

Mario Bunge, con un pensamiento positivista y pragmático interpreta el concepto de la tecnología como vehículo del progreso material, definiendo el momento de la tecnología como una ciencia aplicada, que domina todos los ámbitos donde se desenvuelven las culturas, pero siendo objetivos, se puede prestar y ver que la tecnología no siempre está vinculada al progreso material, o ese progreso material algunas veces no responde en realidad a mejorar la calidad de vida de las personas, y mucho menos del planeta, mostrándose contradictoria las palabras: desarrollo más alta tecnología.

En conclusión y como dice Ortega <<.el humano adapta el mundo a sí mismo, en vez de adaptarse a él como hacen los animales a través de la evolución>>²⁸, esta reflexión nos pone a deliberar, en el ideal, de utilizar los principios de la naturaleza y la tecnología, para que las formas ya establecidas sean reconocidas como patrones para la adaptabilidad y beneficio del hombre. La invitación es entonces a no ignorar lo que la naturaleza ha dicho a través de sus formas y estructuras, y no desconocer todo el bien que puede ocasionar el uso adecuado de la tecnología siendo respetuosos con el ecosistema.

28. BUCH, Op. Cit. Pág. 39



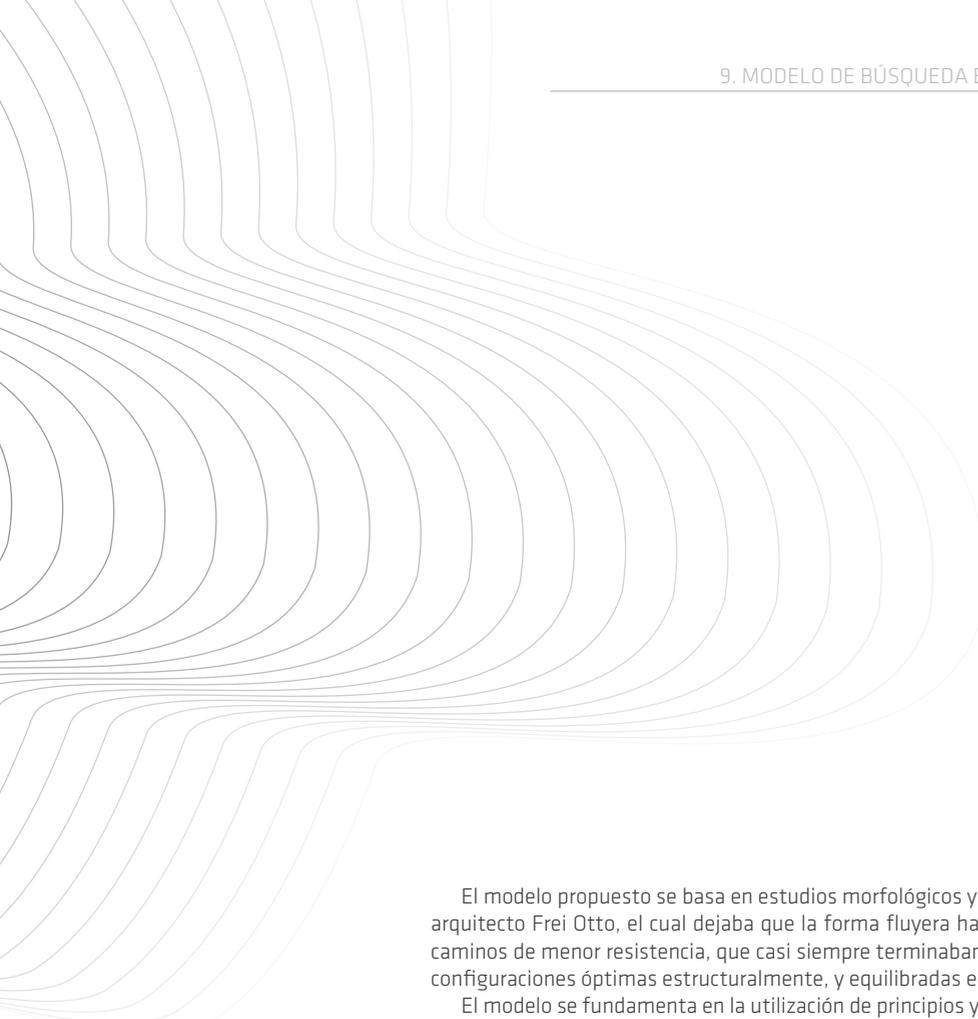
The background features a series of thin, black, curved lines that create a sense of depth and movement. These lines are arranged in a way that suggests a tunnel or a path leading into the distance, with the lines curving inward and then outward, creating a dynamic, flowing effect. The lines are most densely packed in the upper and lower portions of the image, with a clear opening in the center where the text is placed.

Modelos de búsqueda experimental



La resignificación de la naturaleza en herramientas como el naturfacto que propone Buch, y la aplicación de referentes conceptuales, morfológicos y funcionales que se han utilizado en la artificialidad para moldear diferentes tipos de formas culturales, siguen un elemento que ya se ha mencionado, y continúa creando una brecha amplia entre la construcción realizada por la naturaleza y la fabricada por el hombre. Este elemento diferenciador es, entre otros tantos, la moral, el deseo, la emoción o el conocimiento particular que puede tener cada hombre. La unión de todas estas variables hace que en muchos casos las formas culturales logren apartarse de la optimización sugerida por la naturaleza. Optimización que puede ser tomada como eficiencia en la utilización de los recursos, seguridad en las estructuras formales y la máxima calidad estética como resultado del equilibrio visual siempre presente en su construcción. Características que pueden ser logradas a partir de la utilización de los principios de crecimiento antes enunciados.

El modelo de formalización que se va a enunciar a continuación, es una metodología de búsqueda experimental de la forma que no solamente toma dichos referentes o conceptos, sino que utiliza algunos principios que emplea la naturaleza en el diseño y producción misma de la forma. Se puede aplicar dentro de cualquier metodología convencional de diseño. No representa por sí sola una metodología de proyectación, sólo es aplicable en lo relativo a la formalización del problema de diseño.



El modelo propuesto se basa en estudios morfológicos y estructurales del arquitecto Frei Otto, el cual dejaba que la forma fluyera hasta encontrar los caminos de menor resistencia, que casi siempre terminaban siendo formas y configuraciones óptimas estructuralmente, y equilibradas estéticamente.

El modelo se fundamenta en la utilización de principios y fuerzas de la naturaleza de manera intencionada, para buscar formas que respondan a la optimización desde dos ópticas: desde un punto de vista de eficiencia estructural, es decir configuraciones que resistan bien a las cargas externas, y por otro lado formas que estéticamente adquieren gran armonía y equilibrio visual.

Lo interesante es que este modelo toma en primera instancia las propiedades que tiene el espacio y las restricciones que le pone a la forma, y en segundo lugar, utiliza fenómenos físicos y químicos como objeto de estudio, que como se ha demostrado influyen de manera certera en los procesos de generación de la forma en la naturaleza. Por ejemplo, en la figura 133 se puede observar un esquema propuesto por el profesor Jorge Melhem Súccar en el cual se presentan configuraciones unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales y su comportamiento según el tipo de esfuerzo. Solamente con la influencia de un esfuerzo controlado o no, y efectuado por la naturaleza o por el hombre, la forma se transforma, adquiere nuevas estéticas, y nuevos atributos estructurales.

Esto quiere decir que el proyectista ya posee un catálogo de 47 nuevas formas, formas resultados de tres básicas sin ningún tipo de complejidad, que con ayuda de la simetría se repitieron para conformar otros sistemas. Las variables en este modelo pueden ser controladas por el proyectista, pero en ningún caso puede este controlar al ciento por ciento la forma ocasionada, el diseñador no es tanto entonces el hombre, sino la fuerza en sí.

Por todo esto, la metodología permite encontrar formas en donde se ven los principios que se mencionaron anteriormente: de generación, transformación y funcionamiento. Es de alguna manera estudiar las formas de la naturaleza para llegar a la naturaleza de la forma, extraer sus principios y utilizarlos para optimizar productos.

CONFIGURACIONES
y esfuerzos Elaborado por: Prof. Jorge Melhem Súccar

Configuración	Esfuerzo	Tracción o Tensión	Compresión	Flexión	Torsión	Cortante o Cizalladura

Fig. 133. Comportamiento de configuraciones según el tipo de esfuerzo. Prof. Jorge Melhem Súccar.

