



Escuela
Politécnica
Superior

Arquitectura biomimética y biomímesis



Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Trabajo Fin de Grado

Autor:

Andrea López-Maroto González-Pueblas

Tutor/es:

José Luis Oliver Ramírez

Enero 2020



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

AGRADECIMIENTOS

A la Arquitectura, por expandir mis inquietudes y cambiar la perspectiva con la que observo el mundo.

A todos los profesores de la Universidad de Alicante, por su esfuerzo y dedicación a la hora de transmitirnos sus conocimientos y amor por esta profesión. También por darme la posibilidad de descubrir el mundo natural desde la perspectiva arquitectónica.

A mi tutor, José Luis Oliver, por confiar en mí, por guiarme durante todo el trabajo y por hacerlo con tanto cariño, empatía, ilusión y dedicación.

A mis compañeros, por acompañarme durante todos estos años y compartir tantos momentos increíbles.

A Gonzalo, por haberme acompañado a lo largo de todo este camino, por animarme, cuidarme, darme fuerza y convertirse en uno de mis apoyos incondicionales.

A mis padres y hermana, por ser mi pilar fundamental durante toda mi etapa universitaria, por enseñarme a creer en mí y no tener miedo, a ilusionarme con aquello que me apasiona, a inspirarme y a inculcarme los valores de esfuerzo y dedicación, sin su apoyo nunca hubiera logrado llegar hasta aquí. Creo que todas las palabras se quedan cortas para expresar mi eterna gratitud hacia ellos.

ÍNDICE

ABSTRACT	7	CAPITULO 4. DIFERENTES APROXIMACIONES A LA ARQUITECTURA BIOMIMÉTICA.	61
CONTEXTO	8	4.1. LOS TRES NIVELES BIOLÓGICOS: La forma, el proceso y los sistemas.	62
MOTIVACIONES	8	4.1.1. PRIMER NIVEL. La Forma.	63
ESTADO DEL ARTE	9	4.1.2. SEGUNDO NIVEL. El proceso.	64
LÍMITES	9	4.1.3. TERCER NIVEL. Los sistemas.	68
OBJETIVO Y METODOLOGÍA	10	4.2. EL ORGANISMO, EL COMPORTAMIENTO Y EL ECOSISTEMA.	72
OBJETIVO	10	4.2.1. ORGANISMO.	73
METODOLOGÍA	10	4.2.2. NIVEL DE COMPORTAMIENTO	76
DESARROLLO	13	4.2.3. ECOSISTEMA	80
CAPITULO 0. BIOMIMÉTICA: Definición.	13	4.3. EL MOVIMIENTO.	87
CAPITULO 1. EVOLUCIÓN	19	CAPITULO 5. CONCLUSIONES	97
1.1. DEL ARTEFACTO AL DISPOSITIVO.	20	BIBLIOGRAFÍA O FUENTES DE INFORMACIÓN	100
CAPITULO 2. BIOGEOMETRIA Y FORMOGÉNESIS.	27	LIBROS	100
2.1. LAS FORMAS Y SU FUNCIONAMIENTO EN LA NATURALEZA.	28	INFORMACIÓN DIGITAL.	100
2.2. LA ESFERA.	29	LIBROS EN LÍNEA.	100
2.3. LA ESPIRAL, LA HÉLICE, EL ÁNGULO.	32	ARTÍCULOS DE REVISTA EN LÍNEA.	101
2.4. LA CATENARIA.	36	TESIS DOCTORALES, TRABAJOS FIN DE MASTER Y TRABAJOS DE FIN DE GRADO EN LÍNEA.	101
2.5. EL HEXÁGONO.	37	VIDEOS EN LÍNEA	102
2.6. LOS FRACTALES.	38	PARTES DE SITIOS WEB.	102
CAPITULO 3. ARQUITECTURAS INSPIRADAS EN LA NATURALEZA. Una primera aproximación.	43	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	105
3.1. EDAD ANTIGUA. LAS TEORÍAS DE LA MÍMESIS.	44		
3.2. EDAD MEDIA.	47		
3.3. RENACIMIENTO Y BARROCO.	49		
3.4. LA MODERNIDAD.	51		
3.4.1. El Romanticismo y el Realismo.	51		
3.4.2. La ilustración y la Racionalidad Científica.	52		
3.4.3. Los comienzos del organicismo.	53		
3.4.2. Un punto de inflexión. Finales del siglo XIX y siglo XX.	54		

ABSTRACT

En muchos momentos la arquitectura ha tomado la naturaleza como inspiración a la hora de construir, ya desde su origen con la cabaña primitiva, donde trata de imitar la forma de los árboles para dar cobijo. Sin embargo, en la actualidad con las nuevas máquinas y el conocimiento de nuevas técnicas, tratamos de protegernos de ella, y cada vez nos alejamos más del entorno natural, viviendo en una naturaleza artificial con todas las problemáticas medioambientales que ello conlleva.

En los últimos años, se está cambiando la forma en el que el ser humano se relaciona con la naturaleza, propiciando que esta no solo sea vista como referente formal, si no como modelo de eficiencia y equilibrio sostenible en todos los niveles. Se propone aquí un estudio sobre cómo este tipo de arquitectura ha ido evolucionando a lo largo de los años, en gran medida gracias a la simbiosis de este campo con el campo de la biología, a partir de las aportaciones y reflexiones como las de Janine Benyus o Julian Vincent, y cómo han ido cambiando y evolucionando las diferentes estrategias y teorías.

De este modo se estudiará cómo desde los artefactos inspirados en la naturaleza de algunos pioneros para su época, como los de Leonardo da Vinci, por ejemplo, se ha producido un desarrollo y evolución de diferentes prototipos que han dado lugar a la llamada "arquitectura biomimética", y cómo ha ido evolucionando su concepto a través del tiempo. Finalmente se verá cómo a través del cambio evoluciona este tipo de arquitectura, estudiándose la misma a partir de los principios que la han ido definiendo.

CONTEXTO

MOTIVACIONES

Mi interés en la naturaleza surge mucho antes de iniciarme en la carrera de Arquitectura, y quizá por eso durante mi periodo de formación en el centro, todos mis proyectos siempre han estado relacionados con ella en mayor o menor medida.

La motivación inicial de la investigación por este tipo de arquitectura, surge por primera vez, al ponerle nombre a este interés que siempre me ha guiado en la manera de diseñar. La primera vez que escuche la palabra “biomimética” en una clase de arquitectura todo mi mundo interior giro 180 grados. Y tras la fascinación y el primer contacto con este término me pregunté:

¿Por qué no nos habían explicado antes este tipo de arquitectura?

¿Por qué no les suscita a mis compañeros el mismo interés que a mí?

¿Quizás por el desconocimiento de su existencia?

Nos encontramos en un momento en el que resulta imprescindible entender que el ser humano es una pieza más en el ecosistema natural. Sin embargo en la mayoría de ocasiones actuamos como si fuésemos ajenos a él. Es muy posible que en estos tiempos donde la emergencia climática es presente, empezamos a ser conscientes de ello. Entonces yo me pregunto, si en otras disciplinas se está empezando a cambiar hacia unos hábitos más sostenibles, ¿por qué en la arquitectura seguimos construyendo de la misma forma? ¿Por qué no aprovechamos las nuevas tecnologías y nos nutrimos de los otros campos de conocimiento para mejorar?

Si bien es cierto que la arquitectura ha evolucionado hacia una arquitectura sostenible, verde y ecológica, en muchas ocasiones este tipo de construcciones solo suponen un parche en la construcción actual. Es por ello que creo firmemente que para poder hablar de una arquitectura ecológica, es absolutamente necesario aprender y aplicar las leyes que rigen la naturaleza. Ya que realmente, es la única que lleva generando vida desde mucho antes de estar nosotros en el planeta.

Tras todas estas reflexiones, volqué todo mi interés en desarrollar proyectos que me permitiesen ir descubriendo diferentes formas de diseño biomimético. Fui desarrollando diferentes estrategias a la hora de proyectar que me ayudasen a ir aplicando estos conocimientos adquiridos. Pero tal fue mi sorpresa, que cuando más ejemplos conocía, más me daba cuenta que aún no sabía nada de todo lo que conlleva la biomímesis.

Encuentro con este trabajo la oportunidad de afianzar mi conocimiento en este campo de la arquitectura. De seguir respondiendo a todas mis inquietudes, y quien sabe, quizás dar a conocer y suscitar en otros las mismas inquietudes en el mundo de la biomímesis, ya que creo que es un mundo en el diseño, al que le falta mucho por explorar.

Todas estas razones son las que me han impulsado al desarrollo de este TFG.

ESTADO DEL ARTE

El contexto conceptual de este trabajo maneja muchas referencias bibliográficas como es lógico. Sin embargo las que resultan más relevantes para comprender la aproximación particular que aquí se plantea son las siguientes.

BIOMIMÉTICA: Definición. & EVOLUCIÓN: Del artefacto al dispositivo.

- BENYUS, Janine M. *Biomímesis: Innovaciones Inspiradas Por La Naturaleza*, ed.: Tusquets, Barcelona, 2012.
- VINCENT V., Julian F, Olga A Bogatyreva, Nikolaj R Bogatyrev, Adrian Bowyer and Anja-Karina Pahl. Biomimetics: its practice and theory. *Journal of The Royal Society*. [en línea] J. R. Soc. Interface, 2006, **3**(9), pp.471-482 [Fecha de consulta: 25 Feb. 2019]. doi: 10.1098. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>

BIOGEOMETRIA Y FORMOGÉNESIS.

- AAVV. *Grandes documentales - Biomímesis: Biogeometría* [En línea]. Escrita, producida y dirigida por Alvaro Mendoza. 48min. RTVE, 2019. [Fecha de consulta: 22 Mar. 2019]. Disponible en: <http://www.rtve.es/alacarta/videos/grandes-documentales/grandes-documentales-biomimesis-biogeometria/5079538/>
- WAGENSBERG, Jorge. *La rebelión de las formas o Cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta*. Ed: Tusquets, Barcelona, 2005.

ARQUITECTURAS INSPIRADAS EN LA NATURALEZA. Una primera aproximación.

- CALDUCH, Juan. *Temas de composición arquitectónica. Naturaleza y artefacto*. Ed: Editorial Club Universitario, San Vicente, Alicante, 2000.
- D.GRILLO, Antonio Carlos. *La arquitectura y la naturaleza compleja: Arquitectura, ciencia y mimesis del siglo XX*. [En Línea] Marta Llorente Díaz, Dir. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005 [Fecha de consulta: 5 Ago. 2019] Disponible en : <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93400>

DIFERENTES APROXIMACIONES A LA ARQUITECTURA BIOMIMÉTICA.

- HUERTA DE FERNANDO, Lucía. *Técnicas Biomiméticas aplicadas a la arquitectura*. [En Línea] M^a del Carmen Giménez Molina, Dir. Trabajo fin de Grado. Universidad Politécnica de Madrid, 2017. [Fecha de consulta: 15 Nov. 2019] Disponible en : http://oa.upm.es/47500/1/TFG_Huerta_de_Fernand_Lucia.pdf
- PAWLYN, Michael. *Biomimicry in Architecture*, ed.: RIBA, London, 2011.

LÍMITES

El trabajo está elaborado con la finalidad de abordar desde diferentes puntos de vista el término de biomimética. Dado a que a lo largo del trabajo se argumentan diferentes líneas evolutivas, teorías y diversos enfoques en la explicación de los proyectos y obras seleccionadas, en muchos casos simplemente se citarán o se pondrán en valor los aspectos más relevantes desde el enfoque biomimético, puesto que el propósito del trabajo es dar una visión general de la biomímesis.

OBJETIVO Y METODOLOGÍA

OBJETIVO

El objetivo general de este TFG consiste en desarrollar y profundizar en el concepto y la evolución del término biomimética, y cómo éste se relaciona con la arquitectura a lo largo de la historia. Para esto, es necesario:

- Estudiar la evolución del concepto de biomímesis hasta la actualidad.
- Estudiar diferentes inventos, prototipos, prótesis o artefactos en el campo de la biomimética.
- Estudiar las diferentes formas que encontramos en la naturaleza, para poder entender algunas de las leyes que las rigen y cómo se podrían trasladar al ámbito de la arquitectura.
- Estudiar las diferentes teorías y autores filósofos, biólogos, físicos, etc. para comprender la evolución de la mimesis y las primeras aproximaciones entre naturaleza y arquitectura, entendidas desde el ámbito de la biomimética.
- El estudio de las diferentes obras actuales de arquitectura biomimética según las diferentes aproximaciones que existen en este campo.

METODOLOGÍA

Para la elaboración de este trabajo se parte de:

- La recopilación de información a través de libros, artículos, tesis doctorales, documentales, información digital, etc. de los diferentes puntos a desarrollar en el trabajo.
- La realización de esquemas o diagramas para sintetizar o explicar mejor la información.

El orden de la investigación ha sido el siguiente:

En una primera instancia, se ha comenzado estudiando el término de la biomimética, ya que al ser una palabra muy reciente, existen diferentes interpretaciones a cerca de la misma, explicando cuál de ellas es la aproximación con las que nos referiremos la biomímesis resto del trabajo.

A continuación, se analizaron en rasgos generales, diferentes ejemplos no necesariamente vinculados con la arquitectura, para observar en otras disciplinas diferentes aproximaciones en el campo de la biomímesis.

Posteriormente, se analizaron diferentes formas naturales para explicar su eficacia y optimización, a través de una aproximación de la arquitectura desde el concepto de la física referido a las formas.

Se ha abordado entonces el estudio de las diferentes relaciones entre naturaleza y arquitectura vinculadas a las bases conceptuales de la mimesis como cuestión secular para los procesos creativos arquitectónicos, abordada desde múltiples sensibilidades a lo largo de la historia

Por último, se procedió a la selección de diferentes proyectos arquitectónicos desarrollados desde del siglo XX, hasta la actualidad, que pudieran ser paradigmáticos y representativos para cada una de las diferentes aproximaciones de la arquitectura biomimética.

Es importante señalar que para el desarrollo de esta investigación, el pensamiento se construye con imágenes en muchos casos.

Ya que como dice José Antonio Marina:

“Suele decirse con demasiada frecuencia que “una imagen vale más que mil palabras”. La afirmación es falsa, porque normalmente hacen falta más de mil palabras para interpretar una imagen.”.

Y es por lo que, a lo largo de todo el documento, la reflexión escrita se complementa con el lenguaje dibujado. Ya que para mí, la propia imagen es texto en sí mismo, es otro sistema de lenguaje. Y es en este lenguaje en uno de los que más cómoda estoy. Y como resultado de esto, parte del texto está escrito gráficamente.

*"La Biomimesis no se plantea qué podemos extraer de los organismos y de sus ecosistemas,
sino qué podemos aprender de ellos."*

Janine Benyus

DESARROLLO

CAPITULO 0. BIOMIMÉTICA: Definición.

Sin tratar de desarrollar el término de *biomimética* en todos sus campos, ya que nos llevaría lejos del interés de este estudio, parece prudente acotar y definir algunas de las características que lo definen.

El término *biomimética* data del siglo XX, sin embargo, la relación que existe entre *mímesis* y naturaleza nos hace remontarnos hasta el siglo V a.C para identificar el contexto de su significado.

“La teoría de la imitación surgió en la época clásica de Grecia. El primer significado del término mímesis designaba ciertos actos de culto que llevaban a cabo los sacerdotes durante las ceremonias religiosas, [...]; pero a partir del siglo V a.C. el término pasa progresivamente del culto a la filosofía comienza a designar la reproducción del mundo externo (Tatarkiewicz, 2001, p.301). Demócrito definió el término mímesis como la imitación del funcionamiento de la naturaleza”¹

Aproximándonos desde su definición etimológica, **biomímesis** (gr. βιο-μίμησις) proviene de las palabras griegas βίω= vida y μιμηθεί = imitar, por tanto desde su propio significado podemos definir la biomimética como:

“la ciencia que estudia a la naturaleza como fuente de ideas para nuevos inventos y proyectos tecnológicos, con la finalidad de aportar soluciones a los problemas que el hombre no ha podido solucionar y que la naturaleza sí lo ha hecho, imitando los procesos que ésta realiza”²

Aunque durante miles de años el ser humano de un modo u otro ha buscado en la naturaleza fuente de inspiración y conocimiento, no fue hasta la década de 1960 cuando se escuchó por primera vez la definición explícita de este término.

Así, según expone **Julian Vincent**, en 1960, se empleó la palabra biónica por **Jack Steele**, de la fuerza aérea de Estados, definiendo esta palabra como:

“la ciencia de los sistemas que tienen alguna función copiada de la naturaleza o que representan características de los sistemas naturales o sus análogos”³

Fue **Otto Schmitt**, un académico e inventor estadounidense, el primero en ponerle etiqueta al concepto del significado de la biomimética para describir:

“la transferencia de ideas de la biología a la tecnología”⁴

En 1969, fue cuando esta palabra apareció por primera vez en un documento científico, y no fue hasta 1974 cuando apareció reconocida públicamente por primera vez en el **diccionario Webster** con la siguiente definición:

“El estudio de la formación, estructura o función de sustancias y materiales producidos biológicamente (como enzimas o seda) y mecanismos y procesos biológicos (como síntesis de proteínas o fotosíntesis) especialmente con el fin de sintetizar productos similares mediante mecanismos artificiales que imitan los naturales”⁵

Observando las fechas, nos damos cuenta que el término de biomimética, sinónimo de biomímesis o biónica, es un vocablo contemporáneo. En términos de la historia, sería presente, ya que no fue hasta los años 80 cuando creció su popularidad en el mundo científico.

1 FONTANA CABEZAS, Juan José. *El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente*. [En línea] Juan Calduch Cervera, Dir. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. 2012. [Consulta: 23 Jul. 2019]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/26859/1/Tesis_Fontana_Cabezas.pdf

2 AAVV. Definición y Que Es BIOMÍMESIS. En: *definicionyque.es* [En línea]. 2014. [Consulta: 25 Feb. 2019]. Disponible en: <https://definicionyque.es/biomimesis/>

3 VINCENT V., Julian F, Olga A Bogatyreva, Nikolaj R Bogatyrev, Adrian Bowyer and Anja-Karina Pahl. Biomimetics: its practice and theory. *Journal of The Royal Society*. [en línea] J. R. Soc. Interface, 2006, 3(9), pp.471-482 [Fecha de consulta: 25 Feb. 2019]. doi: 10.1098/rsif.2006.0127

4 VICENT (2006) Op. Cit. pp. 471-482

5 Webster's Dictionary. Biomimética .En: *Merriam-Webster Since 1828* [En línea] [Consulta: 26 Feb. 2019]. Disponible en: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/biomimetic?src=search-dict-hed>

Sin embargo, lo cierto es que no ha sido hasta los últimos 20 años, cuando se ha incrementado el conocimiento y desarrollo de este concepto, gracias a un gran interés y una transformación en el pensamiento por parte de la comunidad científica.

En especial a investigadores relacionados con el campo de la biología, como el investigador biomecánico estadounidense **Steven Vogel**, el biólogo y profesor de biomimética **Julian Vincent**, que define biomimética como *“la abstracción de un buen diseño de la naturaleza”*, o la científica y autora **Janine Benyus** que popularizó el término biomimetismo en su libro *“Biomimicry: Innovation Inspired by Nature”* (1997), entre otros que han escrito extensamente de esta materia.⁶

De los anteriormente citados, cabe destacar la labor de **Janine Benyus** con respecto a la divulgación de este término. Por sus trabajos desarrollados, elaboración de libros o creación de nuevas plataformas e instituciones, para promover la difusión y acercar esta información a todo tipo de público, como por su labor docente y disertadora, promoviendo un cambio no solo a la hora de diseñar, sino en el pensamiento. Logrando con esto un cambio en la manera en que nos relacionamos ya prendemos de la naturaleza. Porque al final la biomimética no es solo una modificación en la mentalidad de cómo desarrollar diferentes elementos, sino una transformación en la manera de vivir y entender el mundo.

Concluimos esta primera aproximación con la definición de la **RAE**:

“1. m. Imitación de los diseños y procesos de la naturaleza en la resolución de problemas técnicos.”⁷

Para mí la **biomimética** es una filosofía de vida, que no solo busca inspiración en la naturaleza, si no que aprende y conversa con ella. No solo se inspira en ella para reproducir sus formas, si no que pretende entender las leyes que la rigen. Porque como dice Janine Benyus:

“Qué pasaría si cada vez que empezase a inventar algo me preguntase: ¿Cómo resolvería esto la naturaleza? Las respuestas a nuestras preguntas están en todas partes; Solo necesitamos cambiar la lente con la que vemos el mundo.”

6 PAWLYN, Michael. *Biomimicry in Architecture*, ed.: RIBA, London, 2011.

7 RAE. Biomimetismo. En: 23ª Edición del <<Diccionario de la lengua española>> Real Academia Española. [En línea] [Consulta: 23 Jul. 2019]. Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=5ZEmlqA>

βίω=vida + μιμηθεῖ=imitar

GRIEGO

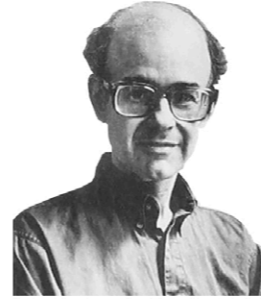
ETIMOLOGÍA BIOMÍMESIS
(gr. βίω-μίμησις)



OTTO SCHMITT

"la transferencia de ideas de la biología a la tecnología"

1ª ETIQUETA TÉRMINO BIOMIMÉTICA



STEVEN VOGEL

"la abstracción de un buen diseño de la naturaleza"



REAL ACADEMIA ESPAÑOLA

INTRODUCCIÓN BIOMIMETISMO

S.V-N a.C.

≈ 1960

≈ 1970

≈ 1980

≈ 1990 - 2000

2006

1º SIGNIFICADO MÍMESIS



DEMÓCRITO

DEFINIÓ EL TÉRMINO MÍMESIS COMO:
"IMITACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA NATURALEZA."

1º USO PALABRA BIÓNICA



JACK STEELE

1º RECONOCIMIENTO PÚBLICO DEL TÉRMINO

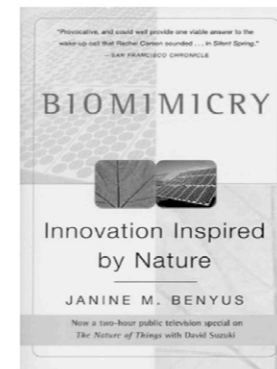


DICCIONARIO WEBSTER

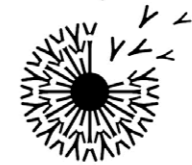


JANINE BENYUS

MAYOR DIVULGADORA DEL TÉRMINO BIOMIMÉTICA



BIOMIMICRY 3.8



BIOMIMICRY INSTITUTE



ASKNATURE

CAPITULO 1. EVOLUCIÓN

1.1. DEL ARTEFACTO AL DISPOSITIVO.

En este capítulo veremos cómo la *biomímesis*, más que ser una nueva disciplina, podríamos decir que se trata de vieja-nueva especialidad. Un nuevo término para definir una actitud que durante siglos ha descrito una forma particular de entender la relación entre el diseño y la naturaleza.