En el experimento de la figura 134, el arquitecto Frei Otto, mientras trabajaba en el Institute for Lightweight Structures (IL) de la Universidad de Stuttgart, desarrolló en un proyecto conceptual una cubierta neumática para cubrir una ciudad canadiense. Buscó su forma troqueando en una superficie de madera un contorno determinado, luego por debajo de la perforación situó una lámina plástica, la calentó y la hinchó con un compresor. El modelo encontró su forma por una presión interna, de igual manera como la cubierta a escala real iba a estar soportada por gas en presión; la diferencia es que la membrana de la cubierta aunque se proyectaba para ser flexible, no iba a ser elástica. La configuración que adquirió la película plástica, al haber sido formada por una presión constante, permitió proyectar la forma más óptima posible, que siguiera la trayectoria de las cargas y que fuera resistente a las deformaciones, para ser inflada en ese contorno preestablecido.

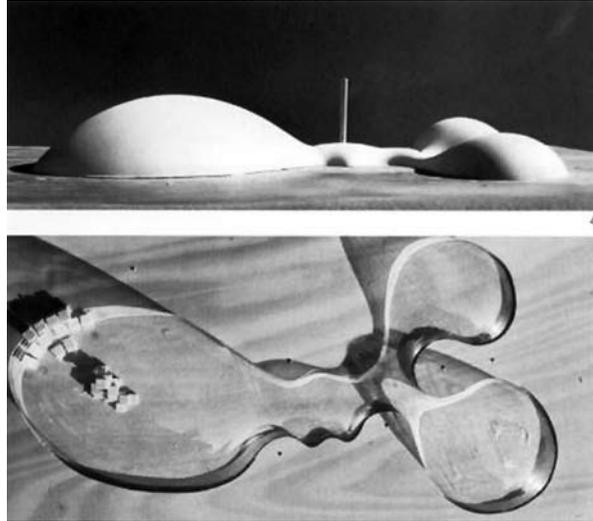


Fig. 134. Experimento de Frei Otto

Descripción de la metodología

La utilización de la metodología experimental de búsqueda formal, de la cual se pueden ver las etapas en la figura 135, requiere primero que todo la identificación del objeto de estudio; esto ayuda a especificar y concretar la finalidad de la investigación. Dentro de una investigación o un proyecto de diseño se deben haber respondido las preguntas de por qué y para qué del estudio, o tener una pregunta de investigación para poder tener claro el objetivo del experimento. La mayoría de las veces el objeto de estudio coincide con algún fenómeno físico o químico general, el cual debe ser elegido teniendo en cuenta cuál es la intención de la búsqueda o cuál va a ser la función de la forma proyectada. En el ejemplo de Otto, el objeto de estudio es la influencia de la presión positiva para generar cubiertas.

En segundo lugar, se debe seleccionar o diseñar una técnica que permita buscar formas a partir del objeto de estudio. En muchos casos un objeto de estudio puede tener varias técnicas diferentes igual de pertinentes. Queda a libre elección del proyectista seleccionar la más idónea, según los recursos disponibles. En la figura 135 se mencionan algunas técnicas que ya han sido utilizadas, pero el investigador, según el problema de investigación o el enunciado de diseño, puede encontrar nuevas maneras de variar e influenciar la forma. Estas técnicas deben tener en cuenta estímulos que puedan alterar los soportes físicos de la forma como: tensión superficial, temperatura, vibración, influencia de sustancias, perturbación sonora, viento, luz, descargas eléctricas, gravedad, magnetismo, cargas mecánicas como tracción, compresión o torsión, y en general, reacciones químicas y físicas.

Otto eligió como técnica para proyectar la cubierta, una película plástica que iba a ser hinchada desde el interior. Si se interpreta un poco todo lo que se ha hablado hasta el momento, se verificará que esta técnica es una analogía directa del crecimiento de la forma de la materia viva; sólo que la célula está hinchada por un líquido que es el citoplasma, y la membrana plástica está hinchada con aire, pero el comportamiento y las características morfológicas son básicamente las mismas.

Luego se deben definir las variables particulares o puntuales a las que va a estar sometido el objeto, las cuales deben estar dominadas por el investigador. Las influencias cambian con relación al objeto de estudio y la técnica elegida. Son básicamente las posibilidades de influir que tiene el proyectista para variar la forma utilizando la técnica específica, lo que genera de igual manera diferentes posibilidades formales. El contorno que se caló en la madera es la variable utilizada por Otto en el diseño de la cubierta; pero puede haber infinidad de contornos, y así mismo infinidad de formas, la única restricción son los requerimientos que tiene el proyecto.

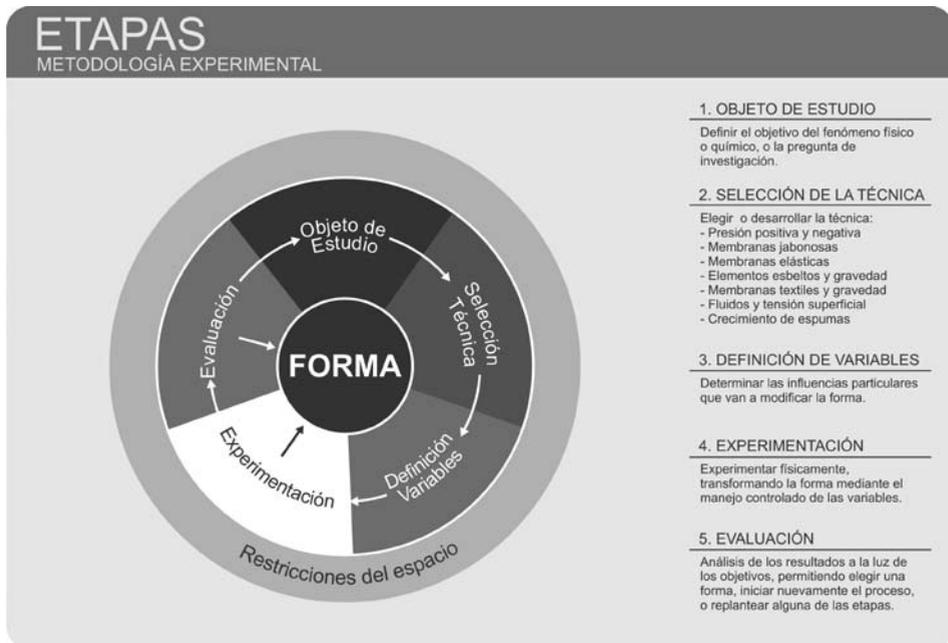


Fig. 135. Esquema de la metodología experimental

La acción de experimentar es el cuarto paso. Esta transformación, que se va recreando, posibilita que la materia encuentre su forma; el investigador no domina completamente el proceso, el resultado depende de las variables y de la técnica que se seleccionó, y de los conocimientos y la intuición del que experimenta. Pero el investigador no puede por ningún motivo restringir la fluidez de la forma porque de ese modo estará frenando las fuerzas, imposibilitando que la forma sea un reflejo de ellas. Tanto el instinto como la capacidad analítica del que experimenta, están constantemente en juego durante el experimento, permitiendo encontrar nuevas maneras de hacer las cosas y vislumbrar el hallazgo de un resultado exitoso.

El investigador debe relacionarse directamente con el material y la técnica; no puede ser sólo un pensador sino un constructor que en el proceso genera un aprendizaje producto de la experiencia. En la medida en que aumenta la cantidad de los experimentos, aumenta la calidad de los mismos debido al vivo aprendizaje, y por tal motivo la posibilidad del éxito del proceso.

Por último, se realiza la evaluación de los resultados, los cuales probablemente no se pudieron predecir. Pueden ser o no resultados que respondan al objetivo de la investigación, pero en cualquiera de los dos casos se generará conocimiento y aprendizaje. Si el resultado es fallido se debe hacer una realimentación y volver, si es necesario, a replantear el objeto de estudio o cualquiera de los pasos subsiguientes.

Los resultados obtenidos por esta técnica son formas que poseen gran similitud con las formas que construye la naturaleza, y esto se debe a que todas las formas existentes se rigen por las mismas leyes físicas del espacio tridimensional; lo que se hace con este método es utilizar concientemente ese mar de fuerzas que también utiliza la naturaleza para buscar formas espontáneas durante el proceso de experimentación, que se basen en los mismos principios, pautas y patrones, y que puedan servir para optimizar el proceso de diseño, ya sea bien con cualidades estructurales como con propiedades morfológicas de alta riqueza estética.

Aplicación de la metodología

La línea de investigación en Morfología Experimental ha utilizado este modelo de búsqueda experimental en el desarrollo de piezas de mobiliario, teniendo como objeto de estudio las membranas elásticas tensadas. Las morfologías que adquieren esta clase de estructuras de membrana son del tipo de estructuras resistentes por la forma. Son resistentes debido a que el patrón base del alfabeto formal es un paraboloides hiperbólico, como menciona Horst Berger, el ingeniero que ha diseñado la estructura tensada más grande hasta ahora (el aeropuerto de Arabia Saudita). El paraboloides hiperbólico (ver figura 55) tiene una característica especial y es que está formado por dos curvas funiculares opuestas en dirección, una de la otra. Si cogemos una membrana y la estiramos desde sus cuatro extremos, dos puntos más alto que los otros dos, se forma un paraboloides hiperbólico, una superficie minimal como se vio en los principios de la naturaleza. Si posteriormente se vuelve rígida esta forma, el resultado es una cáscara que va a soportar muy bien las cargas externas, llegando nuevamente a otro principio: la forma como estructura.

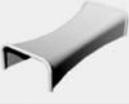
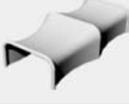
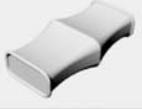
		Sin soportes intermedios	Con soporte intermedio puntual	Con soporte adicional lineal
MEMBRANA ABIERTA	PRESIÓN NEGATIVA			
	PRESIÓN POSITIVA			
MEMBRANA CERRADA	PRESIÓN NEGATIVA			
	PRESIÓN POSITIVA			

Fig. 136. Clasificación básica morfológica de las formas tensionadas.

Por estas propiedades estructurales y formales, la técnica que se seleccionó para desarrollar el mobiliario fue la rigidización de membranas elásticas tensadas. Después de hacer pruebas de laboratorio y resistencia mecánica de varios materiales se decidió utilizar la resina de poliéster para volver rígida la membrana, y la fibra de vidrio para reforzar objetos de mobiliario construidos en varilla de acero y tela de Lycra poliéster. Las variables aparecen en la figura 136 y están basadas en clasificaciones de estructuras tensadas y neumáticas de arquitectura, pero adaptándolas a formas aplicables a objetos de mobiliario.

Se realizó la experimentación aplicándole las variables al objeto de estudio, luego se realizaron varios modelos a diferentes escalas de objetos de mobiliario y al final se escogió el que utilizara una mayor economía constructiva, y formalmente empleara todos los soportes físicos en busca de la armonía estética.

Se comenzó la producción del objeto (ver figura 137c) empleando dos perfiles metálicos curvos que hacían las veces de laterales de la silla, se ubicó la tela de la estructura metálica y se tensó desde el exterior. Para generar el asiento se adicionaron dos apoyos puntuales negativos a la altura poplítea, y se procedió a volverlo rígido mediante la aplicación de resina de poliéster. Cuando ya estuvo rígida la cáscara, se reforzó manualmente en el interior con fibra de vidrio y se aplicó el Gel Coat en el exterior para dar el acabado y color final.

La forma final del objeto (ver figura 137d y 137e) se presenta como un diagrama de curvas funiculares a tensión y a compresión, en donde la función estructural es el resultado de la forma, gracias a la continuidad de la cáscara de doble curvatura que le permite distribuir los esfuerzos para resistir a la deformación.



Fig. 137. Etapas finales: experimentación y evaluación. Diseño de la silla: Fernando Sierra y Ever Patiño..

Diferentes técnicas

Dentro de los cursos que la línea de investigación dicta en el programa de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, se han realizado ejercicios de búsqueda de la forma utilizando el método experimental; los resultados utilizan diferentes principios constructivos y aunque no han sido aplicados a objetos, muestran formas muy semejantes a las proyectadas por la naturaleza. A continuación se enunciarán algunas de ellas.

PELÍCULAS PLÁSTICAS Y GRAVEDAD

Objeto de estudio

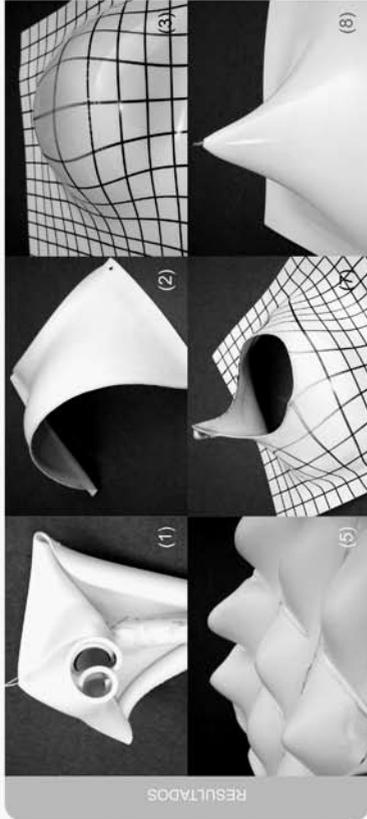
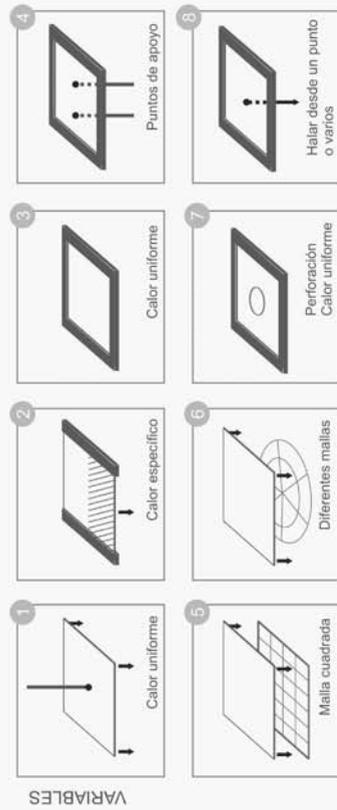
TÉCNICA
 Transformación de películas de poliestireno que se encuentran en su estado plástico (caliente) mediante la gravedad y la manipulación de las variables.

MATERIALES
 Láminas de poliestireno, alambre dulce, soportes de madera o metal.

LA EXPERIMENTACIÓN
 Después de definir las variables con las que se va a trabajar, se calienta las películas con algún tipo de sistema de calefacción (horno, secador industrial) hasta que lleguen al estado plástico. En ese momento ya se deben tener ubicados los soportes que van a influenciar la forma. La película toma la configuración luego de alcanzar su temperatura normal.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS
 Las cáscaras que resultan están dotadas de doble curvatura, lo que las hace trabajar muy bien estructuralmente, ya que los cortes transversales o longitudinales se configuran en curvas funiculares gracias al empuje efectuado por la fuerza de gravedad. En algunos de los modelos se ven las zonas donde se presentó mayor deformación.

INVESTIGADOR: Alejandro Fernández



La numeración de los resultados corresponde a la variable fotografiada.