De este modo podríamos empezar mencionando los trabajos del propio **Euclides**. En ellos podemos observar una de las primeras manifestaciones del ser humano a tratado de entender y fijarse en la naturaleza.

En el año 300 a.C, aproximadamente, **Euclides** define el número áureo. Con ello logra poder racionalizar la relación que existe en la naturaleza con ciertas dimensiones o proporciones. Gracias a este descubrimiento 1500 años después **Leonardo de Piza**, también conocido como **Fibonacci**, pudo proponer en su libro "*Liber abacci*" (1202) una solución a un problema de la cría de conejos. Dando lugar a la sucesión de Fibonacci, sucesión que tiende a la sección aurea, sección que a su vez encontramos en diversos aspectos de la naturaleza, como la distribución de los pétalos de las flores, la relación de las hojas en un tallo o las espirales de los caracoles.⁸

Otro momento singular es el **Renacimiento**, supuso la vuelta al racionalismo con la llegada de la revolución científica. En este momento se produce también una revolución en la forma de mirar la naturaleza, en la que la ciencia del dibujo, como bien es sabido, es el lenguaje de la ciencia. En este nuevo contexto en el que el dibujo es el modo en el que se expresa la ciencia, -la anatomía, astronomía, botánica- encontraremos artistas que hacen ciencia, como **Leonardo da Vinci**.

Aunque en el recorrido de su vida profesional, observamos mediante sus diarios, notas y dibujos, cómo muestra una gran variedad de interés por diferentes campos de conocimiento, que aunque a simple vista parece inconexos, lo cierto es que construyen una visión global que le permitirá establecer relaciones apasionantes entre los diferentes saberes. Cabe destacar uno de sus dibujos más conocidos, **el Hombre de Vitruvio** (1490), mediante el que trata de dibujar las proporciones humanas a través del tratado de Vitruvio, sentando las bases (junto con otros dibujos posteriores que realiza sobre la anatomía del cuerpo humano) del estudio de los vasos sanguíneos, relacionándolos con el comportamiento de los fluidos.

"Toda acción natural está realizada por la naturaleza misma del modo y en el tiempo más breve posible. Ninguna acción natural puede abreviarse, pues la naturaleza la genera del modo más breve posible."

Leonardo da Vinci.

Aunque este planteamiento inclinado a considerar el conocimiento como un todo, ya describe una actitud hacia la naturaleza interesante para nuestro trabajo, en su trabajo "*Códex sobre el vuelo de los pájaros*" (1505) es donde encontramos una relación más directa con la misma en términos de *biomimética*. En él se observa cómo estudia el movimiento de vuelo y la anatomía de las aves, y cómo los dibuja detalladamente. Todo este estudio lo realizó con la intención de tratar de imitarlos posteriormente, y conseguir así reproducir mecánicamente estos movimientos con el fin de construir un artefacto que le permitiese volar.

⁸ Colaboradores de Wikipedia. Número Áureo. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [En línea]. 2019 [Consulta: 12 Marzo 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_%C3%A1ureo#El_n%C3%BAmero_%C3%A1ureo_en_la_naturaleza



Aunque como sabemos no lo consiguió en su época, fundamentalmente por no tener en cuenta la diferencia de escala y la necesidad de aplicación de una mayor fuerza, lo cierto es que esos trabajos abrieron un campo de conocimiento que en el futuro permitirían el desarrollo de artefactos voladoras, que hicieron avanzar la ciencia aeronáutica, hasta llegar a los aviones que hoy en día conocemos.

"El ingenio humano puede realizar muchas invenciones, pero nunca logrará invenciones más bellas, más sencillas y apropiadas que las que hace la naturaleza, en cuyos logros nada queda incompleto ni nada es superfluo."

Leonardo da Vinci.

En esta misma época también podemos encontrar a otros inventores como **Galileo Galilei**, quien interesado en el crecimiento de las diferentes especies, llegó a la conclusión que:

*"Masas animales aumentan de manera desproporcionada a su tamaño, y sus huesos deben aumentar en consecuencia, también de manera desproporcionada en la circunferencia, adaptándose a portantes en lugar de mero tamaño"*⁹

Esta afirmación hoy en día podría llegar a resultar obvia, pero el descubrimiento por el cual se llega a la conclusión de que los huesos son tubulares y huecos, hizo que estructuras construidas años más tarde lo imitasen, ya que obtienen una máxima resistencia a la flexión con menor peso posible, siendo esta una estructura muy eficiente. **Giovanni Alfonso Borelli**, fue considerado como uno de los mayores impulsores de la biomecánica, ya que gracias a sus investigaciones acerca del comportamiento del cuerpo humano, descubrió el centro de gravedad del cuerpo humano, así como el funcionamiento de palancas del sistema musculoesquelético, centrándose especialmente

⁹ Colaboradores de Wikipedia. Biomecánica - Biomechanics. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [En línea]. 2019. [Consulta: 5 Dic. 2019]. Disponible en: <https://es.qwe.wiki/wiki/Biomechanics>

en el de las aves, siendo el primero en fabricar unas alas artificiales. Pero al igual que a Da Vinci, no le funcionaron ya que el cuerpo humano no podía alcanzar la potencia suficiente para hacerlas funcionar.

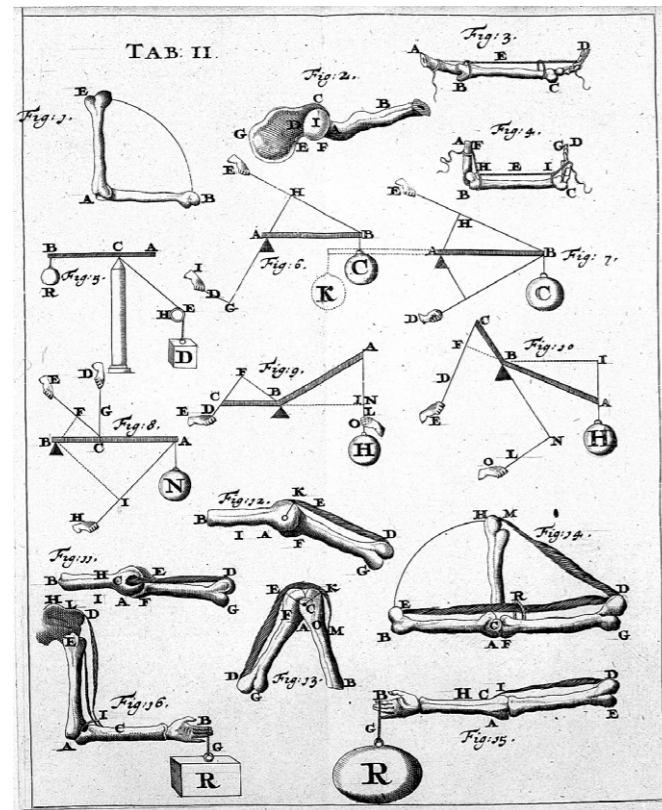


Ilustración 2. BORELLI, Giovanni Alfonso. *De motu animalium*. [Imagen Digital]. 1680. Archivo jpeg. 1248x1528 px. Welcome Collection Gallery (2018-03-29) [consulta: 5 Dic. 2019]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Giovanni_Alfonso_Borelli%27s_De_motu_animalium_Wellcome_L0022126.jpg

No fue hasta principios de la **Edad Moderna**, con la **Ilustración** y la **Revolución Científica**, cuando se produce una fuerte desvinculación entre Iglesia y naturaleza, eclosionando una visión científica ligada a nuevos campos de conocimiento como la física, la biología, la química, etc. Observamos entonces un cambio de mentalidad, sentándose así las bases de la ciencia moderna.

A principios **siglo XIX**, con la **Revolución Industrial** y la consolidación de las ciencias, gracias a nuevos descubrimientos y teorías revolucionarias como la de la evolución de las especies de **Charles Darwin**, tras la publicación de su libro "*On the Origin of Species*" (1859), propició la creación de nuevos inventos que podrían aproximarse al concepto de biomimética que hoy en día conocemos. A su vez, la consolidación de la ilustración botánica como disciplina dentro de las artes visuales y científicas, impulsó muchos de los inventos de esta época o posteriores, ya que están inspirados en el estudio de estos vegetales.

Uno de los inventos relacionados con el campo de la biomimética, viene de la mano de **George Cayley**, quien estudió la aviación desde una perspectiva científica. Gracias a esta nueva visión, se inspiró en el aerodinamismo de los delfines para generar un globo aerostático que ofreciese menor resistencia al aire.

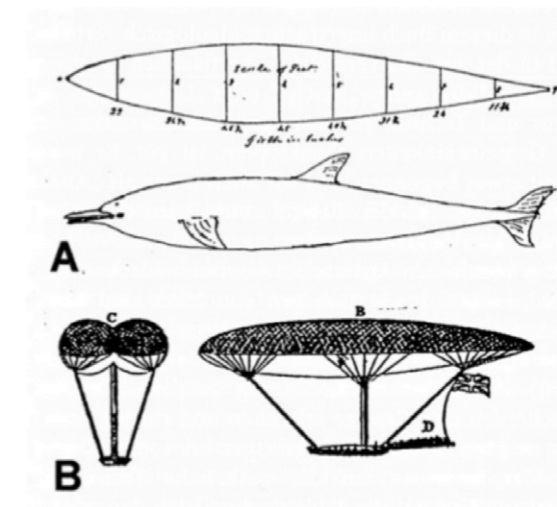


Ilustración 3. CAYLEY, George. *Studies on form and desing of a balloon*. [Imagen Digital]. 1829. Biomimetics in architecture. Petra Gruber. [consulta: 5 de Dic. 2019]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/khuongarch2703/kin-trc-phng-sinh-hc-57201580>

Joseph Monier, fue un jardinero que se inspiró en la estructura de las fibras del esclerénquima, tejido de gran rigidez de algunas plantas formado por células muertas a la madurez,¹⁰ de las plantas de *Opuntia*, para resolver el problema que tenía con sus macetas, puesto que siempre se le rompían. La solución que propuso para el problema fue la mezcla de hormigón y una malla metálica, para reforzar el comportamiento del material pétreo, y que así fuese resistente a la fuerza que ejercían las raíces de las plantas. Este sistema fue evolucionando hasta llegar a convertirse el hormigón armado que hoy en día todo conocemos.

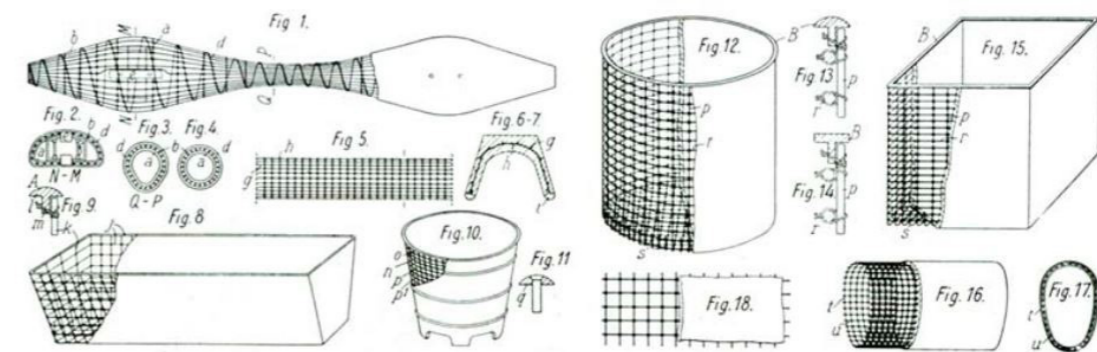


Ilustración 4. MONIER, Joseph. *Bocetos de las primeras macetas de hormigón y acero*. [Imagen Digital]. 1884. Aedas Homes. [consulta: 5 de Dic. 2019]. Disponible en: <https://www.aedashomes.com/blog/monier-hormigon-armado-obra-nueva-canaveral-madrid/>

Simon Schwendener, fue un botánico suizo relacionó la capacidad de carga y la resistencia a flexión de las plantas con los elementos de construcción que se podían asemejar a ellas, afirmando que la biomecánica de las plantas daba lugar a un nuevo campo de estudio si se observaban desde la perspectiva de la ingeniería.

¹⁰ Colaboradores de Wikipedia. Esclerénquima. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 5 Dic. 2019]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Escler%C3%A9nquima>

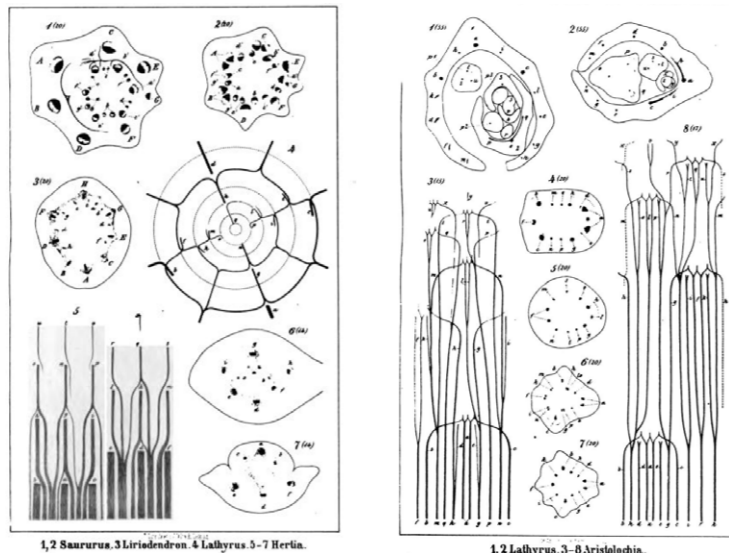


Ilustración 5. SCHWENDENER, Simon y LEITGEB, Hubert. *Imagen de las págs. 178 y 182 del libro "Beiträge zur wissenschaftlichen Botanik"* [imagen digital]. 1858. W. Engelmann. [consultado: 8 de Dic. 2019]. Disponible en: <https://archive.org/details/beitragzurwisse00leitgog/page/n181>

Ernst Haeckel, con su libro de litografías *"Kunstformen der Natur"* (1899), hizo una recolección de las ilustraciones de organismos que había ido registrando y catalogando a lo largo de sus años de estudio. Muchos de estos organismos, habían sido descritos por primera vez en esta gran obra científica, que fue ampliándose a medida que iban sacando nuevas ediciones de ella.

El orden en el que están situadas las diferentes ilustraciones no es casual, ya que con ellas pretendía afianzar las teorías Darwinianas: es por esto que observamos en sus láminas los distintos organismos ordenados en grupos que se relacionan evolutivamente entre sí.

Este libro influyó en el mundo de la arquitectura y el diseño a principios del siglo XX, ya que era uno de los nexos referentes entre ciencia y arte.

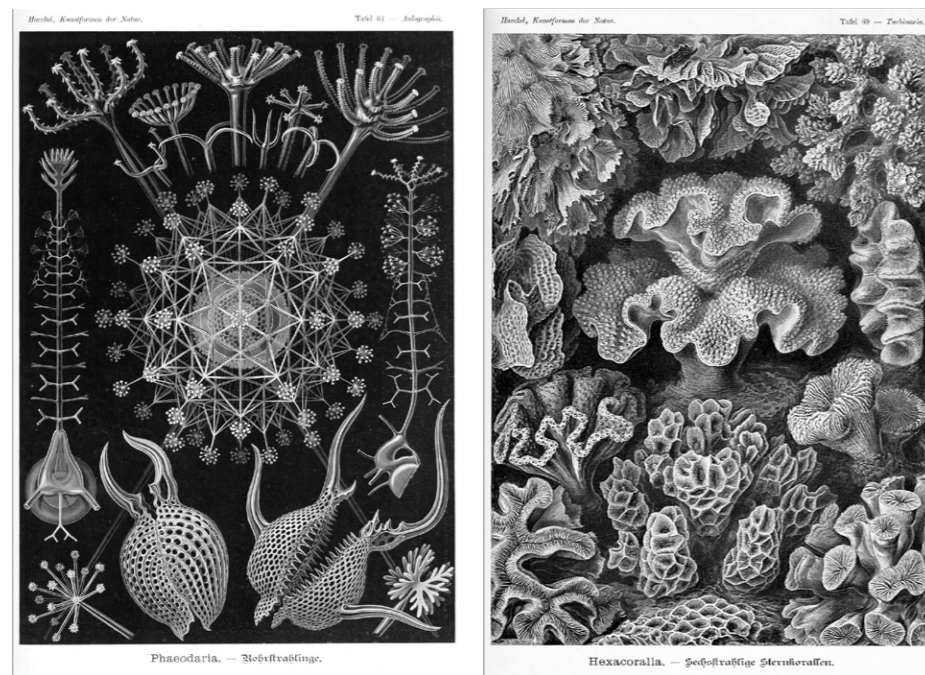


Ilustración 6. HAECKEL, Ernst. *Págs. 211 y 236 del libro "Kunstformen der Natur"* [imagen digital]. 1899. [consultado: 8 de Dic. de 2019] Disponible en: http://www.biolib.de/haeckel/kunstformen/Haeckel_Kunstformen.pdf

Ya entrado el siglo XX, encontramos a diversos inventores cuya inspiración residía en la naturaleza, como **Igo Estric**, que en 1907 diseñó un monoplano inspirado en el vuelo de la semilla tropical *Alsomitra macrocarpa*, al que llamo Taube. **Percy Shaw**, en 1935 inventó el perno de carretera, también conocido como "ojo de gato", tras estudiar el mecanismo de reflexión en la luz de los ojos de los gatos.

Raoul Heinrich Francé con sus libros *"Die Technischen Leistungen der Pflanzen"* (1919) y *"Die Pflanze als Erfinder"* (1920), es uno de los precursores del término actual llamado *bionics*, aunque ya en sus libros él se enunciaba como *biotechnik*. La finalidad de esos libros era analizar desde las plantas para encontrar soluciones técnicas en ellas, ya que según él:

*"La fuerza creativa de la materia vital se ha dado cuenta de todas las posibilidades con tanta riqueza, que la fantasía de cada artista aparece como una copia torpe en comparación. Esto ha sido probado directamente por un experimento; Se les ha pedido a los artistas que realicen variaciones en una forma con fines decorativos, y con la ayuda de todas sus fantasías, solo podrían llevarse a unas pocas docenas de ellos, mientras que en el mundo de los organismos unicelulares hay cientos de modelos fácilmente disponible."*¹¹

A lo largo del libro encontramos diversas comparaciones entre inventos producidos por el ser humanos, con las soluciones que encuentra en la naturaleza de los mismos problemas, dejando ya entrever, que nuestra tecnología se encuentra a años luz de la que la naturaleza nos ofrece.

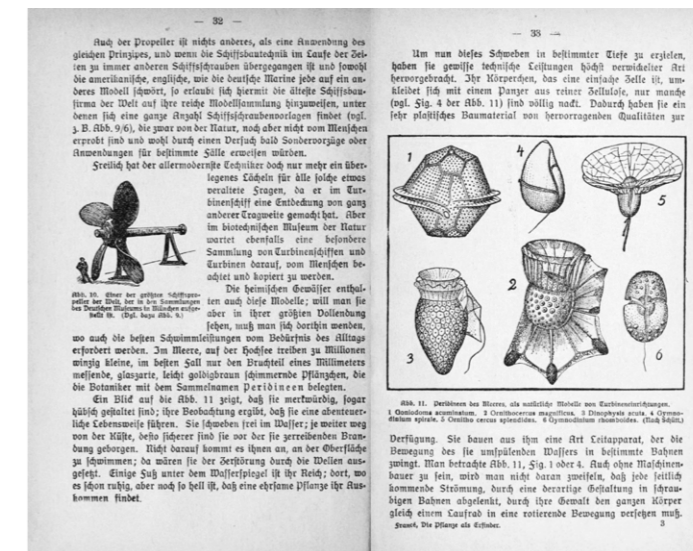


Ilustración 7. HEINRICH FRANCÉ, Raoul. *Páginas 32-33 del libro "Die Pflanze als Erfinder"* [imagen digital]. 1920. [consultado: 10 de Dic. de 2019]. Disponible en: <https://archive.org/stream/diepflanzenalserf00fran/#page/32/mode/2up>

D'Arcy Thompson, con su libro *"On Growth and Form"* (1917-1942) fue considerado como el primer *biomatemático*, ya que fue pionero en combinar el uso de las matemáticas y la biología. A lo largo del texto, explica con diferentes ejemplos las relaciones que encuentra entre diversas formas de la biología, los fenómenos mecánicos, su función y su crecimiento. Como él mismo dice en su libro:

*"La armonía del mundo se manifiesta en Forma y Número, y el corazón y el alma y toda la poesía de la Filosofía Natural se encarnan en el concepto de belleza matemática"*¹²

11 REKVELD, Joost. *Plants as inventors*. En: *light matters* [En línea]. [Consulta: 6 Ene. 2020]. Disponible en: <http://www.joostrekveld.net/?p=574>
 12 D'Arcy Wentworth Thompson. *On Growth and Form*, [En Línea] Cambridge: Cambridge University Press, 1917, p.326, [Consulta: 6 Ene. 2020] OCLC / WorldCat 14786876. Disponible en: <https://archive.org/stream/ongrowthform1917thom?ref=ol#page/n8/mode/2up>

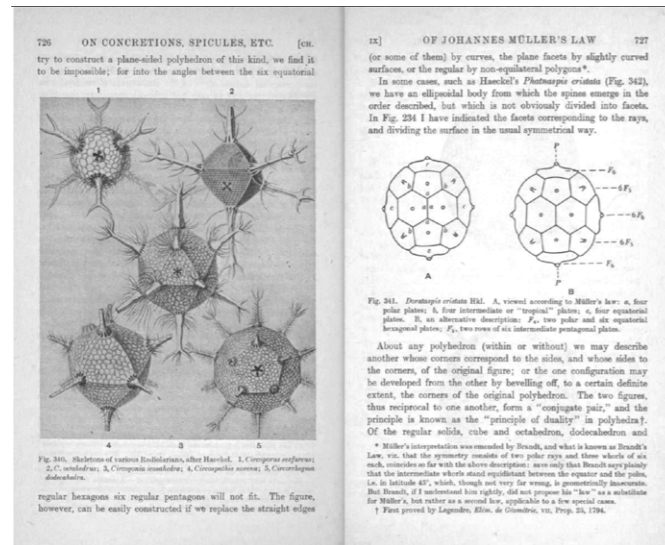


Ilustración 8. THOMPSON, D'Arcy. Páginas 726-727 "On Growth and Form" [imagen digital]. 1945. [consultado: 6 de Ene. de 2020] Disponible en: <https://archive.org/details/ongrowthform00thom/page/726>

En 1955, fue patentado el que podría ser considerado como el primer invento biomimético, el velcro. Aunque la idea surgió varios años antes, cuando **George de Mestral** volvía de un paseo por el campo con su perro, cuando observó, que pegado en su pelaje había un montón de flores de cardo que le eran muy complicadas de quitar. Cuando las quitó, fue al microscopio para entender el motivo por el cual eran tan difícil de desprender, y descubrió que las flores estaban rodeadas de una multitud de ganchitos que hacían que se adhiresen al pelo del animal. Imaginó entonces un sistema de cierre y abertura que imitase el funcionamiento de esta planta, y diseñó el producto.

Pocos años después, en 1969, fue cuando **Otto Schmitt**, usa el término de *biomimética*, como hemos mencionado en el apartado anterior, poniéndolo de moda junto con Janine Benyus e inspirando a otros inventores y diseñadores a imaginar y crear sus proyectos bajo la influencia de este término.

Algunos de los inventos que surgieron después son, la cinta adhesiva inspirada en las patas del gecko, capaz de pegarse y despegarse sin perder su adherencia; el tren inspirado en el pico del ave martín pescador, que logro subsanar el problema del sonido cada vez que los trenes entraban en los túneles; o la superficie antimicrobiana, gracias a la imitación los dentículos dérmicos de la piel de tiburón, entre otros.

También encontramos ejemplos aplicados en el campo de la arquitectura que se explicarán con mayor detenimiento en capítulos posteriores.

CAPITULO 2. BIOGEOMETRIA Y FORMOGÉNESIS.

Dado que en el capítulo anterior se ha hablado en repetidas ocasiones de cómo, diferentes autores han escrito libros relacionando la naturaleza con otros campos, creo pertinente que el desarrollo de punto este esté ligado a las formas que encontramos en la naturaleza, desde una perspectiva un poco distante de la arquitectónica, para entender cómo se han ido relacionando estas con la arquitectura en los sucesivos apartados.

2.1. LAS FORMAS Y SU FUNCIONAMIENTO EN LA NATURALEZA.

Las formas naturales, desde cualquier época nos han fascinado desde un punto estético, pero estas formas siempre van determinadas por una función, unos procesos, unos mecanismos y unos patrones que se repiten en diferentes especies y por eso las hacen tan eficaces.

¿Será por eso que nos resultan tan atractivas?

Nos acercaremos a este punto a través de una aproximación de la arquitectura desde el concepto de la física referido a las formas. Una de las reflexiones más interesantes al respecto es planteada por el investigador **Jorge Wagensberg**, en su libro *“La rebelión de las formas o Cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta”* (2005).

En este libro estudia algunas de las formas que encontramos en la naturaleza, bajo la premisa de que todo lo que existe, existe porque ha pasado por un proceso de selección.

Y si ha logrado pasar esa selección y ha logrado prevalecer a lo largo del tiempo, la pregunta que plantea Wagensberg resulta lógica: ¿Cuáles son las formas más probables en la naturaleza? ¿Por qué estas y no otras?

Para ello Wagensberg plantea tres mundos, *un mundo inerte*, que perdura gracias a su resistencia mediante un proceso de selección fundamental, *un mundo vivo*, que prevalece por su capacidad de adaptación y evolución, gracias a la selección natural y un último *un mundo cultural*, que pervive por selección cultural.

Volviendo a ocupar el punto en el que nos encontramos, y siguiendo con el pensamiento de Wagensberg, este emplea esta misma metodología para el estudio de las formas, ya que estas también surgen y emergen o desaparecen. Es por lo que él estudia nueve formas capaces de superar este proceso de selección.

En este punto se hablará de varias de estas formas y alguna otra para explicar la reacción que existe entre la naturaleza y las formas que esta genera, ya que quizá la geometría que propone el ser humano es demasiado estricta y poco eficiente en muchas ocasiones, y por eso creo que nos queda aún mucho camino por recorrer para aprender de la naturaleza.

2.2. LA ESFERA.

Las formas de la naturaleza no son casuales, ya que esta elige sus formas geométricas buscando la mayor eficacia en su configuración, aplicando la ley del mínimo esfuerzo, la forma esférica.

La **esfera** es la menor superficie capaz de almacenar cosas en su interior gastando el menor material posible para realizar esta acción, esto se debe a que es la forma geométrica natural con la menor relación entre su área y el volumen que contiene.

En la naturaleza encontramos esta forma en diversos casos, uno de ellos en el mundo animal, como explican en uno de los capítulos de Grandes Documentales en RTVE, la forma redonda ayuda a mantener el calor corporal o el alimento, como es el caso de los huevos. Además esta forma, como es el caso de las tortugas - en el que los huevos son *estrictamente esféricos*, los dotan de una mayor resistencia estructural, simplemente con una casca rígida pero fina.

Sin embargo, los huevos de las aves no son completamente esféricos, tienen forma de un **ovalo cónico**. Esto se debe a que su función no es la misma que los anteriores, una de las causas es para protegerse de los depredadores. Esta forma se asemeja con la de una bóveda, y al igual que esta, funciona bien a compresión, desviando así la presión que ejercen sus depredadores con sus mandíbulas.

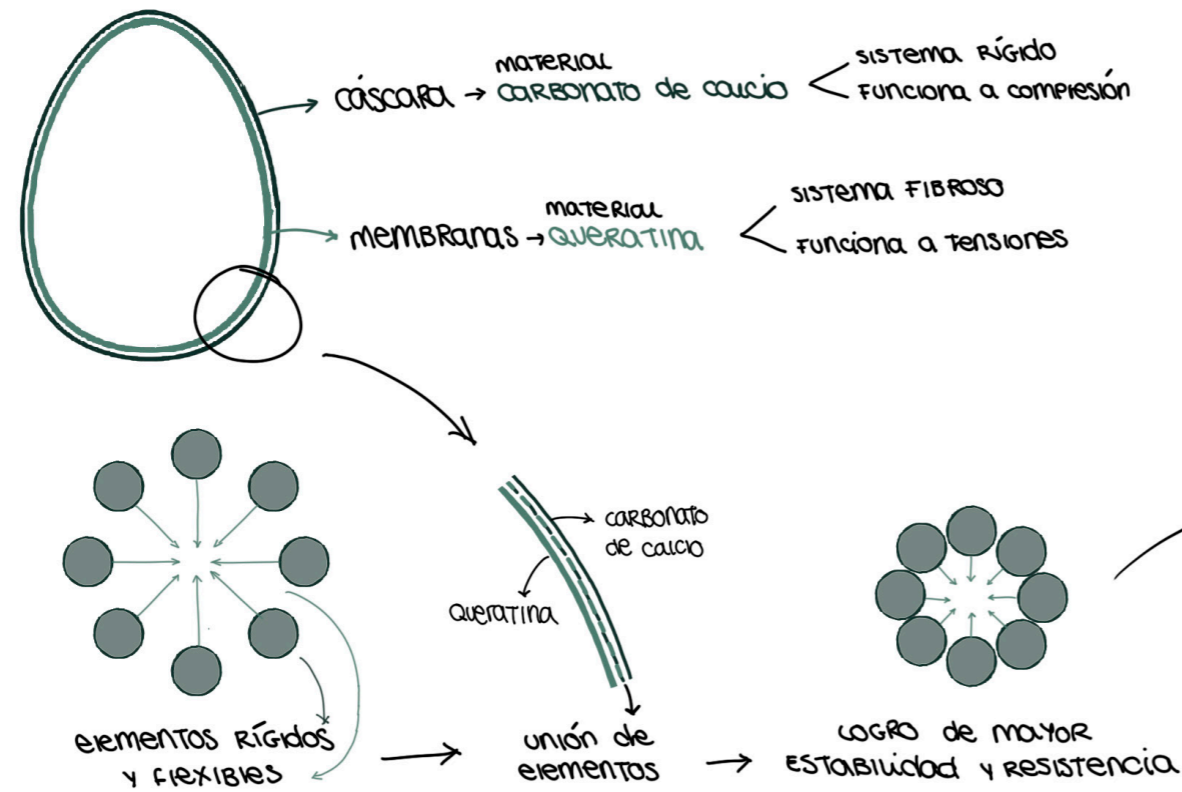
Otra de las cuestiones por la que los huevos adoptan esta forma, es para evitar la posibilidad de caerse de un nido o rodar en línea recta, como si de un tentempié se tratara. Este diseño está pensado también para el movimiento, y en el caso de caer, esta configuración le otorga la posibilidad de dar vueltas, tendiendo a volver al mismo sitio.

Este es un caso en el que podemos apreciar como la teoría de Wagensberg, la cual dice que las formas también sobreviven gracias a la selección natural cobra más sentido, ya que cada forma tiene una función que la hace sobrevivir. ¿Quién diría que podemos aprender y extrapolar tantas ideas y leyes solo con la forma de un huevo?

Del mismo modo que observamos como la forma de ovovalo cónico dota al huevo de un movimiento particular, observamos como la forma redonda siempre es propensa al movimiento. Podemos observar con mayor claridad en el escarabajo pelotero. Este utiliza la forma esférica con el fin de *mover el mayor material con el mínimo esfuerzo*.

Algunas las especies vegetales copian esta forma esférica y redonda para asegurarse su reproducción y su perpetuación. Las semillas tienden a tener esta forma para que estas rueden y puedan dispersarse en el suelo, surgiendo así los bosques.

RELACIONES Y UNIONES DE LOS ELEMENTOS DE LA CÁSCARA



ESTRUCTURA DEL HUEVO

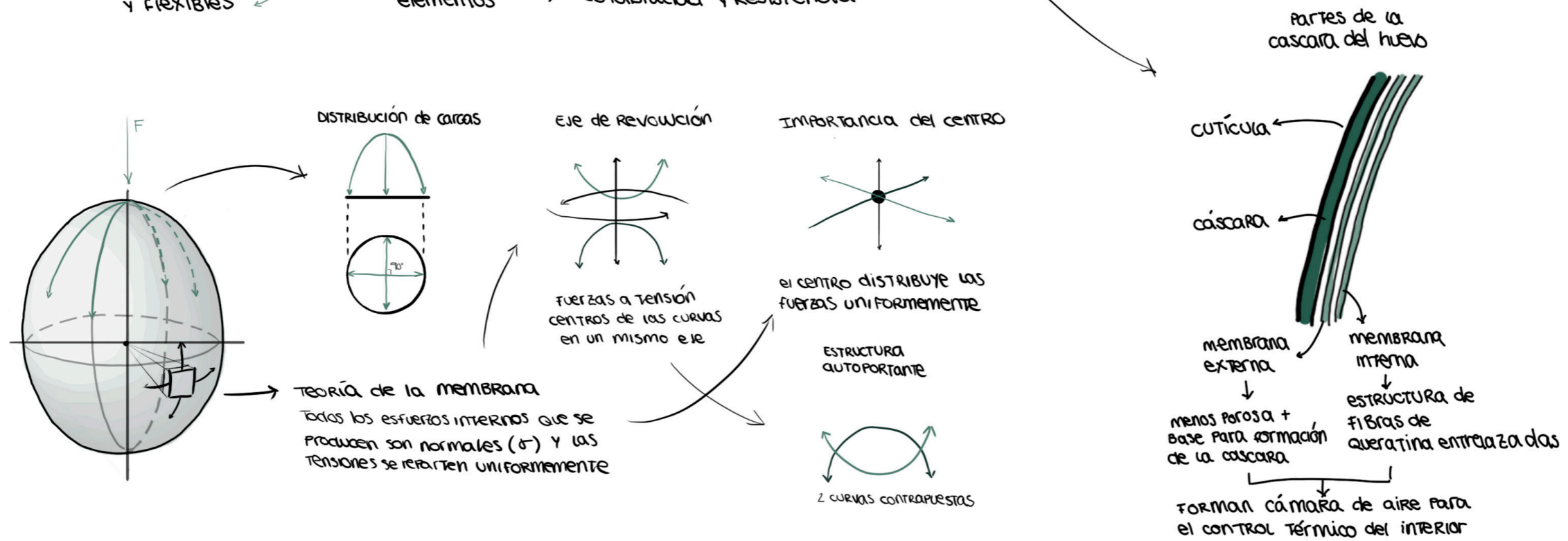
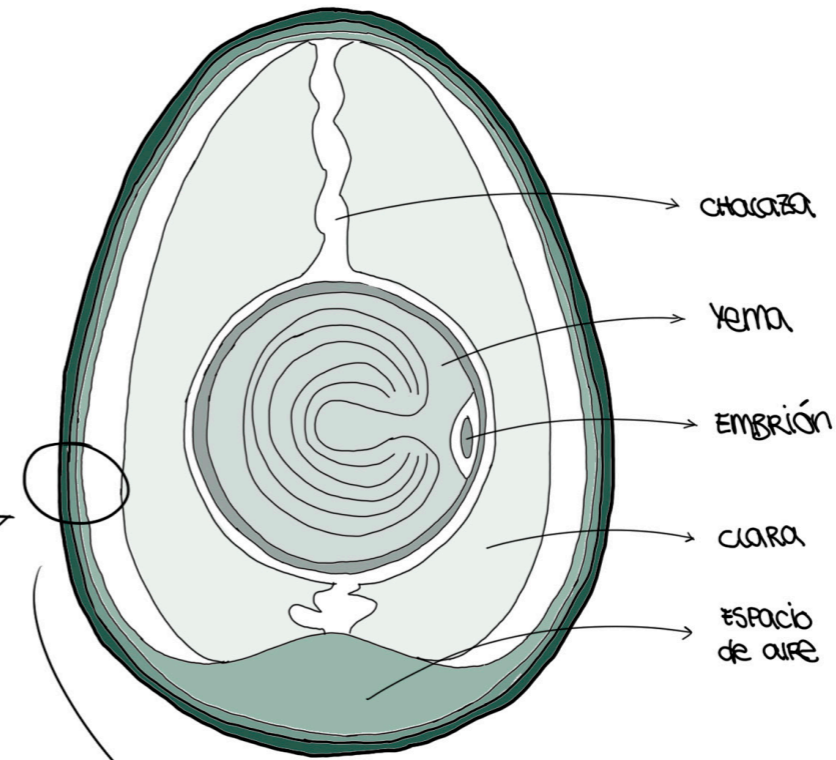


Ilustración 9. Funcionamiento de los materiales y la estructura que forman el huevo. Elaboración propia.

2.3. LA ESPIRAL, LA HÉLICE, EL ÁNGULO.

La **espiral geométrica** que encontramos en la naturaleza, aquella en cuya forma nos fijamos instintivamente, es la relacionada con el **número phi**. Es un número de la serie de **Fibonacci**, siendo esta una de las curvas más numerosas de la naturaleza. Como dice **Wagensberg**, *la espiral es la manera más óptima de representar el crecimiento, la que responde a la necesidad de moverse y crecer ocupando el mínimo espacio, incluyendo también la necesidad de protección.*

Lo que nos vuelve a llevar a la **ley del mínimo esfuerzo** que emplea y rige toda la naturaleza, que organiza y dimensiona de la manera más óptima. Como siempre empleando el mínimo de material para conseguir la forma más eficiente.

La espiral la podemos encontrar en la mayoría de figuras curvas que existen en la naturaleza. Es el número phi, el que rige estas espirales, pero siendo los **números de la sucesión de Fibonacci** los que no dan pie a entender mejor a entender el **crecimiento de la espiral**. Gracias a ellos podemos conocer la cantidad de espirales que contiene una piña, la disposición de las espirales que encontramos en una alcachofa, el número de espirales en el que se organizan los girasoles o los grupos de espinas que tiene un cactus.

PROPORCIÓN ÁUREA + ESPIRAL DE FIBONACCI

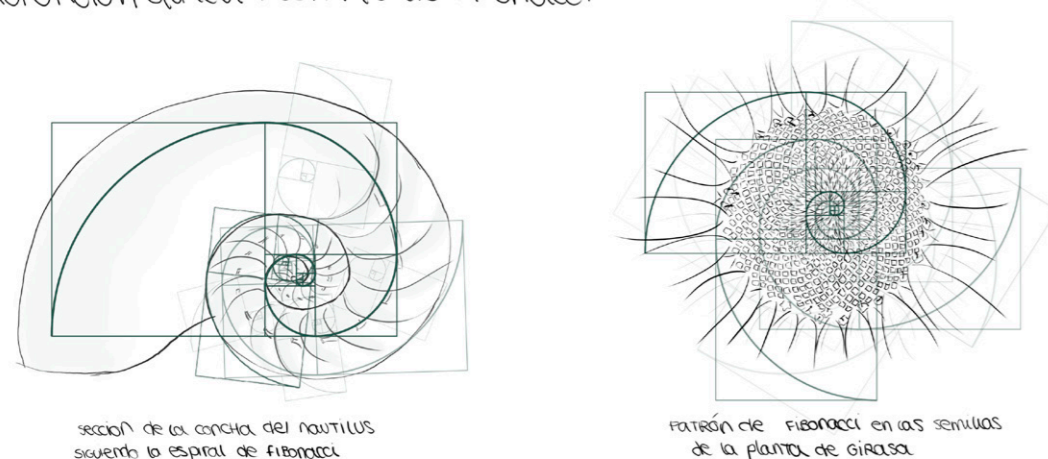


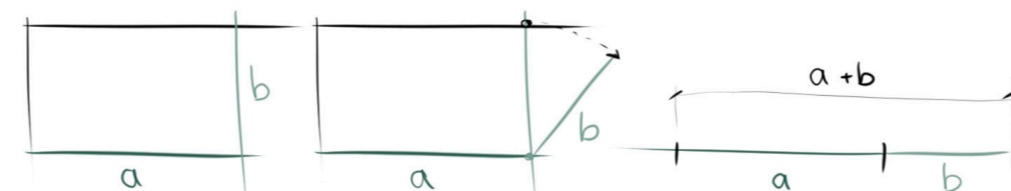
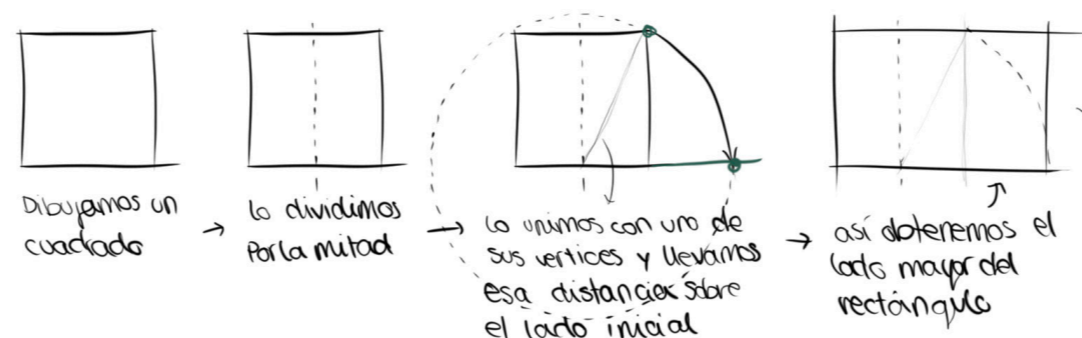
Ilustración 10. Ejemplos de la espiral de Fibonacci en la naturaleza. Sección del Nautilus y semillas de girasol. Elaboración propia.

Podríamos poner casi infinitos ejemplos del mundo natural relacionado con el número de la serie de Fibonacci. Sin embargo en ella encontramos una relación su relación con el crecimiento. Gracias a esta serie de números se encuentra un **orden en el crecimiento de las plantas o las flores**:

“con dos segmentos que mantienen la proporción PHI formamos un círculo, el ángulo que se genera es de 137 grados y medio. El preciso para que al repetirlo, cada pétalo nazca minimizando la superposición con el que tiene al lado o encima.”¹³

PROPORCIÓN ÁUREA + ESPIRAL DE FIBONACCI

PROPORCIÓN ÁUREA



En este rectángulo se cumple la proporción áurea, en la que el lado mayor a , es al lado menor b . Lo que la suma de ambos $a+b$, es al mayor a . lo que expresado matemáticamente es:

$$\frac{a}{b} = \frac{(a+b)}{a} = \varphi (\text{phi}) = 1.618...$$

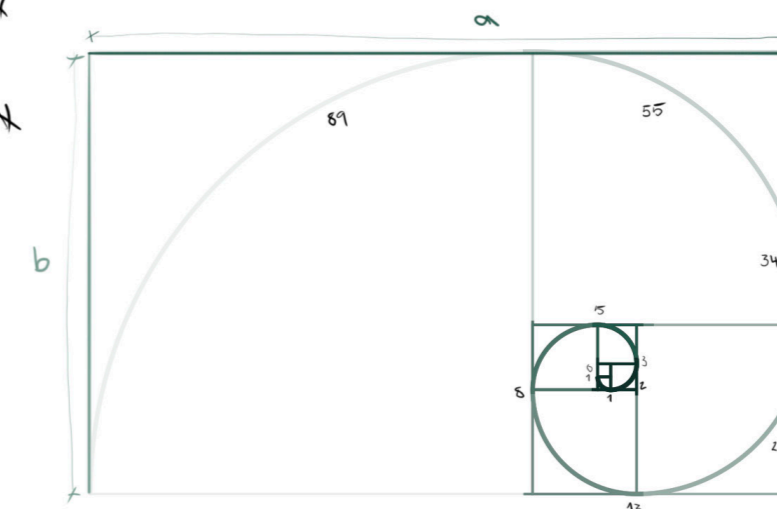
El resultado de esta proporción es Phi

SUCESIÓN DE FIBONACCI

→ usando términos de la sucesión de Fibonacci se pueden dibujar rectángulos de dimensiones iguales a los términos de la sucesión.
→ si unes esos rectángulos tienes como resultado la espiral de fibonacci.

1	1						
1	1	1					
2	1	2	1				
3	1	3	3	1			
5	1	4	6	4	1		
8	1	5	10	10	5	1	
13	1	6	15	20	15	6	1
21	1	7	21	35	35	21	7
34	1	8	28	56	70	56	28
55	1	9	36	84	126	126	84
89	1	10	45	126	210	252	126

ESPIRAL DE FIBONACCI



Si se divide cada valor de la serie de Fibonacci por el anterior, el resultado tiende a phi, generando así la relación que existe entre el número Phi, la proporción áurea y la sucesión y espiral de Fibonacci.

¹³ AAVV. *Grandes documentales - Biomimesis: Biogeometría* [En línea]. Escrita, producida y dirigida por Álvaro Mendoza. 48min. RTVE, 2019. [Fecha de consulta: 22 Mar. 2019]. Disponible en: www.rtve.es/falacarta/videos/grandes-documentales/grandes-documentales-biomimesis-biogeometria/5079538/

Ilustración 11. Relación entre la proporción áurea y la espiral de Fibonacci gráfica y matemática. Elaboración propia.