Fig. 138. Técnica experimental: películas plásticas y gravedad

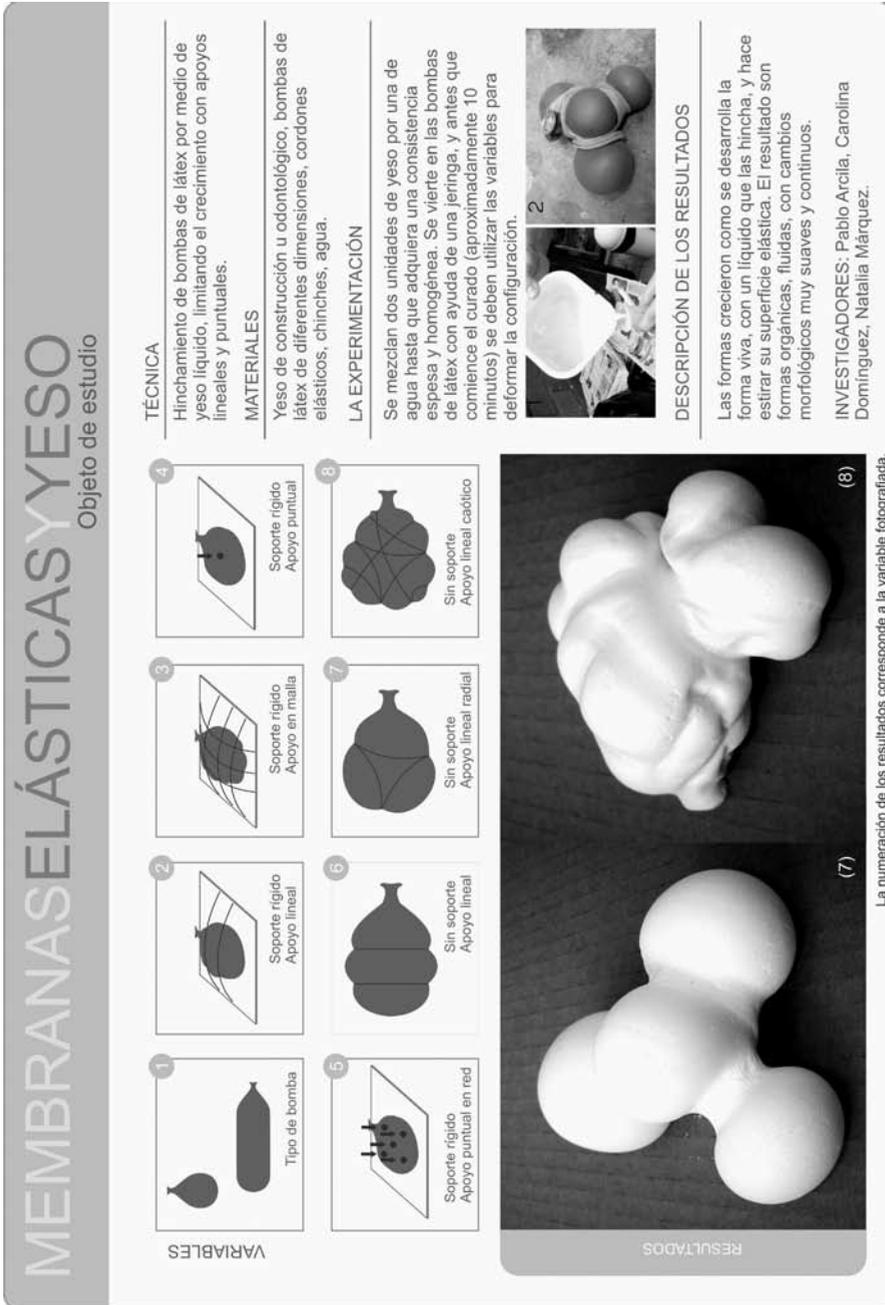


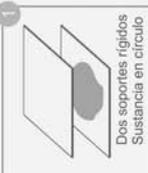
Fig. 139. Técnica experimental: membranas elásticas y yeso

SUSTANCIAS VISCOSAS

Objeto de estudio

VARIABLES

1



Dos soportes rígidos
Sustancia en círculo

2



Dos soportes rígidos
Sustancia en línea

3



Dos soportes flexibles en
malla, sustancia en círculo

4



Dos soportes flexibles en
malla, sustancia en línea

TÉCNICA

Tracción de pegas viscosas adhesivas, mediante la utilización de diferentes soportes.

MATERIALES

Pega amarilla, superficies rígidas, mallas.

LA EXPERIMENTACIÓN

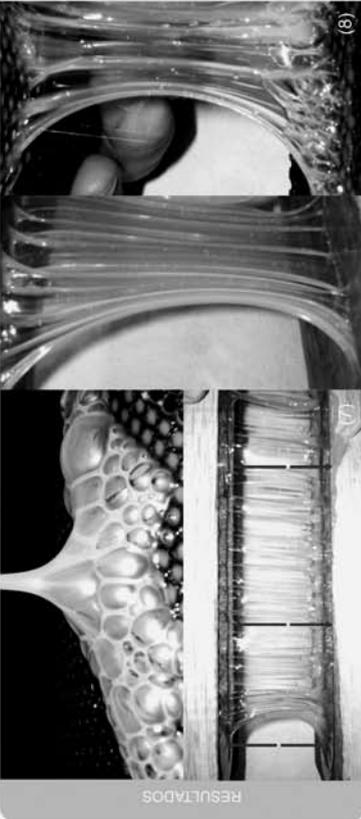
Se definen las variables, luego se vierte un poco de pega sobre la superficie con la que se va a experimentar, se tapa con otra superficie y se deja secar por unos minutos hasta que aumente su consistencia; por último se separan las superficies una longitud determinada por el investigador, tensionando así la sustancia.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

Las formas resultantes dependen en gran parte de la superficie utilizada, del tiempo de secado, y del ingreso de aire efectuado dentro de la sustancia. La tracción y la flexibilidad de la sustancia hace que surjan membranas mínimas y arcos óptimos. Cuando ingresa aire se comporta igual que una agrupación de burbujas de jabón.

INVESTIGADORES: Diana Suescún, Diana Franco, Carolina Giraldo.

RESULTADOS



La numeración de los resultados corresponde a la variable fotografiada.

Fig. 140. Técnica experimental: sustancias viscosas

176

Generación y transformación de la forma

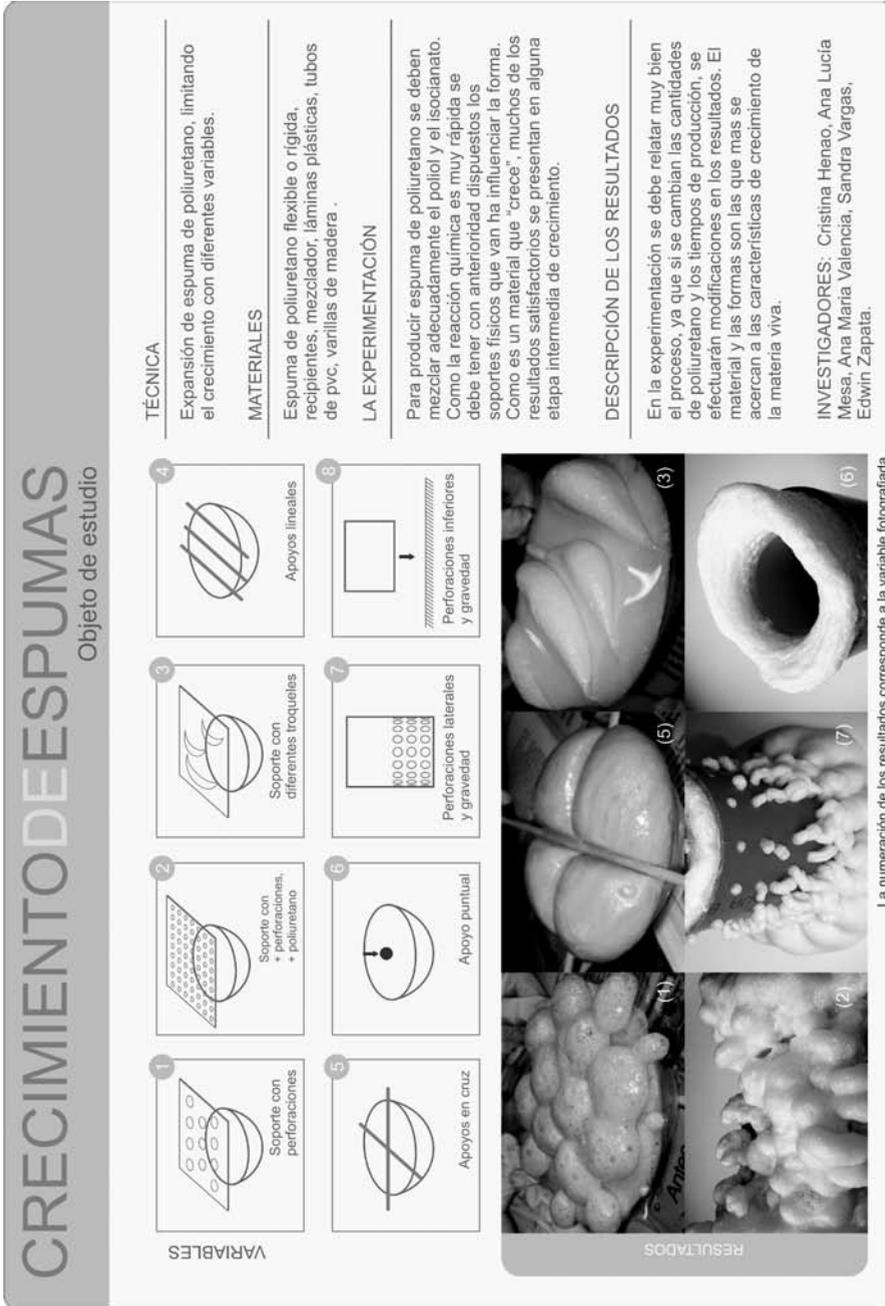


Fig. 141. Técnica experimental: crecimiento de espumas

SOLIDIFICACIÓN DE SUSTANCIAS

Objeto de estudio

VARIABLES

1 $X^{\circ}C$

Diferentes temperaturas

2 X

Verter desde diferentes distancias y velocidades

3

Verter a poca distancia para que flote

4

Sumergir un recipiente con parafina

TÉCNICA

Solidificación de parafina utilizando el cambio de temperatura.