Pero esto no solo pasa en dos dimensiones - el crecimiento de los pétalos de las flores - o lo que en términos de la biología se conoce como **Ley de Ludwig**. Esta espiral se amplía a una tercera dimensión, siguiendo una trayectoria ascendente con la que forma una **hélice**. En esta se aprecia como el crecimiento de los tallos alrededor de las hojas sigue esta misma configuración. Incluso se observa:

“la relación que existe entre las nervaduras de las hojas de los árboles o el grosor de las ramas principales y el tronco, o entre las ramas principales y las secundarias donde el grosor de una equivale a Phi.”¹⁴

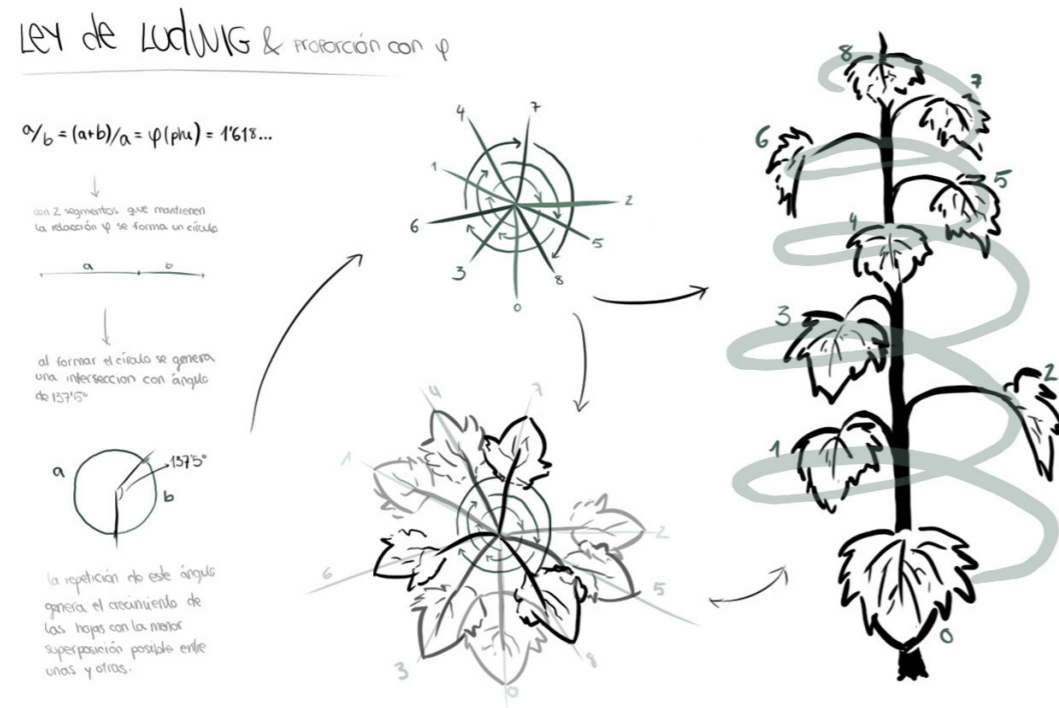


Ilustración 12. Esquema de la Ley de Ludwig en relación al número Phi. Elaboración propia.

Con esto la naturaleza nos vuelve a demostrar como mediante su geometría consigue una mayor eficiencia energética con la menor cantidad de materia, porque, ¿de qué serviría que unas hojas estuviesen superpuestas con otras? ¿Acaso cuantas más hojas mayor sería su captación de energía? Si nos fijásemos más a la hora de diseñar, nos daríamos cuenta de la cantidad de cosas que podríamos mejorar en cuanto a eficiencia energética del mundo natural.

Por otra parte Wagensberg plantea que la forma del **ángulo** en el mundo vivo se manifiesta en muchas ocasiones en forma de púas, pinchos o garras. Bajo mi punto de vista, no es del todo cierto, ya que muchas de estas formas en la naturaleza tienden a la forma de una espiral, más concretamente en la **forma helicoidal**.

Si bien es cierto que su postura frente al **ángulo** en la que lo define como “una concentración de fuerzas en un punto suficientemente pequeño” y su definición de **hélice**, cuya postura es que *agarra*, en mi opinión algunos de los ejemplos que él pone sería la combinación de ambas formas.

14 AAVV. Investigando ConCiencias. El número áureo. En: wordpress.colegio-arcangel.com/investigandoconciencias/el-numero-aureo/

Sería el caso de muchas de las cornamentas que existen en el mundo animal. En el caso de los ciervos o las cabras, que cumplen una doble función:

“se trata de herramientas y armas, si no que a la vez son elementos de selección sexual. Así que necesitan belleza y fuerza. La espiral asegura su eficacia en ambos sentidos [...] dibujando cuernas simétricas, llamativas y muy resistentes y con la menor cantidad de material.”¹⁵

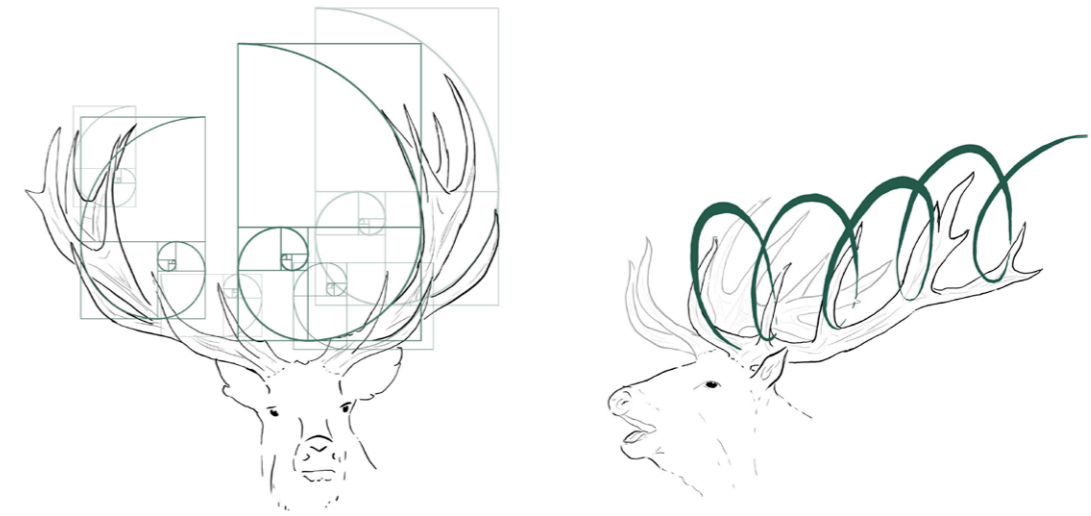


Ilustración 13. Relación entre la hélice y la espiral con la cornamenta del ciervo. Elaboración propia.

En cada una de las especies esta hélice toma una forma diferente según la necesidad de cada una. Entre la gran variedad que existe cabe destacar la cornamenta del ciervo ya que aquí entra en juego otro factor, la gravedad y el centro de masa.

“se adapta increíblemente a la ley de la gravedad para que el animal que la porta pueda moverla, con el mínimo esfuerzo. El centro de gravedad de un elemento que se alarga y pesa más con el tiempo se mantiene si lo que crece lo hace respondiendo a una espiral. Mantener el centro de gravedad de una cornamenta es fundamental para moverse con agilidad y rapidez, para escapar de los depredadores o para luchar por las hembras.”¹⁶

¿Podríamos aprender de la cornamenta de los ciervos para proyectar rascacielos?. Y ya que hay muchos edificios en altura con forma de espiral, ¿serían más eficientes y más resistentes si emulasen este patrón de crecimiento?, ¿Necesitaríamos así una menor cantidad de material para obtener mejores prestaciones? Como dice Janine Benyus:

“Las respuestas sobre cómo vivir de manera sostenible en nuestro planeta están a nuestro alrededor”.

15 AAVV. Grandes documentales - Biomimesis: Biogeometría (2019) Op. Cit.

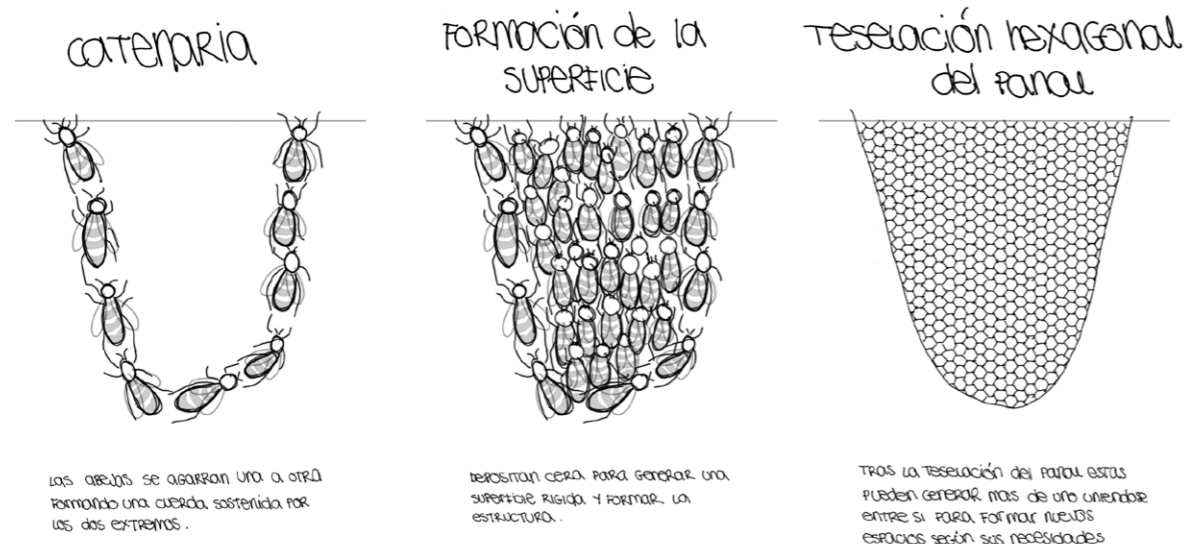


Ilustración 14. El uso de la catenaria en la construcción de un panal de abejas. Elaboración propia.

Siguiendo con las definiciones de **Wagensberg**, la *catenaria aguanta*. Pero antes de todo, ¿qué es la catenaria?

“Una **catenaria** es una curva ideal que representa físicamente la curva generada por una cadena, cuerda o cable sin rigidez flexional, suspendida de sus dos extremos y sometida a un campo gravitatorio uniforme.”¹⁶

Siempre que pensamos en la catenaria y en su relación con la naturaleza, instintivamente casi siempre pensamos en las telas de araña. Pero también la podemos encontrar en forma de cúpula en elementos como los frutos secos, las raíces y un sinnúmero de estructuras naturales.

Pero, ¿por qué la naturaleza prefiere esta curva? Al igual que siempre, por la ley del mínimo esfuerzo. Esta curva es la más eficiente a tensiones que se adapta libremente a la fuerza de la gravedad.

Si observamos el modo en el que las abejas construyen sus colmenas encontramos un claro ejemplo de construcción con catenarias en el mundo natural.

“Un grupo de obreras, enganchadas por las patas, forman una cadena que, suspendida en el aire, define un arco catenario inicial. El panal se edifica de arriba abajo, tomando como base formas funiculares”¹⁷

Con esto consiguen generar una estructura para su colmena con una masa distribuida uniformemente, estando únicamente sometida a las fuerzas de gravedad, ya que esta curva se caracteriza por carecer de tensiones horizontales debido a su geometría.

16 Colaboradores de Wikipedia. Catenaria. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [En línea]. 2019. [Consulta: 14 Sep. 2019]. Disponible en <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Catenaria>

17 RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena: de Gaudí a Le Corbusier*, ed.: Ediciones Siruela, Madrid. 1998, p. 47.

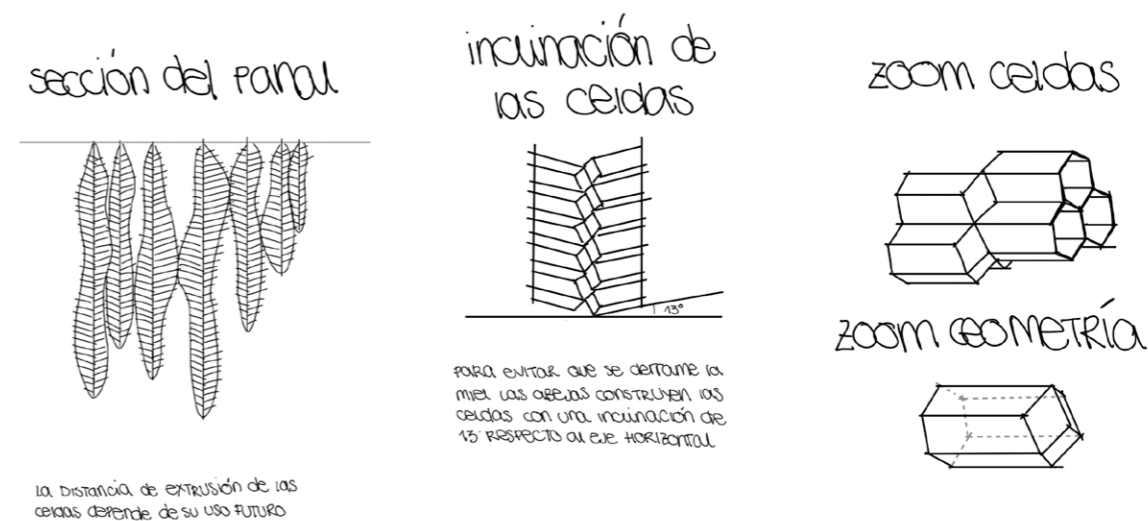


Ilustración 15. El uso del hexágono en la construcción de un panal de abejas. Elaboración propia.

El hexágono es una forma que podemos encontrar en muchos campos de la naturaleza. Gracias a esta figura geométrica regular podemos obtener un teselado de una superficie.

“**Teselar** una superficie consiste en cubrirla con figuras de forma que no queden espacios sin cubrir y que dichas figuras no se superpongan. Un caso particular sería cuando la figura utilizada es siempre el mismo polígono regular. Este caso se conoce como teselado regular.”¹⁸

Sin embargo el hexágono no es la única figura geométrica regular que encontramos para hacer un teselado regular. También existen el triángulo y el cuadrado. ¿Por qué la naturaleza prefiere entonces el hexágono? Esto es debido a que **el hexágono es la configuración óptima para ocupar mayor espacio en un plano con la menor cantidad de material posible**. Quizá es por ello por lo que Wagensberg dice que el hexágono es la forma de la naturaleza que pavimenta.

Las abejas necesitan 15 gramos de miel para producir 1 solo gramo de cera. Es por ello que, las abejas para gastar menos cera haciendo sus panales los hacen de forma hexagonal. Para ello realizan las teselaciones de hexágonos con dos capas de celdas abiertas en direcciones opuestas. Esta estructura les permite conseguir el mayor volumen posible para el almacenamiento.

La formación rocosa denominada *Calzada del Gigante*, es otro claro ejemplo de los procedimientos eficientes de la naturaleza. Estas formas basálticas surgen por el contacto de la lava líquida al enfriarse de manera muy rápida con el agua. Estas empiezan a enfriarse generando grandes presiones y choques entre sí. Para que estas fuerzas alcancen una posición de equilibrio, tienden a adoptar el estado en el que el gasto energético sea menor. Y es aquí cuando entra en juego la figura geométrica del hexágono.

“En este caso, la energía del sistema será mínima cuando la fuerza generada entre los núcleos se reparta en la mayor cantidad superficie posible, minimizando así la presión. Esto ocurre cuando toda la superficie de las paredes de cada núcleo está en contacto con otras y todos los núcleos encajan entre ellos. **La forma que permite maximizar el área del contacto es el hexágono**, así que esta es la forma que adoptan los cristales al ser aplastados unos contra los otros.”¹⁹

18 AAVV. Hexágonos en la naturaleza. En: *malvargamath.wordpress* [En línea]. 2014. [Consulta: 15 Sep. 2019]. Disponible en: <https://malvargamath.wordpress.com/2014/11/26/hexagonos-en-la-naturaleza/>

19 PEREYRA, Jordi. La calzada del gigante. En: *Ciencia de sofá*. [En línea]. 2013. [Consulta: 15 Sep. 2019]. Disponible en: <https://cienciasofa.com/2013/08/la-calzada-del-gigante.html>

Las telas orbiculares de las arañas surgen del movimiento de la espiral, para crecer ocupando el mínimo espacio, además buscando el camino más corto, la recta. La seda sale en estado líquido, al pegar segmentos ordenados en los radios de la estructura se genera una retícula de trapecios regulares con los lados paralelos. Estas estructuras sirven de patrón para todas nuestras redes. Las arañas comenzaron a dibujar rectas y polígonos, de ellos la figura más eficaz es el hexágono.

2.6. LOS FRACTALES.

A diferencia de los ejemplos anteriormente citados, no todo en la naturaleza se rige por las leyes matemáticas clásicas. En este apartado observaremos cómo no todo responde a las formas geométricas puras: a veces los ángulos, las curvas, las líneas aparecen en la naturaleza de manera desorganizada, confusa, caótica o anárquica. ¿Podríamos decir que es nuestra geometría demasiado inflexible? Quizá el problema sea nuestro, quizá los seres vivos no seamos aún conscientes de las formas geométricas que se esconden en el diseño de la naturaleza

Pero, ¿y si hubiese alguna forma de encontrar el orden en el caos? Y es aquí cuando aparece el fractal de la mano de **Benoît Mandelbrot**. Es un matemático polaco, que tiene una visión distinta de cómo aplicar las matemáticas, ya que donde unos sólo ven fórmulas, él ve imágenes. Encontró en la fracturación una pauta lógica que seguía el aparente desorden y caos natural.

FRACTAL DE MANDELBROT

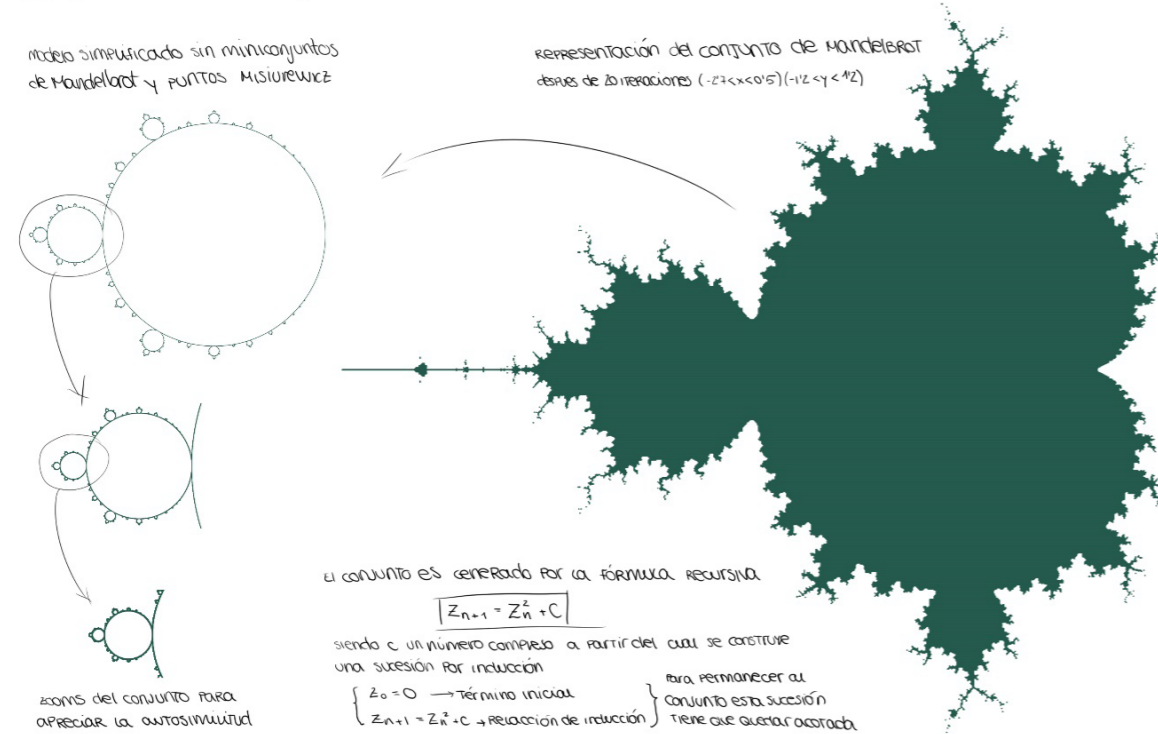


Ilustración 16. Representación del conjunto de Mandelbrot y la autosimilitud. Aunque Mandelbrot fue el primero que descubrió y puso nombre a los fractales, muchas de sus inspiraciones para desarrollarlo provenían de los llamados monstruos matemáticos que proceden de la matemática clásica. Elaboración propia.

Por ello fue uno de los precursores del término geometría fractal, cuando publicó su libro "*Fractal Geometry of Nature*" (1982). En él desarrolla y explica sus estudios en este campo y donde encontrarlos en la naturaleza. Demuestra como muchas de las formas aparentemente caóticas e inexplicables que encontramos en la naturaleza pueden ser explicadas como fractales.

Una de las *características fundamentales de la geometría fractal* es la autosimilitud. Cuando miramos una forma fractal a una escala y nos acercamos a otra escala menor, seguimos apreciando la misma forma, ya que no se logra distinguir un cambio de escala. Esto quiere decir que:

*"la totalidad del fractal es igual a cualquiera de sus partes, [...] la similitud del patrón no deja de sucederse."*²⁰

Cabe mencionar a algunos de sus predecesores en este campo. Ya que como él mismo cita en su libro, le influyeron para desarrollar el concepto de fractal. **G. Cantor**, creador de la teoría de conjuntos, **G. Peano**, que muestra como las curvas pueden llegar a cubrir un plano bajo algunas reglas iterativas, **D. Hilbert**, basándose en esas reglas construye la curva que lleva su nombre, curva de Hilbert, o **H. von Koch**, quien introdujo la curva que lleva su nombre o también conocida como curva de copo de nieve o isla de Koch.

También encontramos a **W. Sierpinski**, quien encontró la autosimilitud en la estructura del triángulo de Sierpinski o alfombra de Sierpinski, utilizando cuadrados la cual posteriormente vista en tres dimensiones da lugar a la formación llamada Esponja de Menger, o **G. Julia**, el primer matemático en decir cómo "*por medio de una sucesión definida por inducción, un conjunto cuya frontera es imposible de dibujar a pulso por ser de longitud infinita, entre otras propiedades*"²¹, entre otros.

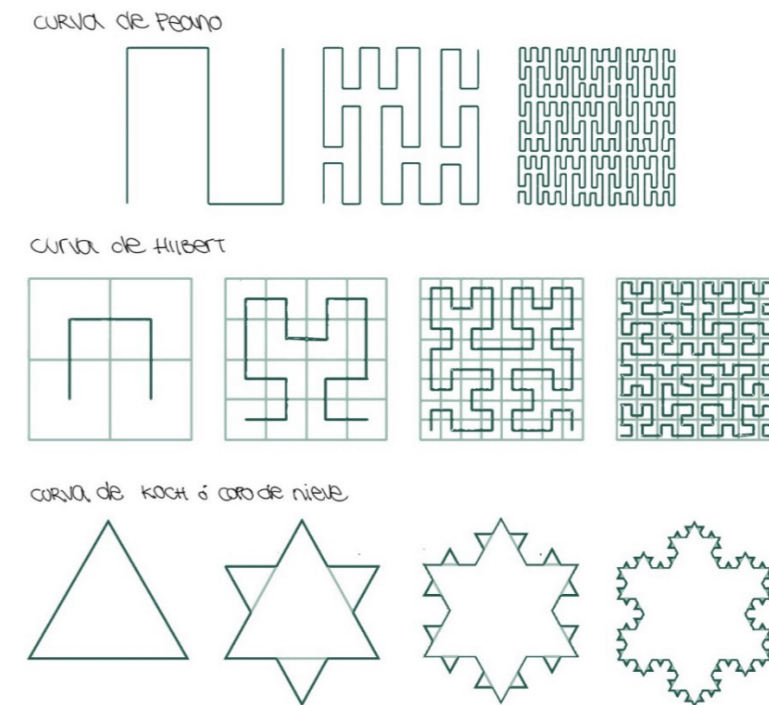


Ilustración 17. Representación gráfica de las curvas de Peano, curva de Hilbert y curva de Koch. [imagen digital] Fuente de la imagen base: <http://laaventuradelaciencia.blogspot.com/2013/09/fractales-los-colores-del-infinito.html>

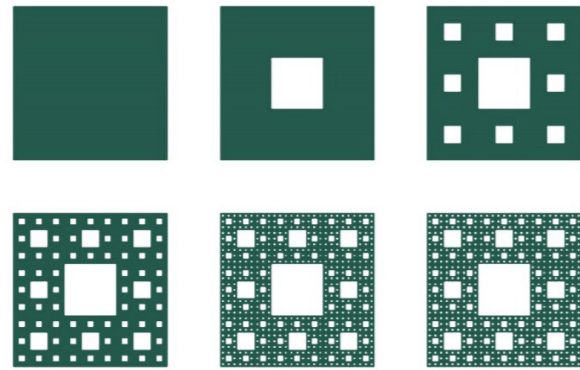
20 AAVV. *Revelando el mayor secreto del diseño de la naturaleza: Fractales* [en línea]. En: YouTube. delf ron. 54 min. Publicado en 18 Oct. 2016 [Consulta: 8 Abril 2019]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=YY5UgAsBNkw>

21 Colaboradores de Wikipedia. Gaston Julia. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [En línea]. 2019. [Consulta: 6 May. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Gaston_Julia

CONSTRUCCIÓN DEL TRIÁNGULO DE SIERPINSKI



CONSTRUCCIÓN DE LA ALFOMBRA DE SIERPINSKI



ESPONJA DE MENGER

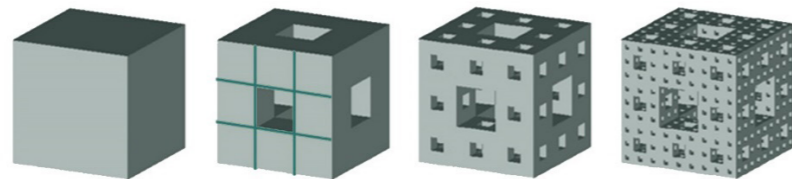


Ilustración 18. Representación gráfica del triángulo de Sierpinski, alfombra de Sierpinski y esponja de Menger. [imagen digital] Fuente de la imagen base: http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/geometria_fractal/proyectos/movimiento_browniano/sierpinski.htm

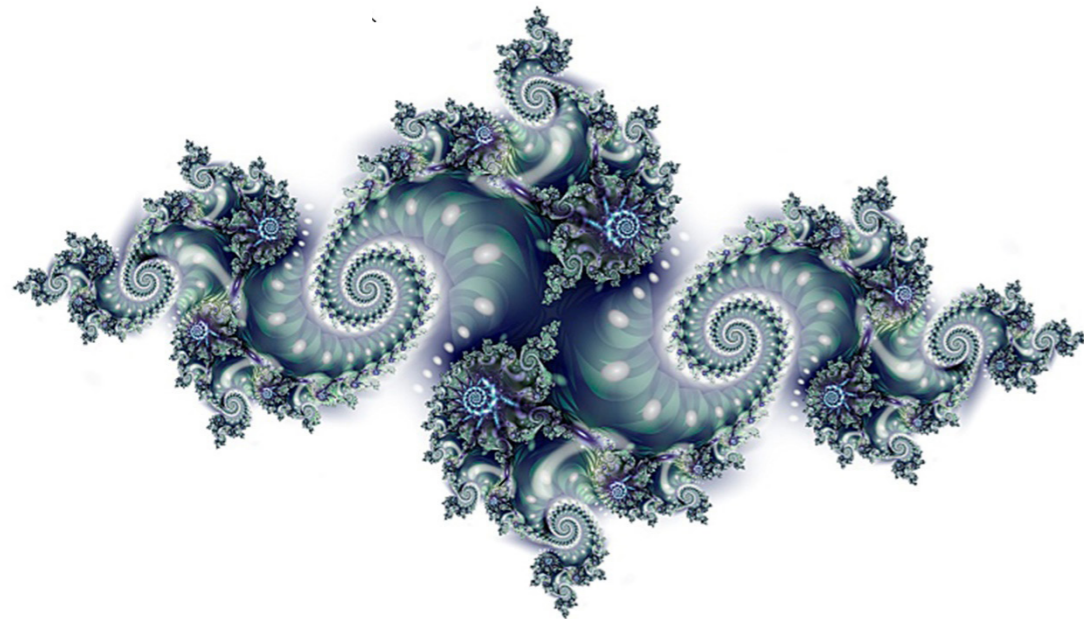


Ilustración 19. MANDELBROT, Benoit. Representación gráfica del conjunto de Julia. Archivo jpeg. 800 x 450 px. Orden in Caos 2013. [consulta: 10 de Ene de 2020] Disponible en: <https://orderinchaos.wordpress.com/tag/julia-set/>

Lo que hizo posible el descubrimiento de **Mandelbrot** fue la tecnología, más concretamente la invención del ordenador. Gracias a este avance tecnológico pudo iterar las diferentes funciones una gran cantidad de veces e ir representando los puntos que se obtenían de ellas para poder así generar las formas fractales.

El descubrimiento de la fractalidad da lugar a realidades más complejas de entender el espacio que nos rodea. Uno de los ejemplos en los que podemos observar con mayor claridad la autosimilitud en la naturaleza, como una forma biológica compleja, es un árbol. En él se aprecia como desde el tronco central se va ramificando en diferentes partes y como estas ramas se vuelven a ramificar a su vez en otras menores.

Otros de los muchos que existen en la naturaleza, en los que podemos encontrar esta geometría fractal son en los patrones de canalización de los ríos en las montañas, el movimiento de las nubes o el cuerpo humano.

CAPITULO 3.
ARQUITECTURAS INSPIRADAS EN LA
NATURALEZA. Una primera aproximación.

Tras una primera aproximación en los capítulos anteriores al campo de la biomímesis vinculada a otras disciplinas, resulta conveniente hacerlo ahora desde una visión arquitectónica.

En este capítulo, se mostrará una visión general de la historia de la mimesis de la naturaleza vinculada a la arquitectura. Esto nos permitirá conocer y comprender los orígenes de la biomímesis, mediante los diferentes posicionamientos y acontecimientos, que a lo largo de los años han originado este nuevo término.

3.1. EDAD ANTIGUA. LAS TEORÍAS DE LA MÍMESIS.

Evidentemente la relación entre arquitectura y naturaleza constituye una cuestión secular para los procesos creativos arquitectónicos, que ha sido abordada desde múltiples sensibilidades a lo largo de la historia. Sin embargo, para el desarrollo de este trabajo en particular, interesa recuperar aquí ciertos aspectos de este tema.

Las primeras ideas de *mimesis* estaban únicamente relacionadas con un concepto, el estético. **Aristóteles** definió la mimesis como “*la imitación de la naturaleza como fin esencial del arte*”.²²

Hablaremos en primer lugar de cómo las **teorías clásicas** intentaban introducir la idea de *mimesis* al campo de la arquitectura. Para ello nos remontaremos al **tratado de Vitruvio**, en el que hallaremos los diferentes puntos de partida en los que se reinterpreta la mimesis de la naturaleza en la arquitectura.

Estas teorías se van a interpretar de tres modos diferentes, como explica **Juan Calduch** en su libro “*Naturaleza y artefacto*” (2000):

*“El primero es la interpretación antropomórfica de la arquitectura; el segundo, es la mimesis icónica de objetos naturales; el tercero, es la imitación del refugio que nos brinda la misma naturaleza, como origen de la arquitectura.”*²³

Según la primera teoría, podemos apreciar cómo en los órdenes dórico y jónico los sistemas de medidas empleados en la arquitectura se basaban en las medidas del cuerpo humano. Estas medidas tenían en cuenta las diferentes relaciones armónicas de las partes de la figura.

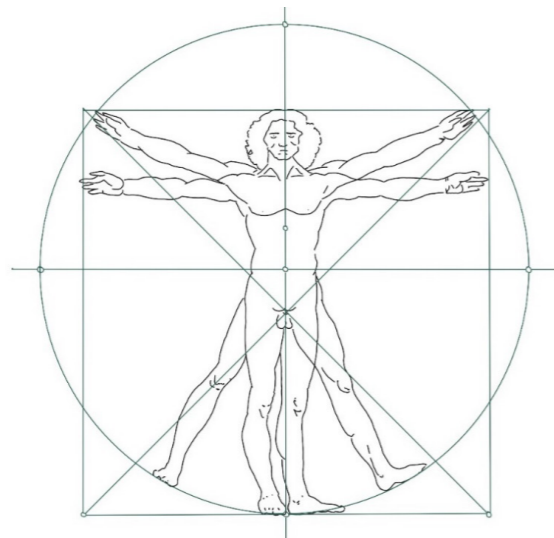


Ilustración 20. El hombre de Vitruvio de Leonardo da Vinci. Elaboración propia.

22 Colaboradores de Wikipedia. Mimesis. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [En línea]. 2019 [Consulta: 31 Jul. 2019]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Mimesis>

23 CALDUCH, Juan. *Temas de composición arquitectónica. Naturaleza y artefacto*. Ed: Editorial Club Universitario, San Vicente (Alicante), 2000. Pág. 108-112

Así pues cuando **Vitruvio** narra el surgimiento de los órdenes entre los jonios, cuando pretenden levantar el templo de Apolo Ponionio, dice:

*“Queriendo, pues, hacer las columnas de este templo como no tuviesen regla ninguna para sus proporciones, y discurriendo el modo de hacerlas aptas para sostener peso, y agradables a la vista, tomaron la medida de un vestigio de un pie humano, y hallando ser la sexta parte de la altura del hombre la trasladaron a la columna, dando a esta de altura seis veces el grueso de su imoscapo (arranque de la columna) incluso el capitel. De esta suerte la columna dórica, proporcionada al cuerpo varonil, comenzó a dar a sus edificios firmeza y hermosura.”*²⁴

*“Se trata por lo tanto de una mimesis de las proporciones del cuerpo humano: las del hombre en el dórico, las de la mujer en el jónico, las de la doncella en el corintio, pero no es una copia de la forma o la figura humanas.”*²⁵

Podríamos decir que es una abstracción de estas proporciones, las cuales ayudan entender las leyes físicas de la estabilidad del cuerpo humano y poder aplicarlas así a la arquitectura.

La segunda teoría sin embargo hace referencia a la imitación de las formas naturales. En esta no se trata de entender las leyes físicas, si no de reproducir las formas de la naturaleza y trasladarlas a la arquitectura en forma de ornamento.

*“Vitruvio alude también a la mimesis entendida en el sentido más directo de copia de las figuras de los objetos naturales. No sólo los estípites en forma de Hermes o cariátides, sino otros muchos objetos naturales. El ejemplo más emblemático es el capitel corintio, creado, según este autor, por **Calímaco** a partir del cesto sobre la tumba de una doncella. [...] La utilización de formas que imitan cosas naturales (vegetales, animales, grutas, personas, etc.) formando parte de la arquitectura e incorporadas a sus repertorios ornamentales, va a ser constante a lo largo de toda la historia. Un ornamento, que no es un simple añadido a la obra, sino que, desde determinadas posturas (piénsese, por ejemplo, en la idea de arquitectura de Alberti, Ruskin o Sullivan), es algo sustancial que convierte la simple construcción en una obra de arte.”*²⁶

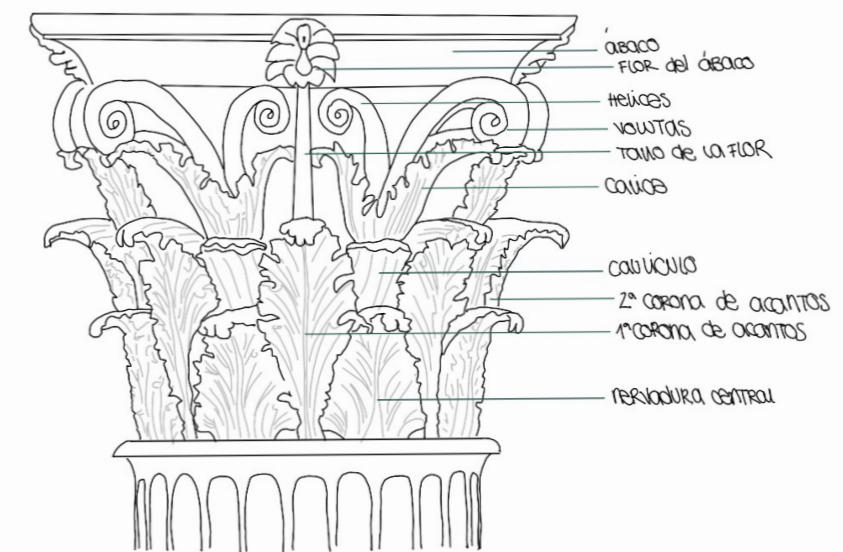


Ilustración 21. Capitel corintio según Vitruvio. Elaboración propia.

24 VITRUVIO, Marco. *LOS DIEZ LIBROS DE ARQUITECTURA*, traducción de ORTIZ Y SANZ, libro IV. Ed: edición facsímil: Altafulla, (Barcelona), 1987. capítulo I, pág. 83

25 CALDUCH (2000) Op. Cit. Pág. 109.

26 Ibid. Pág. 110.

Por último, la tercera teoría, trata de los fines y los usos de la naturaleza. Pudiendo ser este uno de los primeros planteamientos que más se asemejan a lo que hoy en día entendemos como biomimética.

“La arquitectura imitaría, bajo esta postura, el cobijo que, inicialmente, le proporcionan al hombre los elementos naturales. Nace así la idea del origen de la arquitectura a partir de la cabaña primitiva, la cual, a su vez, mimetiza las ramas de los árboles que protegen al hombre de la intemperie. Es este uso protector de la naturaleza lo que la arquitectura imita.

Los vínculos originarios y, en cierta medida, indisolubles, según las teorías clásicas entre naturaleza y arquitectura, quedan así establecidos bajo esta triple interpretación de la mimesis.”²⁷



Ilustración 22. Cabaña primitiva de Viollet-le-Duc. Elaboración propia.

Tras conocer las diferentes teorías de la *mimesis*, observamos cómo en la Antigüedad, ya existía cierta inclinación a tomar tanto las formas como los procesos de la naturaleza. Sin embargo en muchos casos la mimesis en la arquitectura, quedo como una mera representación simbólica de la naturaleza.

En la Edad Media, con la emergencia del cristianismo los diferentes términos de *mimesis*, entraron en declive. Esto es debido a que la Iglesia Católica consiguió un gran poder, estableciendo un nuevo estilo estético y ético en la sociedad. Como D. Grillo explica en su Tesis Doctoral:

“Se mantuvo una visión de la naturaleza bella y perfecta, pero ahora asociada al Dios cristiano: la naturaleza era la perfecta obra de Dios. No obstante esta continuidad, se cambia una importante referencia que anteriormente sostenía en arte antiguo: el mundo Exterior deja de ser la gran referencia para las artes, que pasan a operar según una concepción espiritualista del hombre y la naturaleza.”²⁸

No obstante, aunque en esta época no se observe un gran avance en cuanto al desarrollo de la teoría mimética y la arquitectura, sí se pueden detectar una intencionalidad por aprender de la naturaleza a la hora de construir. Aunque siempre teniendo en cuenta que se trata de una **naturaleza divinizada** e influida por la visión del mundo medieval.

Otro punto a tener en cuenta a la hora de entender la relación entre la naturaleza y la arquitectura es la visión que se tenía de la figura del arquitecto en aquella época. Ya que se estableció un simil entre la figura de Dios y la figura del arquitecto.

“A Dios se refieren como el divino arquitecto, creador del cosmos. Y frente a esta alusión se establece la relación inversa: el arquitecto como la versión cristiana del demiurgo, el “imitador” de Dios y de Su obra en la Tierra. En este sentido, su actividad se podría considerar como una mimesis de la propia creación de la naturaleza.”²⁹

Es por ello que en las **catedrales góticas** - culmen de la arquitectura y avances técnicos de la época – podemos detectar esta relación entre arquitectura, naturaleza y Dios. Estas construcciones se alzaban bajo la premisa de:

“Despertar en el fiel un sentimiento de sobrenaturalidad y trascendencia; en él el hombre medieval elevaba su mirada hacia un vacío grande y luminoso. [...] elevar al hombre hacia la naturaleza mística y abstracta de lo divino; ya no teníamos el cielo en la Tierra, si no el hombre en el cielo”³⁰

Sin perder de vista lo anteriormente descrito, haré un breve análisis de las catedrales góticas desde un punto de vista arquitectónico contemporáneo, haciendo especial énfasis en el tema principal de este trabajo, la biomimética. Este inciso es una percepción personal en la que he podido encontrar diferentes relaciones entre la arquitectura de las catedrales góticas y la biomimesis tal y como ahora la conocemos.

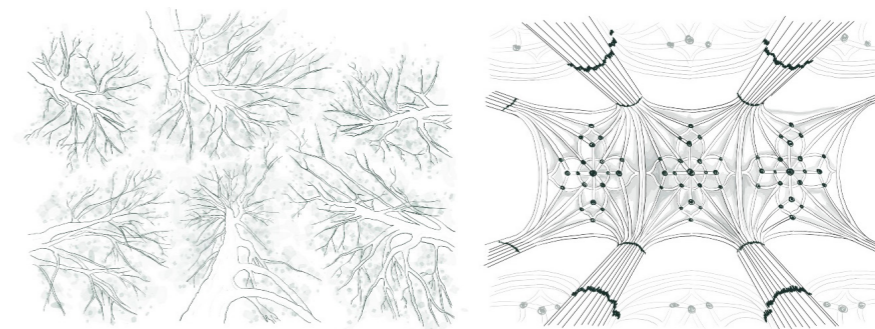


Ilustración 23. Patrón de crecimiento de los árboles y bóveda central de la catedral de Salamanca. Elaboración propia.

²⁸ D.GRILLO, Antonio Carlos. La arquitectura y la naturaleza compleja: Arquitectura, ciencia y mimesis del siglo XX. [En Línea] Marta Llorente Díaz, Dir. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005 [Consulta: 5 Ago. 2019] Disponible en : <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93400>

²⁹ D.GRILLO, (2005) Op. Cit. Pág.105.

³⁰ Ibid. Pág. 105.

²⁷ Ibid. Pág. 110.

Si observamos estas dos imágenes podríamos decir que de alguna manera la naturaleza siempre ha inspirado a la hora de diseñar, quizá de un modo inconsciente en algunas ocasiones. Si nos fijamos y comparamos el patrón de crecimiento de los árboles y el crecimiento estructural de la arquitectura gótica, podemos apreciar un paralelismo entre ellas.

En ambos casos podemos observar cómo existe una necesidad crecer en altura en busca de una mayor cantidad de luz. Sin embargo según el punto de vista en el que se encuentre observador, en este caso refiriéndome a la parte inferior encontramos un espacio de semioscuridad.

En este espacio de penumbra nos llegan pequeños rayos de luz tamizados en cada caso por sus diferentes filtros. En el caso del bosque son sus hojas y el movimiento de las mismas las que modularían la intensidad de la luz, y en el caso de las catedrales serán sus vidrieras las que tamizarán esa luz, llenándola de diferentes matices y colores. Si bien es cierto que la intención de estas construcciones esta cargada de connotaciones religiosas, he querido desmarcarme de las mismas para poder enfatizar la similitud de las catedrales con una naturaleza no divinizada.

Otra analogía que percibo entre ambas, son las sensaciones que en el ambiente pueden percibirse en el interior, siendo ambos espacios aparentemente tan diferentes. Uno y otro, bajo la búsqueda de una gran verticalidad para ganar la batalla a la obtención de mayor luz, dan una sensación de inestabilidad. Si tenemos en cuenta de todas las ramificaciones que tienen los dos en su parte superior, que solamente soportan unas esbeltas columnas o troncos, nos crean la percepción de ser diminutos, quizá sacados de escala, quizá perdidos ante tanta inmensidad combinada con una aparente ligereza.

En términos de la *biomimética*, es posible que esto se deba a que ambos comparten el modelo de crecimiento en su estructura, la **geometría fractal**.

*“En el interior la forma de lo grande se repite en escalas menores; con la misma estructura del tallo arbóreo en las columnas se producen las nervaduras de las bóvedas que a su vez también se jerarquizan por tamaños. Y esta estructura llega hasta el plomo que separa los distintos componentes de las vidrieras, de nuevo se trata de una trama vegetal.”*³¹

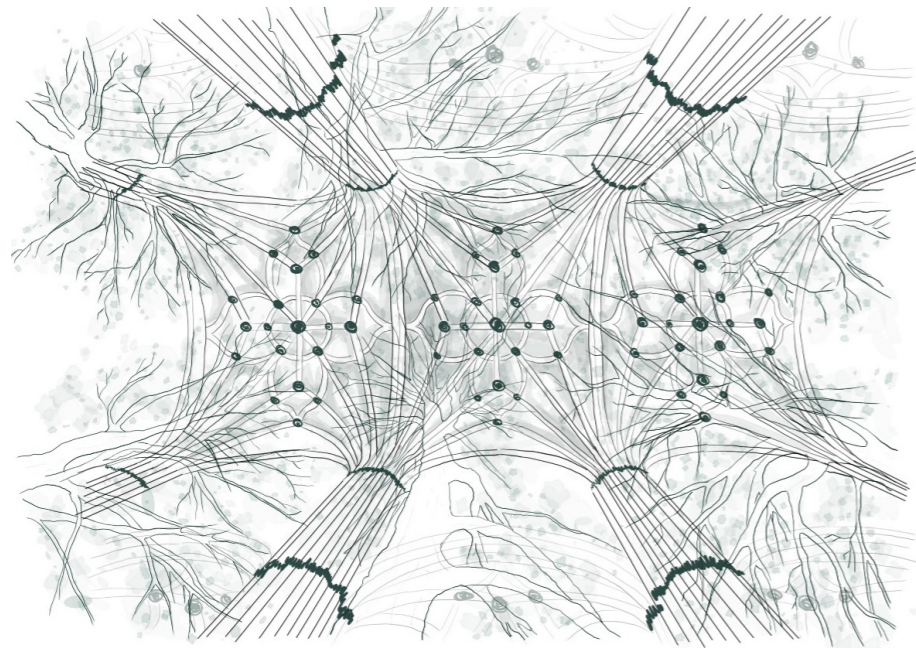


Ilustración 24. Comparación entre el crecimiento de los árboles y la estructura gótica de la catedral de Salamanca. Elaboración propia.