MATERIALES

Parafina, recipiente grande para líquidos, recipiente para verter, olla, mezcladores y agua.

LA EXPERIMENTACIÓN

Se calienta la parafina en un contenedor al baño maría hasta que llegue al estado líquido. Luego dependiendo de las variables seleccionadas se sumerge o se utiliza el agua para enfriar la parafina, solidificándola.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

Las formas resultantes son el efecto de turbulencias ocasionadas por la mezcla de dos líquidos de diferentes densidades. Dependen mucho de la diferencia de las temperaturas, de las cantidades, y de las velocidades de inmersión que se manejen. En todos los casos son cavidades, que se organizan en algunos casos como fractales y en otros como cáscaras mínimas delgadas.

INVESTIGADORES: Marco De Rossi, Manuela Barrera, Melina Rojas, Natalia Jaramillo, Catalina Pérez, Juliana Vélez.

(2)

(2)

(5)

(4)

(6)

(6)

RESULTADOS

La numeración de los resultados corresponde a la variable fotografiada.

Fig. 142. Técnica experimental: solidificación de sustancias

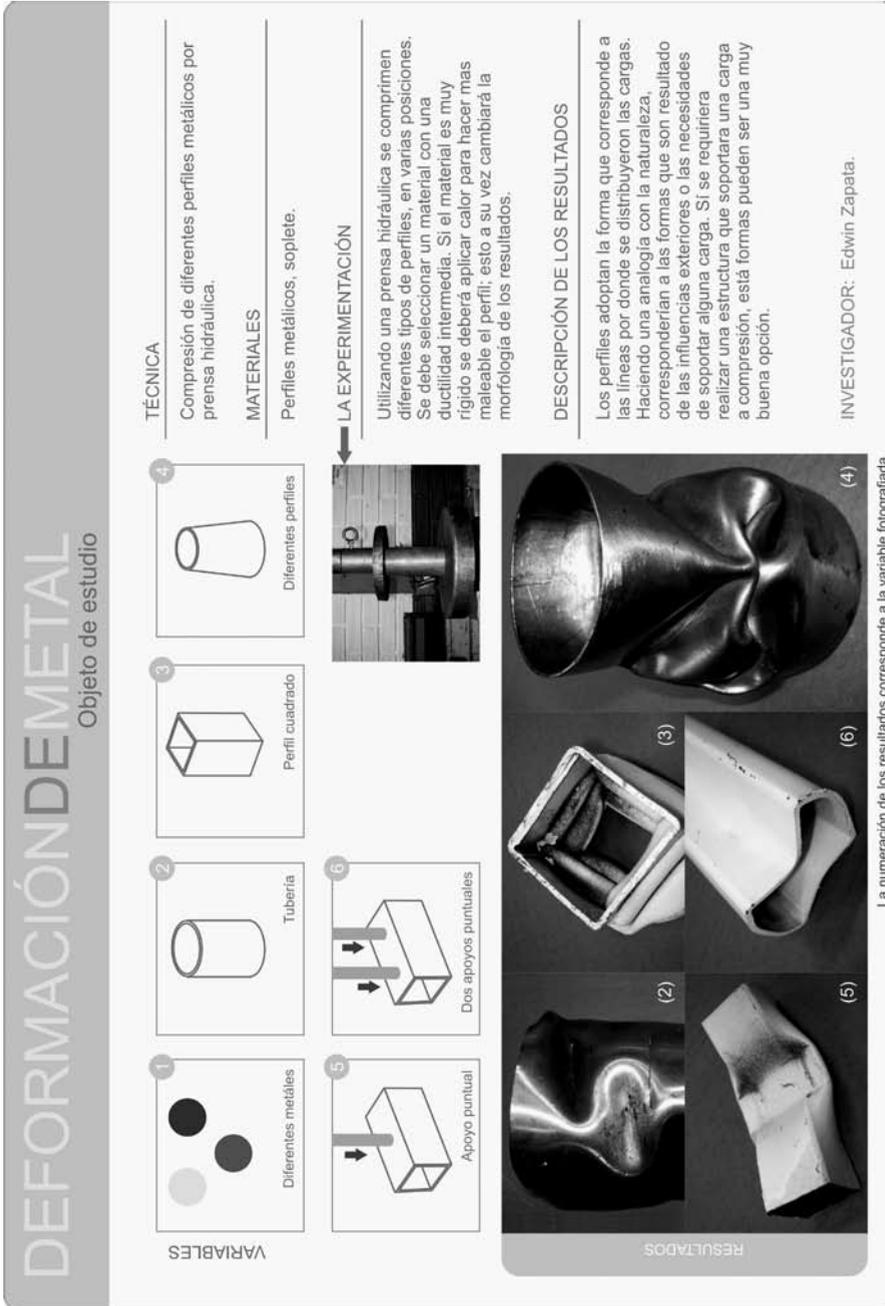


Fig. 143. Técnica experimental: deformación de metal

PELÍCULAS PLÁSTICAS Y PRESIÓN

Objeto de estudio

VARIABLES

1 Marco básico



2 Marco con corte irregular



3 Apoyo puntual



4 Apoyo puntual en red



5 Apoyo lineal



6 Apoyo en red regular



7 Apoyo en red irregular



TÉCNICA

Hinchamiento de películas plásticas por aire comprimido.

MATERIALES

Láminas de poliestireno, marcos de madera, cuerdas, varillas de madera y compresor.

LA EXPERIMENTACIÓN

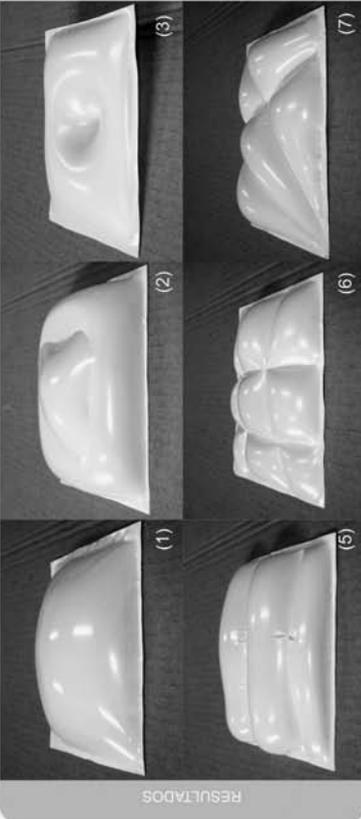
Antes de comenzar la experimentación se debe fabricar un marco de madera que se pueda cerrar para que amarre la lámina de poliestireno, dejándole una orificio para la manguera del compresor. Se ubica la lámina de poliestireno, se sitúan las variables, se calienta la película con ayuda de una resistencia o un secador industrial y rápidamente se ingresa el aire con el compresor.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

La homogeneidad de la presión de aire que ingresa al interior del marco produce cáscaras de doble curvatura positiva, que distribuyen muy bien los esfuerzos. Se debe manejar una película delgada para que la forma pueda adoptar fácilmente la configuración que le está exigiendo el aire.

INVESTIGADOR: Alejandro Fernández.

RESULTADOS



La numeración de los resultados corresponde a la variable fotografiada.

Fig. 144. Técnica experimental: películas plásticas y presión

PARTÍCULAS METÁLICAS Y MAGNETISMO

Objeto de estudio

TÉCNICA

Adhesión y configuración de partículas por medio de magnetismo.

MATERIALES

Partículas de acero, imanes, superficie delgada rígida, recipiente, aceite y cinta.