³¹ J.BARRAGÁN, Alejandro. *La geometría fractal como instrumento generador en la arquitectura*. [En línea] Investigación Final de Carrera. Universidad Cristóbal Colón, 2014. [Consulta: 3 Mar. 2019]. Disponible en: https://issuu.com/alejandrojallil/docs/la_geometria_fractal_como_instrumento

Tras el declive de la mimesis en la Edad Media, en el periodo del Renacimiento al Barroco, se produce un punto de inflexión. Las *teorías miméticas*, que citábamos anteriormente, vuelven a recobrar importancia, renovando los conceptos e ideas, y añadiéndoles nuevas interpretaciones ligadas al nuevo pensamiento de la época.

En la época del **Renacimiento** (S.XV), surge un cambio en la visión del mundo vinculada al **Humanismo**. Esta corriente filosófica y cultural se desvincula de la filosofía religiosa medieval, la cual imponía una lógica teológica en la concepción del universo. Por lo que se pasó a tener una visión antropocéntrica, la cual convertía al ser humano el centro de todas las cosas, con una visión más racional y menos contemplativa a la hora de analizar el mundo que los rodea.

Es por ello que surge otra manera de interpretar la *mimesis*, ligada a la necesidad que se crea de examinar la naturaleza.

*“Se empieza a construir lo que consideramos una interpretación cognoscitiva de la mimesis: el arte centrado en el estudio y en el conocimiento de la naturaleza, en el desciframiento de sus leyes, de sus secretos. Como afirmaría años después el grabador Albrecht Dürer (1471-1528), la mimesis no es un acto pasivo, la naturaleza tiene que ser descifrada, y de ella sacada su contenido”*³²

En la arquitectura, se **retomarán los órdenes clásicos** ligados a la primera teoría de la mimesis. Se retomarán los pensamientos de **Aristóteles** y **Vitruvio**, teniendo muy presente los principios de *“firmitas, utilitas y venustas”*. Todo ello con un nuevo matiz, la racionalidad científica de la época.

*“Desde un punto de vista constructivo, aboga por la adecuación de la obra de las leyes físicas de los materiales y la gravedad, a los condicionamientos ambientales y a la fortuna que se impone en la naturaleza.”*³³

También cabe destacar, que el pensamiento antropocéntrico de la época se ve reflejado en la arquitectura. Y es por ello que en los edificios se ve reflejado el microcosmos que era el cuerpo humano. Aplicando en los edificios las leyes de la naturaleza relacionadas con él, como los principios de simetría, proporciones, la geometría, la estabilidad, etc.

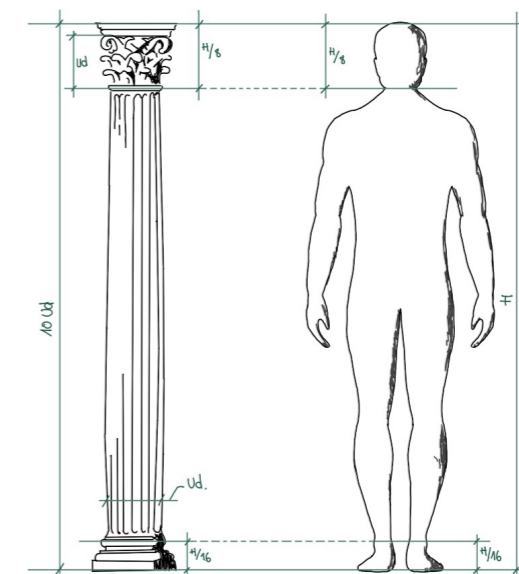


Ilustración 25. El hombre como medida en la arquitectura. Elaboración propia.

³² D.GRILLO, (2005) Op. Cit. Pág. 109.

³³ Ibid. Pág. 112.

En el **Barroco** (S.XVII), se produce una fragmentación en los diferentes campos de conocimiento, y el concepto de mimesis en la naturaleza no iba a ser menos. Es por ello que enunciaremos algunos campos, que aparentemente son ajenos al tema principal del trabajo, para contextualizar el proceso de transformación de la mimesis y relacionarla en el campo de la arquitectura.

En este siglo, **las ciencias de la naturaleza**, concretamente el conocimiento científico, transforman la mirada del mundo ante el afán de conocimiento del ser humano. Se instaura entonces el método científico, marcado por la **racionalidad**, las matemáticas y los métodos experimentales. Este racionalismo científico, va a influir en el resto de los campos de conocimiento.

*“La gran revolución culminaría a finales del XVII con la obra de **Isaac Newton** (1687), quien no sólo explicaba el funcionamiento del universo, sino que también lo comprobaba matemáticamente, logrando lo que parecía un definitivo sistema teórico de comprensión de las leyes universales de la naturaleza. En la elaboración de su mecánica, Newton se apoyó no solamente en la obra de sus predecesores astrónomos, sino también en el pensamiento de **Descartes** que concebía la naturaleza como una máquina perfectamente ordenada y gobernada por leyes matemáticas e inteligibles para la ciencia humana. Con la mecánica newtoniana, la lógica pasa a representar definitivamente la nueva visión del universo: una máquina, ordenada y previsible, cuyo funcionamiento se logró descubrir.”³⁴*

Por otro lado la idea de mimesis en el **campo del arte** evolucionó. El artista no solo copiaba con fidelidad la naturaleza, sino que también la reinterpretaba. Y es por ello que el concepto de mimesis se desplaza hacia la **subjetividad**. Ya no consistía solamente en copiar la naturaleza tal y como era, sino que además en ella se reflejaban las ideas y experiencias del artista.

*“Así que, aún con la mimesis alejándose progresivamente de la realidad exterior, se pudo percibir un esfuerzo casi generalizado en adaptar las nuevas ideas artísticas este concepto, lo que generó una pluralidad interpretativa de la teoría mimética, tal como enseña Tatariewicz : la mimesis no sólo de la naturaleza sino también de las ideas (**Fracastoro**); o que la mimesis sería una alegoría (como había hecho Petrarca); o que sería una conexión de ficciones (Varchi, 1590); para **Emanuel Tesauro** (1655) la mimesis sería una metáfora, con el arte constituyéndose en símbolos de la realidad (como el arte medieval); **Robortobello** afirmó (1548) que el arte presenta las cosas como no sin; igualmente **Bernini** diría después (1682) que la pintura muestra lo que no es.”³⁵*

Al contrario que en las artes, la arquitectura seguiría siendo fiel a la realidad. Se continuó con la **estética clásica** del renacimiento mediante el racionalismo matemático y geométrico. Es por ello, que la mimesis en la arquitectura no se da como en las artes, de una manera subjetiva, si no que como dice **D. Grillo**:

“Ya en la arquitectura la posible mimesis de la naturaleza no se da por ninguna similitud visible, si no que va oculta en la traducción más bien simbólica de un orden cosmológico, y además filtrada por el modelo clásico que en este principio elaboraron los antiguos.”

Por todo ello, e influidos en cierto modo por la ciencia y el arte, la arquitectura barroca se centra en los aspectos técnicos de la obra, como la complejidad de la forma y la estructura, aunque también en aspectos artísticos.

Al comienzo de esta época podemos ver como la fractura de los diferentes campos ocurrido en el periodo del Renacimiento y el Barroco sigue muy presente. La fracturación de la teoría de la mimesis y las diferentes interpretaciones en la que se observa la naturaleza van a marcar el siglo XVIII. Por todo esto nos encontramos con dos corrientes antagónicas entre sí a la hora de entender la naturaleza.

Por un lado encontramos una **naturaleza científica**, producida por el periodo de la Revolución Científica y la Ilustración. Este punto de vista pretendía aprender de la naturaleza desde un posicionamiento racional y objetivo, observándola, aprendiendo sus leyes mediante el empirismo científico.

En contraposición, encontramos la **naturaleza romántica**, la cual valora la subjetividad humana en su expresividad. En esta corriente se valoran las capacidades de imaginación, creatividad, capacidad expresiva e interpretativa con la que el ser humano observa el universo. Se consideraba la naturaleza como fuente de misterio y revelación. Un organismo unitario antes que una máquina, en el que el ser humano luchaba por integrarse.³⁶

Sin embargo, aunque ambas visiones sean tan opuestas en el cómo entender la naturaleza, cabe destacar que ambas mostraban un gran interés en buscar y descubrir los secretos esta.

Y es la arquitectura la que se nutre de ambas corrientes, ya que, aunque predominase una visión científica de la mimesis, en la se aplicaba el conocimiento más racional que aprendían de la naturaleza, la visión romántica que se tenía de esta, también estaba presente en los procesos de diseño.

3.4.1. El Romanticismo y el Realismo.

En el **Romanticismo**, se afianza la revolución estética expresiva, en la que como explica **M. H. Abrams** en su libro *“The Mirror and the Lamp: Romantic Theory and the Critical Tradition”* (1953), el artista pasa de ser un mero observador, que únicamente reproduce la naturaleza que contempla, si no que transforma esta realidad, es decir, pasa a crear la naturaleza desde su imaginación, creatividad y sentimientos.

Frente a este posicionamiento subjetivo, la idea de mimesis se vio enfrentada a dos posibles líneas de evolución. Por un lado estaban quienes preferían alejarse de las viejas teorías miméticas, frente a los que valoraban esta nueva corriente subjetiva como una oportunidad para ampliarla. Sin embargo en ambos casos compartían las ideas que debían introducir para cambiar la teoría mimética.

“La de considerar al ser humano como parte de la naturaleza, y el énfasis en lo natural de esta subjetividad en el proceso artístico”³⁷

En cambio, el **Realismo**, generó un movimiento artístico en sentido contrario a la prioridad hacia los sentimientos que había surgido con el romanticismo, en el que el artista representaba la realidad de una manera más objetiva, no se trataba de imitar la realidad pero si de analizarla para posteriormente plasmarla en las obras.

Jules Champfleury, uno de los principales defensores de este movimiento, llegó a afirmar que:

“la imaginación es la reina del error y de la falsedad”

³⁶ D.GRILLO, Antonio Carlos. La mimesis de la naturaleza en arquitectura. *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*. [En línea] Belo Horizonte: PUC Minas. 2007. 14(15). pp.50-70. [Consulta: 7 Ago.2019] ISSN: 1413-2095. Disponible en: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/Arquiteturaeurbanismo/article/view/808>

³⁷ D.GRILLO, (2005) Op. Cit. Pág. 132.

³⁴ Ibid. Pág. 122.

³⁵ Ibid. Pág. 126.

Dando lugar al pensamiento de **Émile Zola**, que se denominó **naturalismo**, donde promovía la idea de que el arte se convirtiera en ciencia.

La influencia de este movimiento con las teorías de la mimesis, promovió una renovación en las líneas de pensamiento de las mismas. Sirvió para dar un soporte teórico a teorías anteriores, defendiendo con nuevos conceptos.

“Frente a la perspectiva de la mimesis el aspecto más importante del Realismo nos parece ser la defensa aguerrida de la realidad exterior como elemento imprescindible para el arte. En esta renovada visión de la mimesis se vieron ampliadas, más que nunca, tanto el pluralismo interpretativo con respecto a sus límites de referencia y sus modus operandi, como las voces en contra del proceso en sí mismo.”³⁸

3.4.2. La ilustración y la Racionalidad Científica.

En el periodo de la **Ilustración** se produce una fuerte desvinculación entre iglesia y naturaleza, teniendo una visión más científica de esta ligado a los nuevos términos de la física y la biología.

Será en este punto cuando se empiezan a entrecruzar las bases de la mimesis en la arquitectura que hoy en día conocemos, ya que gracias a esta nueva visión científica, las relaciones que se establecen entre naturaleza y arquitectura, tienen más que ver con las leyes mecánicas que la rigen y el conocimiento de las formas que existen en ella.

La obra de **Claude Perrault** fue uno de los ejemplos en los que podemos ver con mayor claridad la relación entre la racionalidad científica y naturaleza aplicados en la arquitectura, ya que en origen venía del campo de las nuevas ciencias.

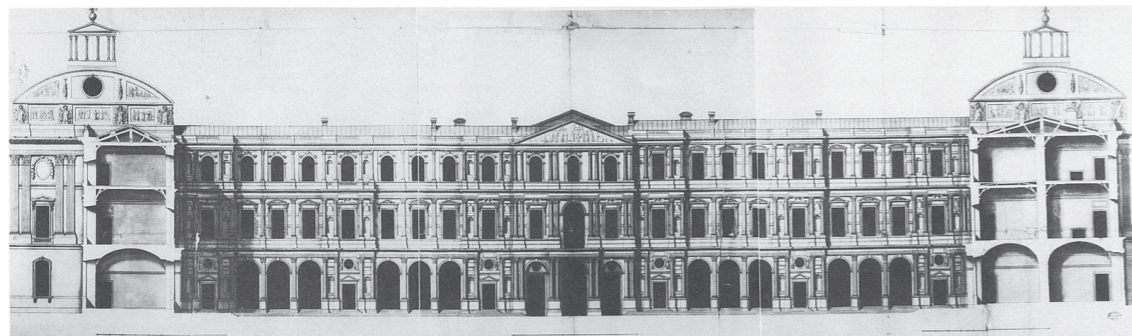


Ilustración 26. PERRAULT, Claude. Dibujo en alzado de Claude Perrault de la fachada este de la Cour Carrée del Louvre con secciones de las alas norte (izquierda) y sur (derecha) [imagen digital]. 1676. Escaneo del trabajo original: Berger, Robert W. (1993). El Palacio del Sol: el Louvre de Louis XIV. University Park: The Pennsylvania State University Press [Consulta: 25 Dic. 2019]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Claude_Perrault_elevation_of_the_east_facade_of_the_Cour_Carr%C3%A9e_of_the_Louvre_%E2%80%93_Berger_1993_figure_113.jpg

Una de sus reflexiones que más repercusión tubo, fue la distinción entre los hechos y la belleza como positivos y arbitrarios en arquitectura, ya que buscaba en ella un paralelismo con sus estudios científicos, distinguiendo entre lo racional y lo subjetivo.

“La doble belleza defendida por Claude Perrault en el campo de la estética, una belleza “positiva”, basada en hechos objetivos y controlables, y una belleza “arbitraria” fruto de las costumbres convencionales y los gustos cambiantes, de la gracia, del “no sé qué”, es otro claro intento de hacer compatibles aspectos que se presentan irreconciliables entre sí.”³⁹

38 D.GRILLO, (2005) Op. Cit. Pág.134.

39 CALDUCH, Juan. *Temas de composición arquitectónica. Modernidad y arquitectura*. Ed: Editorial Club Universitario, San Vicente, (Alicante), 2000.

Es por ello que para él la mimesis de la naturaleza, con el concepto ligado a la divinidad que se tenía hasta la época, no tenía relación con la arquitectura, si no con la ficción.

Aunque Perrault no aprobaba la teoría mimética, **Bondel, Laugier y Boullé** si lo hacían, aunque con diferentes connotaciones.

3.4.3. Los comienzos del organicismo.

Entre la segunda mitad del siglo XVII y primera mitad del siglo XIX se realizarán grandes avances en las ciencias naturales, así como un distanciamiento con las teorías clásicas. Estos nuevos conceptos de las ciencias biológicas serán los que den lugar al pensamiento organicista de la arquitectura.

No fue hasta 1800 cuando **Lamarck** acuñó el término de *biología* por primera vez con el significado etimológico de “*ciencia de la vida*”.

“Es en esos momentos, cuando los procesos vitales, ya no encuentran explicación plausible con las leyes de la física, la química y la mecánica. Lo orgánico, en esos momentos, hacía referencia a una cualidad más propia de la vida sedentaria que al movimiento o crecimiento. Goethe, en esas mismas fechas, utilizó por vez primera la idea de morfología (el estudio de las formas vivas), aplicándolo indistintamente a las estructuras vivientes, y a los procesos de crecimiento. La morfología, dio origen, a su vez, a la anatomía comparada: la interrelación formal entre las formas de los diferentes seres vivos. El estudio de las ciencias naturales y la biología se interesará cada vez más por los cambios. Es decir, de cómo unas formas se transforman en otras bajo el influjo de las actividades y las funciones. Se buscaba una correlación entre los cambios funcionales (es decir, los de las actividades realizadas por los órganos de los seres vivos) y los cambios morfológicos (o sea, las formas de esos órganos). La cuestión que preocupaba a los naturalistas es: ¿la forma del órgano, sigue a los cambios de las funciones? ¿O tal vez ocurre lo contrario?”⁴⁰

Las primeras relaciones entre naturaleza y arquitectura provenientes del concepto de *organismo* llegarán aproximadamente en 1800 de la mano de **Goethe y Schlegel**. La introducción de este nuevo concepto será una de las claves para el cambio de visión de la mimesis de las teorías clásicas a las modernas de la naturaleza.

Goethe “estableció paralelismos con algunos conceptos desarrollados en sus estudios sobre botánica (*Die Metamorphose der Pflanzen* 1790), centrados en comprender las leyes de crecimiento y forma en la naturaleza. Su visión es la de un “morfologista del arte”, en que la arquitectura se ve como una segunda naturaleza, con la cual compartía algunas similitudes. Una primera consideración se refiere a la posibilidad de que la arquitectura pueda tener una estructura de desarrollo de algún modo similar a la de los organismos vivientes. Además Goethe sugiere que tanto los organismos naturales como la arquitectura se caracterizan por una totalidad orgánica y que esta totalidad es un propósito intrínseco y natural en ambas;”⁴¹

Schlegel “también va a establecer paralelismos entre la arquitectura y naturaleza, aunque como consecuencia de otro objetivo, el de incluir la arquitectura en su filosofía general del arte (*Kunstlehre*, 1802), dentro del contexto del idealismo alemán. Schlegel rechaza la idea de que la arquitectura deba imitar formas o modelos de la naturaleza – a excepción de lo que dice respecto a la ornamentación-, por otro lado, en la idea de totalidad que definiría el organismo viviente.”⁴²

40 CALDUCH, Juan. *Temas de composición arquitectónica. Uso y actividad. De la utilidad a la función*. Ed: Editorial Club Universitario, San Vicente (Alicante), 2000, pag.78

41 D.GRILLO, (2005) Op. Cit. Pág.144.

42 Ibid. Pág. 145.

Ambos, no trataron de aplicar el término de orgánico en la arquitectura, sino de crear una relación entre la arquitectura y el organismo biológico. La primera vez que el término *orgánico* apareció ligado al de arquitectura fue en 1809 de la mano de **Alois Hirt**, aunque para él, el término orgánico no tenía las mismas connotaciones como para Goethe y Schlegel, ya que no tenía una connotación biológica. Para Hirt la arquitectura se basaba en las leyes mecánicas.

3.4.2. Un punto de inflexión. Finales del siglo XIX y siglo XX.

En la segunda mitad del siglo XIX se produjo un cambio radical debido al libro *"The Origin of Species"* (1859) de **Charles Darwin**, tras cuya publicación produjo una rotura entre la naturaleza y la religión. Ya no se trataba de ensalzar la naturaleza como una extensión de la creación de Dios, sino que admiraba y se trataban de alabar sus propias virtudes.

Además otra de las cuestiones que más relación tendrían con la arquitectura, era el debate entre los biólogos Georges Cuvier y Etienne Geoffroy Saint-Hilaire. Esta disputa trataba sobre la relación entre la forma y la función de los organismos. **Curvier** defendía la postura que *la forma de los organismos se definía por su función*, sin embargo, **Geoffroy**, apoyaba la teoría en que *las formas orgánicas eran independientes de su función*.

Este debate sumado a las ideas ligadas a la evolución de Darwin, produjeron un cambio en la manera que la arquitectura miraba la naturaleza hacia la idea de *"adaptación funcional"*. Con ello la arquitectura, al igual que los organismos, le surge la necesidad de adaptarse y evolucionar para poder sobrevivir a la época y al entorno que la rodea.

Eugène Viollet-le-Duc, constuyó su obra marcada por técnicas constructivas basadas en una mirada científica de la naturaleza, definiendola en términos matemáticos y físicos. Aunque su obra está también muy influida por el estilo gótico, éste se desvinculó de las connotaciones religiosas de este estilo, ya que el uso de nuevos materiales como el hierro, le hacían entender la naturaleza no desde un punto de vista metafísico, sino en términos físicos y geométricos que pudiese aplicar a la estructura de sus proyectos.

A causa de la relación que propone Viollet-le-Duc de la biología aplicada en las estructuras, a lo largo del siglo XX, veremos como esta inspiración en las referencias de la naturaleza, esta vez sin dejarse influenciar de ningún estilo hitórico anterior, seguira empleandose en diferentes modelos estructurales.

En este periodo de transición hacia el modernismo, se situa **Antoni Gaudí**, cuya obra refleja la inspiración en la naturaleza en un abanico muy amplio de aspectos, siendo uno de los mas destacados el estructural. Aunque también influenciado por el gótico, Gaudí se propuso mejorar este sistema estructural hacia un estilo propio, ya que consideraba antinaturales todos los refuerzos que este debía llegar, centrandose en aprender de la naturaleza para resolver este problema. Poco a poco se fue alejando de esta tradición constructiva hasta lograr la suya propia, basada en las catenarias, puesto que estas, como se ha explicado anteriormente, no tienen empujes horizontales.

Otro rasgo característico de su estilo naturalista y orgánico, en la búsqueda de un nuevo lenguaje arquitectónico, vendrá del estudio de las formas geométricas como el helicoide, parabolode etc., que Gaudí encuentra en los paisajes que visitaba, y que trata de plasmar en sus obras, como es el caso de las bóvedas de hiperboloides o las columnas helicoidales de la Sagrada Familia.

Cabe mencionar que, para la construcción de sus obras rara vez dibujaba planos, puesto que prefería trabajar con sus propias manos con maquetas o moldes para concebir sus obras de manera tridimensional, y poder experimentar con ellas antes de su construcción, como es el caso de la maqueta polifuncional de la iglesia de la Colonia Güel.

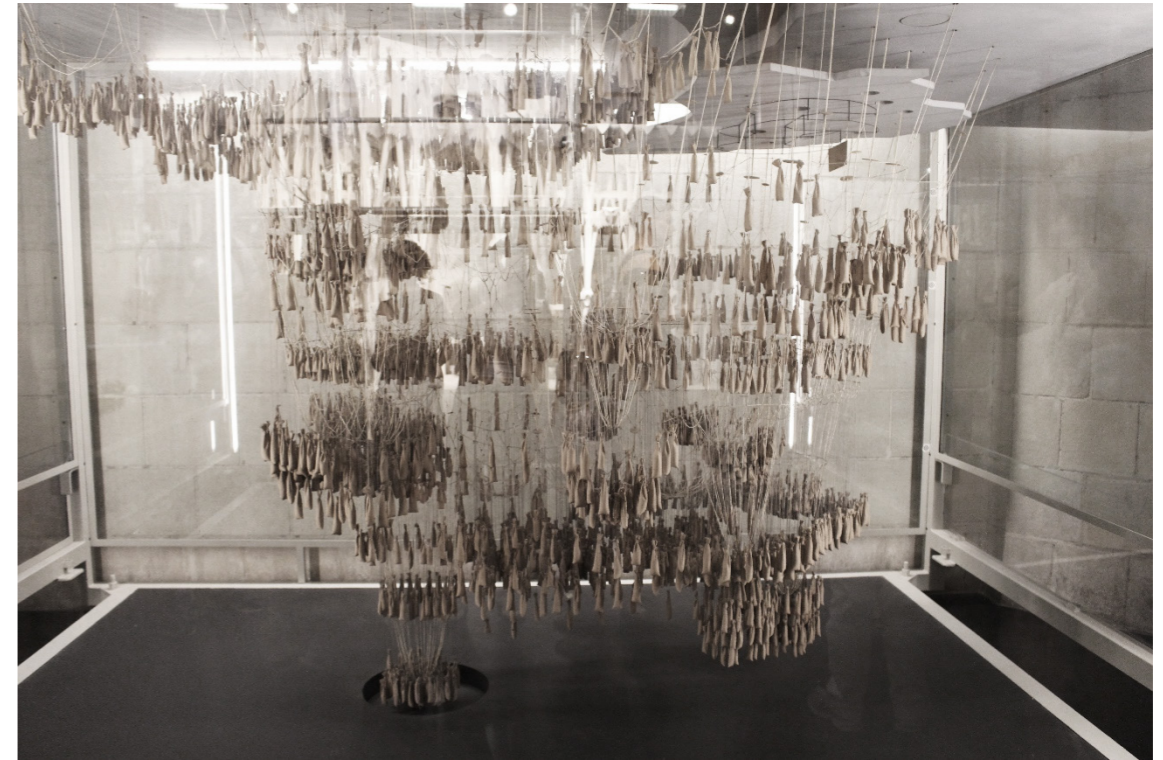


Ilustración 27. Reproducción de la maqueta funicular de la iglesia de la Colonia Güell usada por Gaudí expuesta en el Museo del Templo de la Sagrada Familia. 2016. Imagen propia.

Como resultado de lo anteriormente descrito, podemos afirmar que, aunque influenciado por la experiencia que aportaban a sus obras los estilos anteriores, el culmen de la obra de Gaudí, es en resultado de la simbiosis que se produce entre lo tradicional y la innovación, inspirado en la naturaleza, lo que genera un estilo orgánico propio del autor.

"El gran libro, siempre abierto y que conviene esforzarse en leer, es el de la Naturaleza; los demás libros han salido de éste y tienen además las interpretaciones y equívocos de los hombres."

Antoni Gaudí.

Al igual que Gaudí, otros autores fueron rompiendo con la tradición, rechazando tanto formas como conceptos. Ante esta necesidad de cambio, se produce una búsqueda hacia un estilo nuevo, y vinculados a la analogía entre lo biológico y lo arquitectónico que nos concierne encontramos a autores como **Louis Henry Sullivan**, que con su frase más célebre *"la forma siempre sigue a la función"*⁴³, entre otras cosas, inspiró a autores como **Frank Lloyd Wright**.

Frank Lloyd Wright, generó una arquitectura que promovía el equilibrio entre el ser humano y el mundo natural, a la que acuñó con el término arquitectura orgánica en su libro *"An Organic Architecture: The Architecture of Democracy"* (1939), donde expuso:

"Y aquí estoy ante ustedes predicando la arquitectura orgánica, declarando que la arquitectura orgánica es el ideal moderno y la enseñanza tan necesaria si queremos ver el

43 SULLIVAN, Louis H. *The Tall Office Building Artistically Considered*. [En línea] Londres: Lippincott's Magazine. 1896 [Consulta: 2 Ene 2020]. Pp. 403-409. Disponible en: <https://archive.org/details/tallofficebuildi00sull/page/n4>

conjunto de la vida, y servir ahora al conjunto de la vida, sin anteponer ninguna "tradicción" a la gran TRADICIÓN. No exaltando ninguna forma fija sobre nosotros, sea pasada, presente o futura, sino exaltando las sencillas leyes del sentido común —o del súper-sentido, si ustedes lo prefieren— que determina la forma por medio de la naturaleza de los materiales, de la naturaleza del propósito... ¿La forma sigue a la función? Sí, pero lo que importa más ahora es que la forma y la función son una."

Una de sus obras más representativas de este estilo arquitectónico fue la Casa de la Cascada (1937), en la que podemos observar la intención manifiesta de relacionar la obra con el entorno natural en el que se encuentra, no solo por la materialidad con la que construye la obra, sino porque esta fue concebida como si de un árbol más del paisaje se tratase mediante su estructura.

Wright pretendía que la huella de la casa invadiera de manera ínfima el terreno, planteando una estructura vertical, de la que salen los amplios voladizos horizontales que forman parte del interior y las terrazas, como si de las ramas de un árbol se tratase. Gracias a esto, además de obtener una fuerte vinculación de la obra con la naturaleza, potenciaba la conexión entre el ser humano y el mundo natural.



Ilustración 28. LLOYD WRIGHT, Frank Casa de la cascada, de Frank Lloyd Wright. [Imagen digital] 1937. Richard Power Pensilvania. 2016. [Consulta: 2 Enero 2020] Disponible en: <https://losojosdehipatia.com.es/cultura/arte-2/la-casa-de-la-cascada-de-frank-lloyd-wright/>

Paralelamente al movimiento organicista, surgió un grupo de arquitectos cuyos proyectos se relacionaban con la naturaleza por medio de las estructuras, o como **Pier Luigi Nervi** denominó "organismos estructurales".

En algunas de las obras de Nervi, comienzan a vislumbrar pequeños matices de la arquitectura biomimética que hoy en día conocemos, como es el caso de su obra Palazzetto dello Sport (1960), en el que se inspiró en las hojas de la Victoria amazónica para optimizar la estructura.

Uno de los arquitectos más representativos, en cuanto a estructuras basadas en la naturaleza es **Frei Otto**, en cuyas obras podemos ver todo tipo de relaciones entre biología y arquitectura.

En su trabajo podemos ver una relación directa con la biomimética, ya que en sus proyectos observamos cómo se inspira en telas de araña, burbujas, radiolarios, etc. no solo tratando de imitar sus formas, si no tratando de comprenderlas para poder optimizar las estructuras de sus obras, e imitando la ley que rige la naturaleza, y que tantas veces hemos nombrado en capítulos anteriores, como es la del mínimo esfuerzo, con la que trata lograr la mayor estabilidad y rigidez estructural con el mínimo material posible.

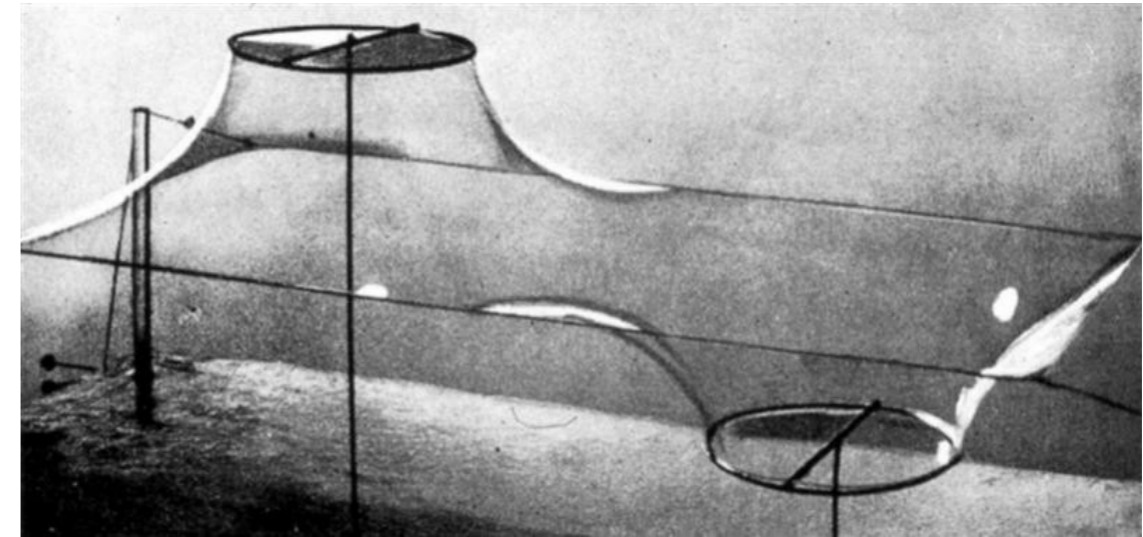
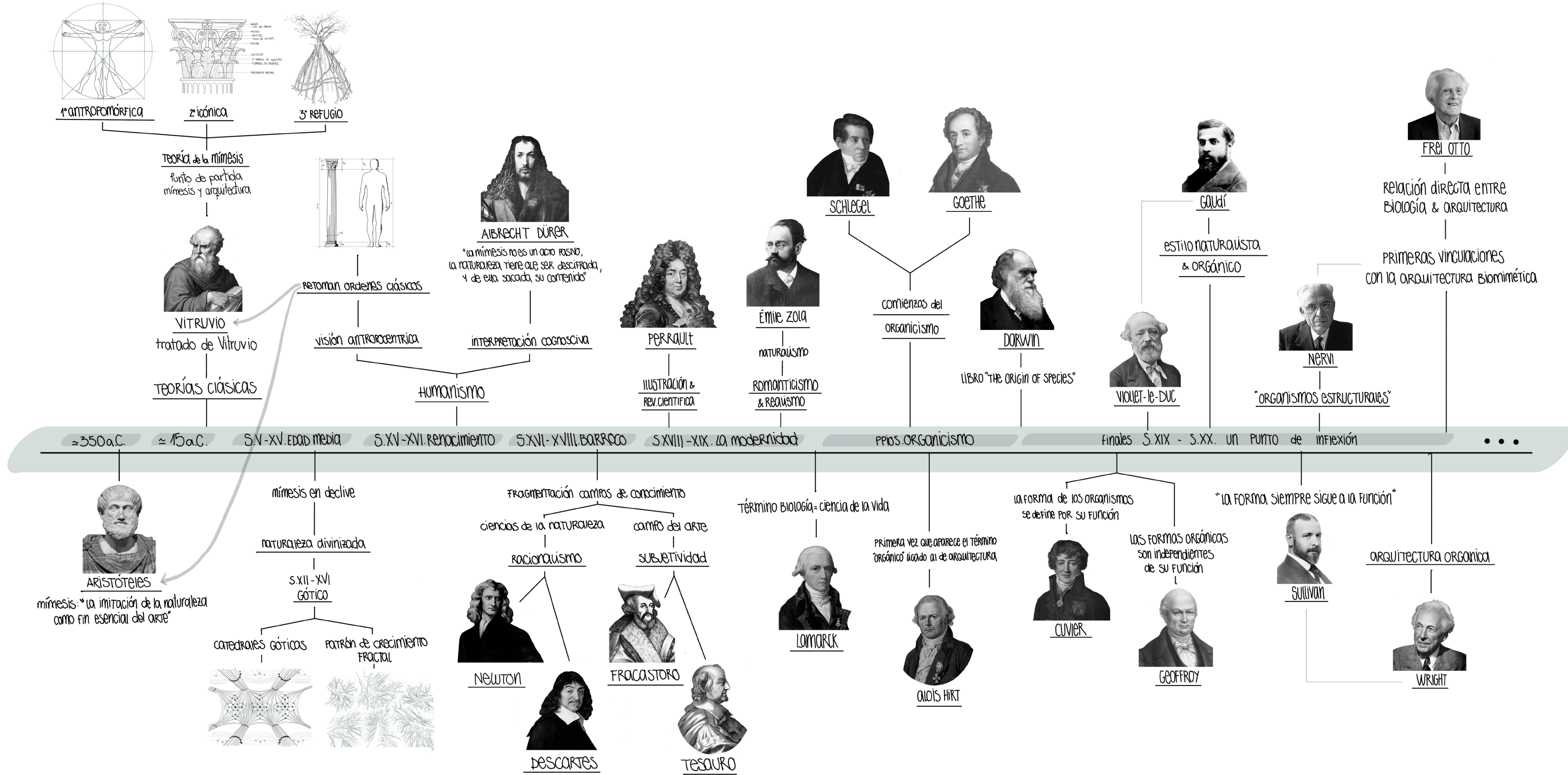


Ilustración 29. OTTO, Frei. Experimentación de formas con películas de Jabón. [Imagen digital] 1937. [Consulta: 2 Enero 2020] Disponible en: <https://medium.com/designscience/1964-2b6618ff93e7>

"La biología se ha convertido en algo indispensable para la arquitectura y a la vez, la arquitectura se ha vuelto indispensable para la biología."

Frei Otto



CAPITULO 4.
DIFERENTES APROXIMACIONES A LA
ARQUITECTURA BIOMIMÉTICA.

En contraste con lo anterior, donde hemos estudiado la biomimética desde un concepto histórico, en este capítulo se tratará una visión más práctica de la biomimética, a través de obras contemporáneas. El objetivo es dar una percepción general desde las diferentes aproximaciones de la arquitectura biomimética, pudiendo ser paradigmáticas y representativas para la explicación, pero no pretendiendo ser la verdad absoluta, puesto que existen muchas más obras que tener cabida dentro de este contexto.

4.1. LOS TRES NIVELES BIOLÓGICOS: La forma, el proceso y los sistemas.

En este capítulo se abordará una clasificación del estudio biomimético, según Janine Benyus, a través de una aproximación de tres niveles. En estos niveles se busca la exploración de la naturaleza, para su posterior aplicación a diferentes campos, de menor a mayor complejidad. En este caso en concreto, vamos a buscar la relación de estos tres niveles con el campo del diseño arquitectónico.

Aunque antes de mostrar los diferentes ejemplos en cada uno de ellos, explicaremos en qué consisten cada uno de estos niveles. Estos niveles relacionan los diferentes niveles de abstracción, con los niveles de estudio de la biología.

En el **primer nivel** nos encontramos con la abstracción formal de la naturaleza.

“La abstracción formal. Permite conocer la materia móvil y sensible que forma a los objetos abstractos y captarlos en una forma amplia. En este nivel la inteligencia comprende la esencia del objeto, su materia”⁴⁴

Con ello, como dice Janine Benyus, conseguimos mimetizar las formas o mecanismos de la naturaleza en un nivel más sencillo. Algunos ejemplos de esto serían la aplicación de texturas, patrones, proporciones, etc.⁴⁵

En el **segundo nivel**, profundiza en la naturaleza más que el primero. En este nivel, se analiza el funcionamiento de los seres vivos. Algunos ejemplos de su aplicación sería para aplicar a estructuras, mecanismos, transito de fluidos, conservación del calor, etc.⁴⁶

El **tercer nivel**, consiste en el estudio a nivel micro celular del funcionamiento de las partes que integran un ser vivo para generar aportaciones tecnológicas relevantes⁴⁷

“El primero es la imitación de la forma, pero muchas veces con ello no basta. El nivel más profundo es replicar el proceso natural, aunque existe todavía un tercer nivel, que consiste en recrear completamente el funcionamiento de un ecosistema”.

Janine Benyus.

44 GARDEY, Ana y PÉREZ P., Julián. Definición de abstracción. En: *Definición.de*. [En línea]. 2012. [Consulta: 11 Jun. 2019]. Disponible en: <https://definicion.de/abstraccion/>

45 AAVV. Biomimética, copiando a la naturaleza en busca de soluciones. En: *Ciencia canaria*. [En línea]. 2017. [Consulta: 10 Jun. 2019]. Disponible en: <https://www.cienciacanaria.es/secciones/a-fondo/788-biomimetica-copiando-a-la-naturaleza-en-busca-de-soluciones>

46 AAVV. Biomimetismo. En: *Alma Terra Magna*. [En línea]. 2018. [Consulta: 10 Jun. 2019]. Disponible en: <http://almaterramagna.org/biomimetismo>

47 BAUTISTA NAVIO, Nuria. Biomimesis. En: *Parameterizing.wordpress* [En línea]. 2016. [Consulta: 10 Jun. 2019]. Disponible en: <https://parameterizing.wordpress.com/2016/10/28/biomimesis/>

4.1.1. PRIMER NIVEL. La Forma.

Abstracción formal de la naturaleza

ESPLANADE – THEATRES ON THE BAY

DP ARCHITECTS, JAMES STIRLING, MICHAEL WILFORD & PARTNERS. SINGAPUR. 2002.



Ilustración 30. KOZLOWSKI, Paul. Fotografía aérea de Esplanade – Theatres on the Bay, Singapur. [Imagen Digital]. 2004. [consulta: 20 Dic. 2019]. Disponible en: <https://structurae.net/de/fotos/17036-esplanade-theatres-on-the-bay-singapur>

En este proyecto, nos centraremos en el estudio de su fachada, ya que es un buen ejemplo de la abstracción a nivel formal de la naturaleza.

La fachada está inspirada en el durián, una fruta autóctona del sudeste asiático, cuya corteza está recubierta de unas gruesas espinas formando una capa protectora en su conjunto bastante dura para proteger las semillas que están en su interior.

El sistema de oscurecimiento de este edificio trata pues de emular la forma de estas espinas para proteger el interior del edificio del sol. Pero a diferencia de la fruta este sistema de oscurecimiento triangular, fue diseñado con un programa paramétrico para optimizar su orientación según el ángulo en el que el sol se proyecte en el interior a lo largo del día.

En este proyecto a nivel de biomimética poco más podemos contar, ya que al tratarse del primer nivel, es el acercamiento menos complejo. A lo largo de los siguientes puntos veremos como a medida que vamos subiendo en los niveles de aproximación de diseño biomimético, también lo hará la complejidad de los proyectos.

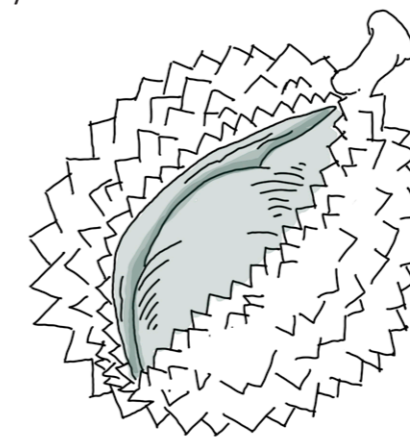


Ilustración 31. Dibujo de la fruta de durián. Elaboración propia

4.1.2. SEGUNDO NIVEL. El proceso.

Análisis y funcionamiento de un ser vivo.

ESTADIO NACIONAL DE BEIJING
HERZOG & DE MEURON. PEKÍN, CHINA. 2008.



Ilustración 32. Estadio del Nido del Pájaro [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://notesfromcamelidcountry.net/2014/06/21/an-olympic-legacy-full-of-light-and-life/img_9297/

El diseño del estadio no solo trata de imitar la estética de los nidos de las aves, sino también su comportamiento estructural, de confort térmico y movilidad a través de la forma.

En primer lugar apreciamos la analogía de las formas entre el nido y el estadio, ambos tienen un perímetro irregular. En los nidos de las aves les permite modificar la forma según las necesidades de crecimiento. En el caso de estadio han abstraído esta idea, para que la forma irregular permita un acceso libre al recinto según las necesidades.

Por otro lado ambos tienen una planta circular, cuya principal característica es dotar visión al interior en todos los ángulos. Y por último la forma semiesférica de ambos, los dota de protección frente a los agentes atmosféricos.

“El diseño se basa en los nidos de las aves no sólo a nivel estético sino también a nivel estructural. Toda la estructura visible desde el exterior imita las ramas entrelazadas de los nidos que al trabajar en conjunto las unas con las otras logran resistencias inimaginables para cada elemento aislado.”⁴⁸

Aunque ambos tienen un material estructural plástico, como son la madera y el acero, la diferencia está en la escala y el peso que tienen que soportar cada uno de ellos.

Otro paralelismo que existe entre ambos lo encontramos en el material empleado para el confort térmico, en ambos casos encontramos un material ligero. En el caso del nido de aves lo encontramos como musgo, plumas y hojas, etc. que sirven para proteger térmicamente al nido, además las plumas tienen un efecto antibacteriano, y las hojas, protegen el nido impermeabilizándolo.

Las mismas características que tiene el nido las consigue el estadio con el EFTE. Ya que por sí mismo este material tiene la capacidad de aislar térmicamente, como es un polímero es impermeable y además evita la suciedad, evitando que se queden en él las bacterias. Al mismo tiempo este polímero le dota de una capacidad extra siendo también aislante acústico, muy importante para el uso que se va a desempeñar en él.

48 AAVV. Estadio Olímpico de Pekín. En: *Wikiarquitectura*. [En línea]. [Consulta: 9 Jul. 2019]. Disponible en: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/estadio-olimpico-de-pekin/>

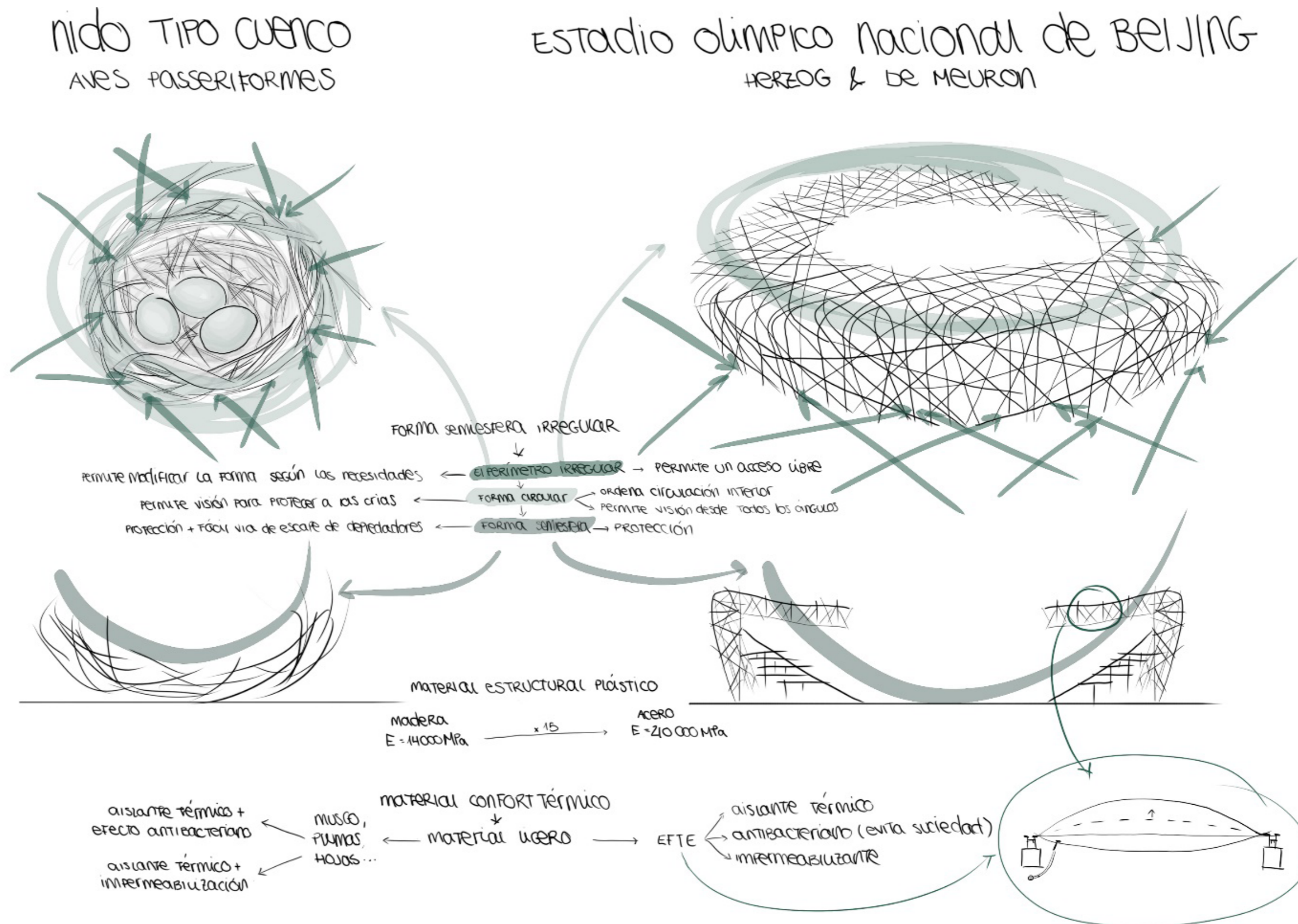


Ilustración 33. Imagen comparativa entre el Estadio Nacional de Beijing y el nido de pájaro. Elaboración propia.