LA EXPERIMENTACIÓN

La etapa de experimentación se debe realizar mínimo con dos personas para que una de ellas esté a cargo del registro fotográfico. Luego de definir las variables se procede a modificar las configuraciones posibles con las partículas de acero y los imanes. Se debe tener especial cuidado en la recolección de las partículas luego de dar término a la experimentación. Para algunos experimentos es necesario sumergir las partículas en algún líquido denso como el aceite, para que la adhesión pueda realizarse más fácilmente.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos presentan patrones de explosión causados por el magnetismo central de las configuraciones, que se tornan caóticas al adicionar la influencia de otros imanes.

INVESTIGADOR: Juan José Lemos.

VARIABLES

1. Imán centrado Soporte rígido

2. Imanes aleatorios Soporte rígido

3. Imán desde la parte superior

4. Imanes desde la parte superior

5. Imán sin soporte

6. Dos imanes laterales

7. Imán superior Recipiente de aceite

8. Imanes laterales Recipiente de aceite

RESULTADOS

La numeración de los resultados corresponde a la variable fotografiada.

Fig. 145. Técnica experimental: partículas metálicas y magnetismo

Conclusiones del modelo

- El modelo experimental de búsqueda formal puede ser una valiosa herramienta de diseño para encontrar formas aplicables al objeto industrial, ya que son configuraciones que al utilizar principios de la naturaleza, resultan eficientes estructuralmente y óptimas estéticamente.
- La relación que tiene el investigador en el proceso experimental con el material y la construcción le posibilitan aprender en el hacer, acercándose de una manera directa con el conocimiento.
 - Conocer las propiedades del espacio y los requerimientos que éste le impone a la materia, significa anticiparse de algún modo a la forma que va a tener el objeto final y cómo va a responder a las fuerzas naturales, a las cargas externas y a los potenciales físicos.
- Los principios que utiliza la naturaleza para proyectar las formas, permiten en el proyecto de diseño la optimización del resultado final y el proceso de diseño, ya sea utilizando o no los métodos experimentales.
 - La disminución de material, la utilización de superficies y conexiones mínimas, las simetrías, el aligeramiento y la forma que es estructura, facilitan diseñar objetos que entre otras cosas, sean sostenibles en el entorno, ya que se disminuye en gran porcentaje la energía necesaria para fabricarlos.
 - Por último, el modelo experimental permite la visualización de infinidad de posibilidades formales con alta innovación morfológica; el único limitante es, en primera instancia, el conocimiento de las variables físicas y químicas con las que se puede modificar la materia; en segundo lugar, la capacidad de indagación del investigador; y en tercer lugar, la facultad de asumir riesgos y franquear dificultades que posea el experimentador.

Lista de figuras

- Fig. 1. Representación del Big Band y el universo en expansión.
- Fig. 2. Estructura cristalina cúbica centrada en las caras y red espacial de un sólido cristalino.
- Fig. 3. Características de los estados de la materia
- Fig. 4. Diferentes combinaciones entre medios y contenidos de los estados de la materia.
- Fig. 5. Del primate al hombre
- Fig. 6. La cultura actual ha logrado, sobre todo en los países del primer mundo, anticiparse a las necesidades. En la imagen: víveres dispuestos ordenadamente en un supermercado convencional.
- Fig. 7. Propiedades interiores: Estructura celular de la madera y diagrama de la composición química de la celulosa (sustancia que junto con la lignina componen la madera).
- Fig. 8. Langosta. Wagensberg menciona cómo en la medida en que una forma sea más pequeña, puede aumentar la frecuencia de su presencia en la realidad.
- Fig. 9. Objetos con cambio de utilización de materia en el espacio: macizo, hueco y poroso.
- Fig. 10. Formas unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.
- Fig. 11. Superficies recta, curva e irregular.
- Fig. 12. Variables básicas de construcción: Ángulo, longitud, perímetro, eje longitudinal y sección transversal.
- Fig. 13. Poliedros platónicos y su relación con los tipos de vértices
- Fig. 14. Construcción del tetraedro, el octaedro y el icosaedro.
- Fig. 15. Tetraedro y componentes
- Fig. 16. Construcción del cubo
- Fig. 17. La <<Kaaba>>
- Fig. 18. Hexaedro y componentes
- Fig. 19. Octaedro y sus componentes
- Fig. 20. Construcción del dodecaedro pentagonal
- Fig. 21. Pentagrama y proporción áurea.
- Fig. 22. Dodecaedro y sus componentes.
- Fig. 23. Icosaedro y sus componentes.
- Fig. 24. Teorema de Euler
- Fig. 25. Truncación máxima del cubo
- Fig. 26. Estelación del octaedro
- Fig. 27. Dualidad de los sólidos platónicos.
- Fig. 28. Generación de los sólidos arquimédicos
- Fig. 29. Sólidos catalanes. (Este texto contiene imágenes realizadas en Poly Pro de Pedagoguery Software Inc.)
- Fig. 30. Estrellas poliédricas.
- Fig. 31. Prismas y Antiprismas.
- Fig. 32. Sólido de Johnson: gyroelongated pentagonal bicupola.
- Fig. 33. Deltaedros
- Fig. 34. Simetría de rotación, especular y de traslación.
- Fig. 35. Redes regulares.
- Fig. 36. Redes semirregulares

- Fig. 37. Dipirámide y deltoedro hexagonal.
- Fig. 38. Tetrahelix, torre de octaedros y torre de antiprismas de base cuadrada.
- Fig. 39. Malla de tetraedros unidos por aristas, con conexiones de diagonales por vértices. Vista superior y perspectiva.
- Fig. 40. Malla de tetraedros unidos por aristas. Vista superior y perspectiva
- Fig. 41. Malla de cuboctaedros unidos por las caras. Vista superior y perspectiva.
- Fig. 42. Malla de Octaedros truncados unidos por las caras. Vista superior.
- Fig. 43. Agrupación de prismas a partir de las redes regulares. Prismas triangulares, primas cuadrados y prismas hexagonales.
- Fig. 44. Agrupación de octaedros truncados.
- Fig. 45. Agrupación de dodecaedros rómbicos.
- Fig. 46. Agrupación de octaedros y tetraedros.
- Fig. 47. Agrupación de cuboctaedros y octaedros.
- Fig. 48. Globigerina. Haeckel, Kunstformen der Natur. 1899
- Fig. 49. Desarrollo de una media esfera (superficie no desarrollable) con el método de los husos y las zonas; y desarrollo del dodecaedro y el cilindro.
- Fig. 50. Curvatura sinclástica y anticlástica.
- Fig. 51. Diferentes formas por revolución.
- Fig. 52. Cúpula elíptica y cúpula parabólica
- Fig. 53. Cono, toro, y superficie toral
- Fig. 54. Superficies cilíndricas.
- Fig. 55. Paraboloides hiperbólico.
- Fig. 56. Hiperboloides y elipsoide.
- Fig. 57. Superficies regladas: cilindro, paraboloides hiperbólico, hiperboloides.
- Fig. 58. Conoide y sector cónico
- Fig. 59. Superficies complejas: cilindros entrecruzados, paraboloides hiperbólicos, cáscara ondulada y forma orgánica.
- Fig. 60. Esquema del método general de diseño.
- Fig. 61. Esquema del modelo de búsqueda geométrica.
- Fig. 62. Transformación topológica de la esfera.
- Fig. 63. Diedro transformado con truncaciones formales y al cual se le aplicó una herramienta de variación geométrica (simetría de traslación).
- Fig. 64. Cubo generador de dodecaedro.
- Fig. 65. Transformación paso a paso del hexaedro y agrupación.
- Fig. 66. Cúpula transformable.
- Fig. 67. Torre geodésica construida a partir de triángulos.
- Fig. 68. Superficies sinclástica, plana y anticlástica a partir de triángulos.
- Fig. 69. Construcción física, utilizando el modelo de búsqueda geométrica.
- Fig. 70. Contenedor construido a partir de triángulos equiláteros (Diseño: Pablo Arcila).
- Fig. 71. Otros desarrollos construidos a partir de triángulos equiláteros (desarrollados por estudiantes del Grupo de Estudios en Diseño de la UPB).
- Fig. 72. Contenedor redondeado.
- Fig. 73. Monoedros irregulares (desarrollados por estudiantes del Grupo de Estudios en Diseño de la UPB).

- Fig. 74. Cúpulas geodésicas que aumentan de frecuencia.
- Fig. 75. Análisis geométrico de la vista frontal de una taza.
- Fig. 76. Clasificación de las formas en la naturaleza a partir de la geometría.
- Fig. 77. Selección del objeto de estudio.
- Fig. 78. Líneas rectas en la naturaleza
- Fig. 79. Líneas rectas en traslación
- Fig. 80. Polígonos en la naturaleza
- Fig. 81. Superficies sinclástica y anticlástica de arcilla
- Fig. 82. Diferentes configuraciones de burbujas y películas jabonosas.
- Fig. 83. Poliedros en la naturaleza.
- Fig. 84. Círculos y secciones de circunferencia en la naturaleza.
- Fig. 85. Diatomea. Haeckel, Ernst. Kunstformen der Natur (1899).
- Fig. 86. Espirales básicas en la naturaleza
- Fig. 87. Segmentos de espiral en la naturaleza.
- Fig. 88. Hélices en la naturaleza
- Fig. 89. Cuerpos y superficies con una curvatura en la naturaleza.
- Fig. 90. Dobles curvaturas positivas en la naturaleza.
- Fig. 91. Dobles curvaturas negativas en la naturaleza.
- Fig. 92. Patrones en la naturaleza, funciones, mecanismos de emergencia y sus analogías en las formas culturales.
- Fig. 93. Principios de crecimiento natural para formalizar.
- Fig. 94. Principios de generación
- Fig. 95. Principios de transformación
- Fig. 96. Principios de Funcionamiento estructural.
- Fig. 97. Principios de funcionamiento visual
- Fig. 98. Lógica reconstruida.
- Fig. 99. Etapas metodológicas y objetivos
- Fig. 100. Etapas metodológicas y actividades
- Fig. 101. Fundamentación de la metodología
- Fig. 102. Ordenador mental y procesos de pensamiento
- Fig. 103. Paralelo del ordenador mental
- Fig. 104. Instrumento modelo de síntesis 1 y 2
- Fig. 105. Instrumento modelo de síntesis 3 y 4
- Fig. 106. Instrumento modelo de síntesis 5 y 6
- Fig. 107. Instrumento modelo de síntesis 7 y 8
- Fig. 108. Instrumento modelo de síntesis 9 y 10
- Fig. 109. Instrumento modelo de síntesis 11 y 12
- Fig. 110. Instrumento modelo de síntesis 13 y 14
- Fig. 111. Instrumento modelo de síntesis 15 y 16
- Fig. 112. Instrumento modelo de síntesis 17 y 18
- Fig. 113. Instrumento modelo de síntesis 19 y 20
- Fig. 114. Matriz modelo de síntesis 1
- Fig. 115. Matriz modelo de síntesis 2
- Fig. 116. Matriz modelo de síntesis 3
- Fig. 117. Matriz modelo de síntesis 4

- Fig. 118. Instrumento modelo de crecimiento 1 y 2
- Fig. 119. Instrumento modelo de crecimiento 3 y 4
- Fig. 120. Instrumento modelo de crecimiento 5 y 6
- Fig. 121. Instrumento modelo de crecimiento 7 y 8
- Fig. 122. Diferentes tipos de aletas
- Fig. 123. Diferencias interiores y exteriores de relojes en el tiempo
- Fig. 124. La estructura interna del ala del avión, basada en el principio del panal, actúa como herramienta para hacer funcionar correctamente el avión.
- Fig. 125. Estructura, sistema y objeto
- Fig. 126. Transformación de herramienta de corte
- Fig. 127. Automóvil solar
- Fig. 128. La artificialidad de la madera, en primer momento, responde a la solución de necesidades básicas, como la canoa que necesita el hombre para transportarse y buscar alimento. Pero en segundo momento, y no necesariamente en sentido cronológico, responde a necesidades emotivas, afectivas o religiosas.
- Fig. 129. El principio del movimiento de las medusas es el mismo que actualmente se utiliza en la propulsión a chorro.
- Fig. 130. Proceso de la forma reinterpretada
- Fig. 131. El animal, su mecanismo, y su articulación.
- Fig. 132. Prótesis
- Fig. 133. Comportamiento de configuraciones según el tipo de esfuerzo.
Prof. Jorge Melhem Súccar.
- Fig. 134. Experimento de Frei Otto
- Fig. 135. Esquema de la metodología experimental
- Fig. 136. Clasificación básica morfológica de la formas tensionadas.
- Fig. 137. Etapas finales: experimentación y evaluación. Diseño de la silla: Fernando Sierra y Ever Patiño.
- Fig. 138. Técnica experimental: películas plásticas y gravedad
- Fig. 139. Técnica experimental: membranas elásticas y yeso
- Fig. 140. Técnica experimental: sustancias viscosas
- Fig. 141. Técnica experimental: crecimiento de espumas
- Fig. 142. Técnica experimental: solidificación de sustancias
- Fig. 143. Técnica experimental: deformación de metal
- Fig. 144. Técnica experimental: películas plásticas y presión
- Fig. 145. Técnica experimental: partículas metálicas y magnetismo

Bibliografía

- ALEXANDER, Christopher. "Ensayo sobre la síntesis de la forma". Ediciones Infinito. Argentina, 1976. 222 p.
- ARBELÁEZ, Elsie. BRAVO, Diana. Geometría para el diseño. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia, 2007. 164 p.
- ASKELAND, Donald R. Ciencia E Ingeniería de Los Materiales. International Thomson, México, 1999. 790 p.
- BUCH, Tomás. Sistemas tecnológicos. Contribuciones a una teoría general de la artificialidad. Aique Grupo Editor. Argentina, 1999. 424 p.
- BUNGE, Mario. La ciencia, su método y su filosofía. Editorial Siglo XX, Buenos Aires, 112 p.
- CARRERAS, Carmen. RAÑADA, Antonio. GARCÍA, Javier. YUSTE, Manuel. Física Básica I. Alianza Editorial S.A. Madrid. 1993. 527 p.
- DE BONO, Edward. El pensamiento creativo. Ediciones Paidós. Barcelona, 1992. 464 p.
- ENGEL, Heino. "Sistemas de Estructuras". Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona, 2001. 351 p.
- FEYNMAN, Richard. Física Vol. II. "Electromagnetismo y materia". Addison-Wesley Iberoamericana. México, 1987.
- FLINN, Richard. TROJAN, Paul. Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones. Tercera edición. Editorial Mc Graw Hill. Michigan, EEUU.
- FRITJOF, Capra. El tao de la física. Editorial Sirio, S.A. Málaga, España. 1983. 455 p.
- GHYKA, Matila C. Número de Oro "I Los Ritos". Editorial Poseidón, Barcelona. 1968. 48 p.
- GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN BIÓNICA U.P.B. Biónica & Diseño: De estrategia Natural a Innovación. "Manual de Biónica". (Documento gris)
- HAWKING, Stephen. Brevisima historia del tiempo. Editorial Crítica, S.L. Barcelona. 2005. 195 p.
- HURTADO, Jacqueline. Metodología de la investigación Holística. Trueno Edición. Caracas, 2000. 613 p.
- KEOSIAN, J. El origen de la vida. Editorial Alambra, S.A. Madrid. 1975. 130 p.
- LAWLOR, Robert. GEOMETRÍA SAGRADA. Editorial Debate S.A. Madrid, España. 1996. 112 p.
- MANZINI, Ezio. La materia de la invención. Grupo Editorial Ceac, S.A. Barcelona, 1993. 254 p.
- MCMAHON, Thomas. TYLER, John. Tamaño y Vida. Editorial Labor. Barcelona, 1986. 255 p.
- MORA, J. Ferrater. Diccionario de filosofía tomo I (A-D). Editorial Ariel, Barcelona, 2004. 774 p.
- NICKERSON, Raymond. PERKINS, David. SMITH, Edward. Enseñar a pensar, "Aspectos de la aptitud intelectual". Ediciones Paidós. Barcelona, 1994. 432 p.
- ORGEL, L. E. Los orígenes de la vida: moléculas y selección natural. Alianza Editorial, S. A., Madrid, 1975. 241 p.
- OTTO, Frei. IL 22 "Form". Institute for Lightweight Structures. Germany, 1988. 96 p.

OTTO, Frei. RASCH, Bodo. Finding Form. Edition Axel Menges. Stuttgart, 2005. 239 p.

PATIÑO, Ever Mazo. El experimento en el diseño. En: Universitas Científica. Volumen IX. Junio, 2007. Pág. 69 a 73.

PATIÑO, Ever. SIERRA, Fernando. Objetos a partir de la rigidización de estructuras de membrana. En: Iconofacto. No. 2, 2005. Pág. 53 a 62.

PEARSON, David. Arquitectura orgánica moderna. "Un nuevo camino para el diseño urbano y rural". Blume. Barcelona, 2002. 223 p.

RICARD, André. La aventura creativa. Editorial Ariel. Barcelona, 2000. 208 p.

SANZ, María Agripina García. MORATALLA, Ascensión. GEOMETRÍA EN LA ARQUITECTURA. Escuela de Arquitectura de Madrid. 1998. 44 p.

SIERRA, Fernando. ¿Laboratorio de morfología? En: Iconofacto. No. 3, 2006. Pág. 141 a 146.

SALVADORI, Mario. HELLER, Robert. Estructuras para arquitectos. Kli-czkowski Publisher. 3er edición. Madrid. 1998. 254 p.

SANZ, María Agripina García. MORATALLA, Ascensión. SIMETRÍA. Escuela de Arquitectura de Madrid. 1998. 40 p.

SHARON, Eran. MARDEN, Michael. SWINNEY, Harry. Flores y hojas onduladas. En: Investigación y Ciencia, mayo, 2005. Pág. 70 a 77.

STEVENS, Peter S. PATRONES Y PAUTAS EN LA NATURALEZA. Salvat Editores, S.A. Barcelona. 1987. 293 p.

STEWART, Ian. GOLOBITSKY, Martin. ¿ES DIOS UN GEÓMETRA? "Las simetrías en la naturaleza". Crítica. Barcelona. 1995. 311 p.

SOLMS, Mark. TURNBULL, Oliver. El cerebro y el mundo interior. Fondo de Cultura Económica. Bogotá, 2004. 335 p.

THOMPSON, D'arcy. Sobre el crecimiento y la forma. Cambridge University Press, Madrid. 2000. 330 p.

TOSTO, Pablo. La composición Áurea en las artes plásticas. Librería Hachette S.A. Buenos Aires, 1958. 315 p.

TREFIL, James S. El Momento de la creación. Biblioteca Científica Salvat. Barcelona. 1986. 282 p.

VALENCIA, Andrés. La estructura, "Un elemento técnico para el diseño". Editorial Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 2007. 369 p.

VOGEL, Steven. ANCAS Y PALANCAS. "Mecánica natural y mecánica humana". Tusquets Editores, S.A. Barcelona. 2000. 392 p.

WAGENSBERG, Jorge. La Rebelión de las Formas. Tusquets Editores, Barcelona. 2004. 318 p.

WAGENSBERG, Jorge. Complejidad e incertidumbre. En: Mundo Científico No. 201. Mayo, 1999. Pág. 42 a 60.

WILLIAMS, Christopher. Los orígenes de la forma. Editorial Gustavo Gili, S. A. Barcelona, 1984. 159 p.

ZUBIRI, Xavier. Espacio, Tiempo, Materia. Alianza Editorial Fundación Xavier Zubiri. Madrid. 1996. 714 p.

Fuentes de internet

EMBRIOS.ORG. (Acceso: 31 de mayo de 2006) Disponible en: <http://www.embrios.org/celula/celula.htm>

VAZQUEZ, Alonso. Historia de la Antigüedad. (Acceso: 1.º de junio de 2006) Disponible en: <http://www.portalplanetasedna.com.ar/evolucion.htm>

LIBRO BOTÁNICA ON LINE. (Acceso: 31 de mayo de 2006) Disponible en: <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/celula/>

FERRATER, José Mora. Diccionario de Filosofía. Editorial Atlante, México. 1944. Pág. 452-454. (Acceso: 5 de junio de 2006) Disponible en: <http://www.filosofia.org/enc/fer/1944452.htm>

RIVAS, Salomón Valenzuela. Minerales no metálicos, rocas industriales y gemas de Bolivia. (Acceso: 17 de agosto de 2006) Disponible en: <http://www.bolivianet.com/mineria/index.html>

J.I. Extemiana, L.J. Hernández, M.T. Rivas: Poliedros , prepublicación (2001). Departamento de Matemáticas y Computación, Universidad de La Rioja. Disponible en: <http://www.unirioja.es/cu/luhernan/Divul/POLIEDROS/Poliedros.html>

PADRÓN, Edith. "De cómo la geometría entrelaza ciencia y arte: Historia de un poliedro". Universidad de La Laguna. En <http://www.gt.matfun.uil.es/divulgacion/Poliedros1.doc>

<http://mathworld.wolfram.com/CatalanSolid.html>

http://en.wikipedia.org/wiki/Catalan_solid

<http://www.physics.orst.edu/~bulatov/polyhedra/johnson/j090.html>

<http://www.uwrf.edu/~wc01/galena2.JPG>

<http://www.peda.com/polypro> (Poly Pro de Pedagoguery Software Inc)

<http://www.labbaik.ir/pics/makeh/islam-kaaba.jpg>

REYES, María. Arte y naturaleza en clave geométrica. Universidad de Valladolid. En: <http://www.divulgamat.net/weborriak/TestuakOnLine/05-06/PG-05-06-Reyes.pdf>

<http://www.mayang.com/textures/>

Referencias de las imágenes

- Alejandro Fernández: Fig. 138, 144.
Alvaro Gómez: Fig. 86d, 87a
Ana Lucía Mesa: Fig. 114, 115, 116, 117, 118, 1119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129, 130, 131.
Andrés Valencia: Fig. 88c, 88e, 90f, 94d.
Cristina Henao, Ana Lucía Mesa, Ana Valencia, Sandra Vargas, Edwin Zapata: Fig. 141.
Camilo Martínez: Fig. 83c, 86f, 89b, 94a, 94b, 109, 110, 111, 114, 115, 116, 117.
Diana Suescún, Diana Franco, Carolina Giraldo: Fig. 140
Edwin Zapata: Fig. 143.
Ever Patiño Mazo: Fig. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 78c, 78d, 79, 80b, 80c, 80d, 80e, 81, 82, 83d, 83e, 83f, 83g, 84c, 86a, 86c, 86e, 88d, 88f, 88h, 89d, 90a, 90b, 90c, 90d, 90e, 91, 92, 93, 94c, 94e, 94f, 95a, 95b, 96c, 96d, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145.
Federico López de Mesa: Fig. 78a, 78b, 80a, 83b, 84d, 84g, 86b, 87b, 88a, 88b, 89a, 89c, 95c, 95d, 96a, 96b, 107, 108, 114, 115, 116, 117.
Haeckel, Ernst. Kunstformen der Natur. 1899. Imágenes tomadas de: <http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/~stueber/haeckel/kunstformen/liste.html>. En esta página se puede descargar todo el libro de Ernst Haeckel. Figuras: 48, 83a, 85.
Jorge Melhem Súccar: Fig. 133.
Juan Diego Sanín Santamaría: Fig. 60.
Juan José Lemos: Fig. 145.
Marco de Rossi, Manuela Barrera, Natalia Jaramillo, Melina Rojas, Catalina Pérez, Juliana Vélez: Fig. 142.
Oscar Cubillos: Fig. 84b, 84e, 84f, 88g, 104, 106, 106, 112, 114, 114, 115, 116, 117.
OTTO, Frei. RASCH, Bodo. Finding Form. Edition Axel Menges. Stuttgart, 2005. pág. 60. Fig. 134.
Pablo Arcila, Carolina Domínguez, Natalia Márquez: Fig. 139.
Poly Pro de Pedagoguery Software Inc: Fig. 29, 74
Fig. 124. Estructura interna de ala de avión: www.oni.esuelas.edu.ar
Fig. 127. Automóvil Solar: www.udel.edu/igert/pvcdrom/MANUFACT/LABCELLS.HTM
Fig. 129. Propulsión a chorro: html.rincondelvago.com/propulsion-a-chorro.html
Fig. 132. Prótesis. Brazos: servicios.idoneos.com/.../Medicina_y_Salud Piernas: servicios.idoneos.com/.../Medicina_y_Salud Pies: www.ottobock.es/.../inferior/pie/1c30.html



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto.

La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos. Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 415 90 12 o vía e-mail a editorial@upb.edu.co.

Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre, e-mail y número telefónico.

Este libro se terminó de imprimir
en los talleres de xxxxx
en el mes de xxxxx de 2009