WATER CUBE, CENTRO ACUÁTICO NACIONAL BEIJING
PTW, OVE ARUP & PARTNERS, CSCEC. Pekín, China. 2007.

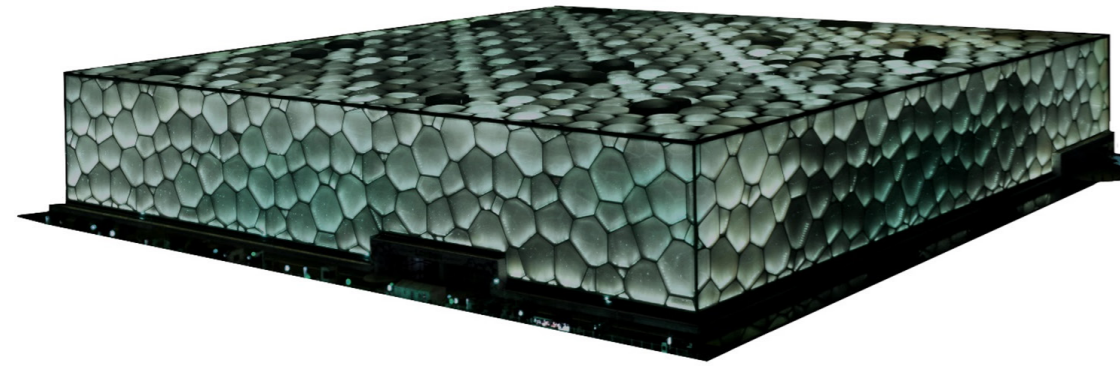


Ilustración 34. Water Cube, Centro Acuático Nacional de Beijing. [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://www.artnews.com/art-in-america/features/emoji-in-light-on-the-beijing-water-cube-59406/>

El caso del Water Cube es un claro ejemplo de como las estructuras, pese a no ser organismos vivos, pueden desarrollar prototipos semejantes a estos. Por tanto la aproximación a este proyecto se centra únicamente en su estructura y su relación con las pompas de jabón.

Por esto, cabe recalcar el concepto en el que se inspiraron sus creadores, el agua, ya que con ello pretendían reflejar lo que en el interior iba a suceder, para que la sensación, tanto desde el interior como del exterior, fuera estar mirando un cubo de con pompas de jabón. El sistema estructural del edificio está formado por acero y hormigón, cuyo patrón sigue la estructura de la *espuma perfecta* de **Weaire-Phelan**.

Este tipo de estructura fue estudiada anteriormente por **Lord Kelvin**, ya que fue el primero que se planteó cual sería la estructura ideal, es decir, de menor energía que forma la espuma. Pero no fue hasta 100 años después, cuando en los años 90 **Denis Weaire** y **Robert Phelan** plantearon una estructura más eficiente a la suya.

“La estructura de Weaire-Phelan utiliza dos tipos de celdas de igual volumen: un dodecaedro pentagonal irregular y un tetracaidecaedro con dos hexágonos y doce pentágonos, otra vez con caras ligeramente curvadas.

El área de superficie es 0.3% menor que la de la estructura de Kelvin, lo que en este contexto supone una diferencia considerable.”⁴⁹

Esta estructura no se llegó a materializar hasta la construcción del Water cube.

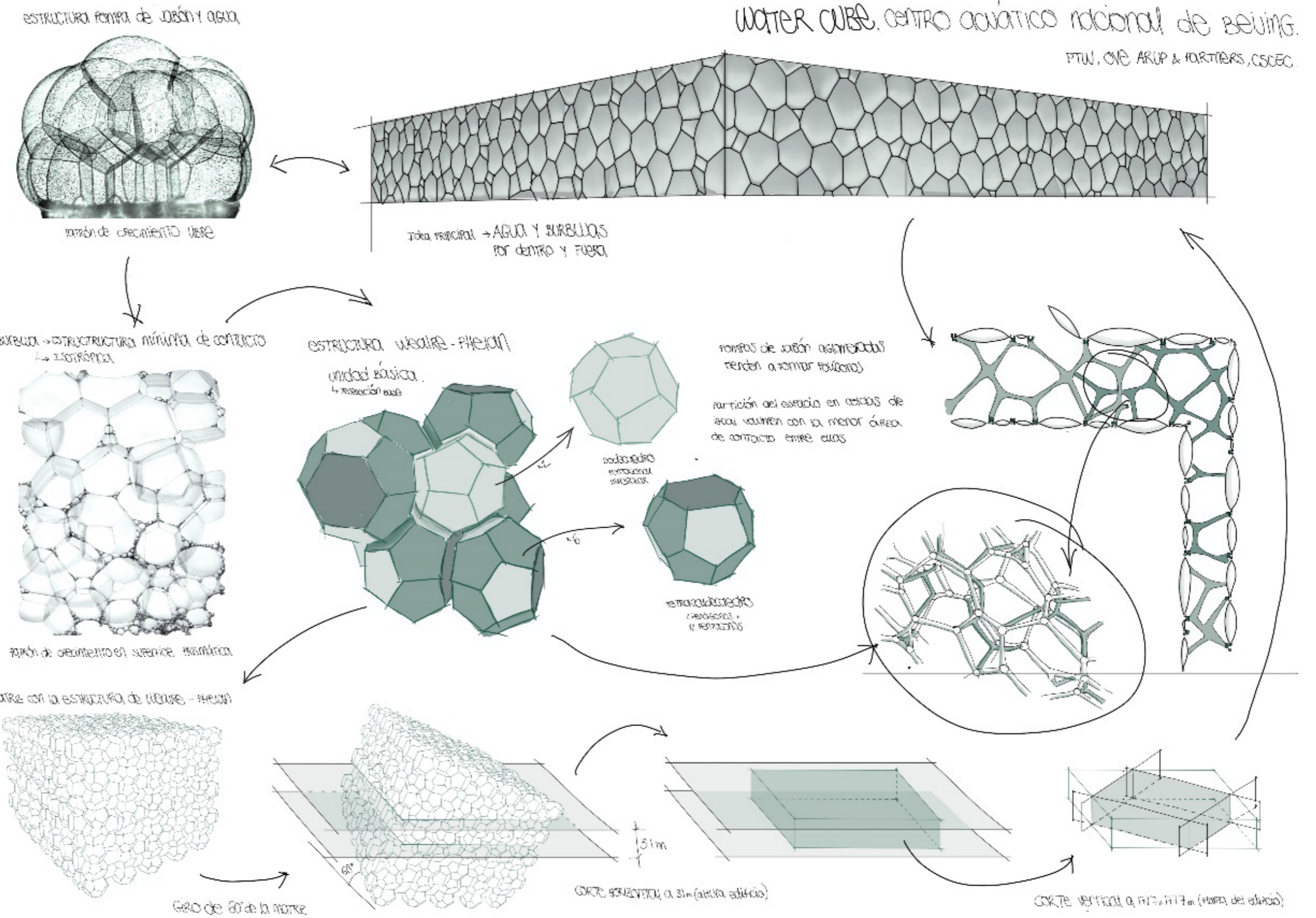


Ilustración 35. Explicación estructural de Water Cube, las pompas de jabón y la estructura de Weaire-Phelan. Elaboración propia.

49 CIVANTOS, Daniel. Físicos crean por primera vez en laboratorio la estructura de "espuma perfecta" de Weaire-Phelan. En: *Lainformación*. [En línea]. 2011. [Consulta: 25 Nov. 2019]. Disponible en: <https://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/29/espuma-perfecta-weaire-phelan/trackback/>

4.1.3. TERCER NIVEL. Los sistemas.

Estudio a nivel micro celular del funcionamiento de las partes que integran un ser.

MALLA DE RECOLECCIÓN DE NIEBLA
SHREERANG CHHATRE. MIT, MASSACHUSETTS. 2011.

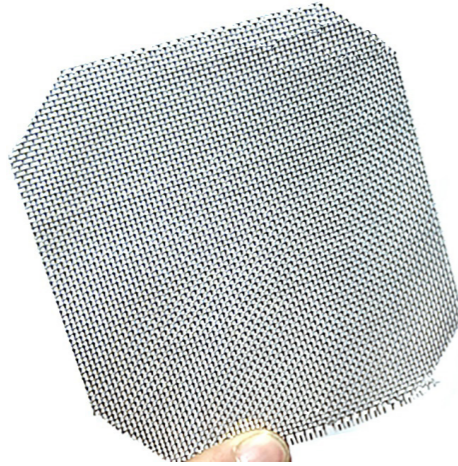


Ilustración 36. CHHATRE, Shreerang. Malla que se está probando para su uso en dispositivos de recolección de niebla [imagen digital]. 2011. Patrick Gillooly. [consultado: 3 de Dic. de 2019] Disponible en: <http://news.mit.edu/2011/fog-harvesting-0421>

El proyecto del ingeniero químico **Shreerang Chhatre**, consiste en el desarrollo de una superficie capaz de recolectar agua. La idea primigenia de este material, surge tras imitar la estrategia de recolección de las gotas del agua de niebla del escarabajo del desierto de Namibia.

ESCARABAJOS DE NAMIBIA (STENOCARA)

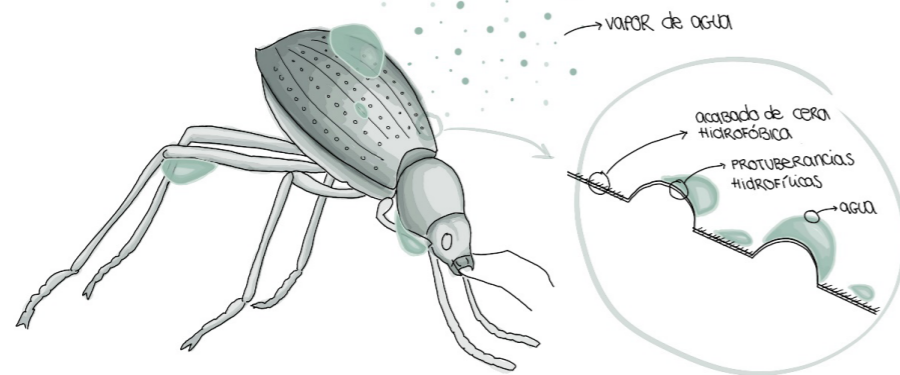


Ilustración 37. Recolección de agua del escarabajo de Namibia. Elaboración propia.

Este escarabajo llamado *Stenocara*, es capaz de sobrevivir en el árido desierto gracias a las ondulaciones de su caparazón.

“Esta agua proveniente de la brisa se condensa en el extremo liso de las protuberancias hidrófilas. Esta cualidad se debe a la compleja estructura de sus caparazón recubiertos de protuberancias, de forma detalla cuenta con protuberancias de unos 0,5 mm y separadas entre 0,5 y 1,5 mm, que a su vez tienen las pendientes recubiertas de otras pequeñas protuberancias en forma de cúpula de 10 micrones de diámetro, dispuestas de forma hexagonal y recubiertas de cera. El agua se condensa en el extremo liso de las protuberancias grandes, que son hidrófilas lo que permite que las gotitas crezcan.

Posteriormente, al acumularse las gotas llega un momento en que las gotas son tan grandes que superan las fuerzas capilares y caen por la pendiente hidrófuga, levantando su parte posterior del caparazón, y con esa pendiente ayudada por el recubrimiento de cera las gotas se deslizan y lleguen hasta la boca del insecto, obteniendo de esa forma el líquido necesario para su subsistencia.”⁵⁰

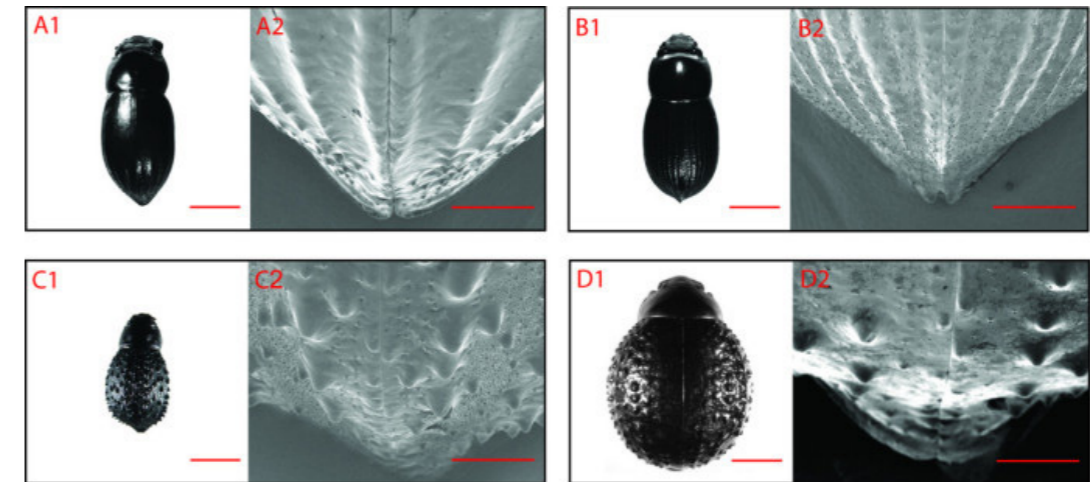


Ilustración 38. Estructuras Elytra. A) *Onymacris unguicularis*, B) *Onymacris laeviceps*, C) *Stenocara gracilipes* y D) *Physasteria cribripes*. A1-D1) Imágenes de foco de profundidad extendida de ejemplos de animales experimentales obtenidos con un microscopio de disección. Barra de escala = 5 mm. A2-D2) Imágenes de microscopio electrónico de barrido del ápice del elitro. Barra de escala = 1 mm. [imagen digital]. 2010. [consulta: 3 Dic. 2019] Disponible en: <https://frontiersinzoology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1742-9994-7-23>

Tras estudiar microscópicamente el funcionamiento del animal se pusieron manos a la obra para llevarlo a la práctica. La primera estrategia a seguir era la combinación en un mismo material de superficies que atrajesen y repudiesen el agua, de esta manera al igual que el escarabajo, podrían controlar la dirección de recolección del agua.

Sin embargo se encontraron con otro problema, la diferencia de escala. La superficie del escarabajo es rígida ya que tiene que recoger una ínfima cantidad de agua. Es por esto que decidieron generar este tejido como una malla, y así poder solucionar los problemas que generaba el viento al tener una mayor superficie. Debido a estos problemas, en el artículo del MIT dice:

“En este sentido, la fisiología del escarabajo es una inspiración para la recolección de niebla humana, no una plantilla.”⁵¹

Con este proyecto se pretende generar agua sin la necesidad de un gran consumo energético para su obtención. También se pretende dotar de agua potable a aquellas zonas del mundo que viven sin ella.

Si este nuevo material se implementase en proyectos ya existentes, como el **Proyecto Warka Water**, diseñado por el arquitecto **Arturo Vittori**, en Dorza, Etiopía, se lograría una recolección de agua mucho mayor a la que la estructura existente recolecta.

También si nos planteásemos implantar este sistema en parques o fachadas de los edificios existentes, podríamos lograr en algunos casos el autoabastecimiento.

⁵⁰ PERSSEN, Nicole. Biomimética – Escarabajo *Stenocara* – imágenes detalle de caparazón. En: *nperssen.Wordpress*. [En línea]. 2014. [Consulta: 3 Dic. 2019] Disponible en: <https://nperssen.wordpress.com/2014/11/06/biomimetica-escarabajo-stenocara-imagenes-detalle-de-caparazon/>

⁵¹ DIZIKES, Peter. Out of thick air. En: *MIT News*. [En línea]. 2011.[Fecha de consulta: 3 Dic. 2019] Disponible en: <http://news.mit.edu/2011/fog-harvesting-0421>

P I N T U R A E F E C T O L O T U S
W I L H E L M B A R T H L O T T . A L E M A N I A . 1 9 8 2 .

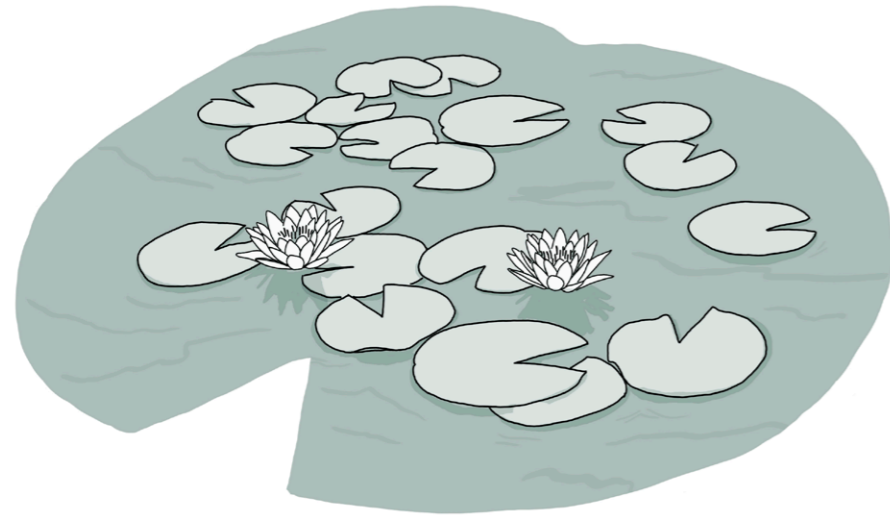


Ilustración 39. Flores de Loto con sus hojas. Elaboración propia.

Aunque el fenómeno de la superhidrofobicidad ya había sido estudiado con anterioridad por Dettre y Johnson en 1964. No fue hasta mirar y preguntarse como lo hacía la naturaleza cuando encontraron la verdadera respuesta al problema. En 1982, el botánico **Wilhelm Barthlott**, de la Universidad de Bonn, se fijó en las curiosas superficies de las hojas de loto y encontró en ellas la auto limpieza natural.

Cuando observamos esta hoja en el microscopio, encontramos en ella una superficie extremadamente rugosa e irregular. Esta superficie, genera una alta tensión superficial sobre las gotas de agua, que tienden a minimizar su superficie de contacto, para tratar de generar una forma esférica. Cuanto menor es el ángulo de contacto entre ambas superficies mayor es su grado de hidrofobicidad.

“Las plantas con una superficie doble estructurado como el loto pueden alcanzar un ángulo de contacto de 170 °, por lo que el área de contacto de la gota es sólo el 0,6%. Todo esto lleva a un efecto de auto-limpieza.

Las partículas de suciedad con un área de contacto extremadamente reducida son recogidos por las gotas de agua y son por lo tanto de fácil limpieza de la superficie.”⁵²

Gracias a esta ventaja evolutiva de la hoja, el ser humano ha desarrollado pinturas, tratamientos, recubrimientos, aplicando estas propiedades. Con esto se pretenden generar superficies, que al igual que la hoja, se limpien sin la necesidad de usar detergentes u otro tipo de sustancias contaminantes.

Algunas de las aplicaciones que vemos en edificaciones ya construidas, son revestimientos en fachadas, que son capaces de limpiarse únicamente con el agua de lluvia.

⁵² Colaboradores de Wikipedia. Efecto Loto. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [En línea]. 2019. [Consulta: 7 Dic. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_loto

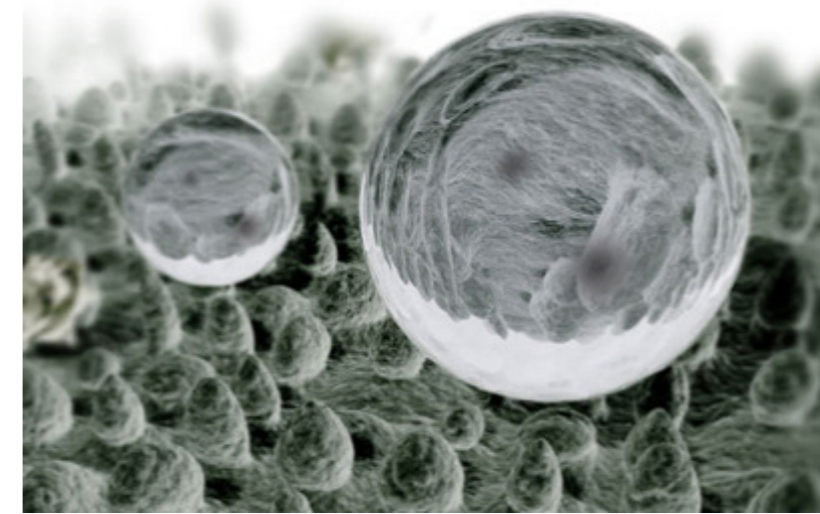


Ilustración 40. Vista al microscopio de la superficie de una hoja de flor de Loto con una gota de agua. [Imagen digital]. 2011. [consulta: 3 Dic. 2019] Disponible en: <https://faircompanies.com/articles/biomimetica-10-disenos-que-imitan-la-naturaleza/>

4.2. EL ORGANISMO, EL COMPORTAMIENTO Y EL ECOSISTEMA.

Como hemos explicado en el punto anterior, existen tres niveles de aproximación a la biomímesis. En este se aproximan a ella desde los diferentes niveles de estudio de la biología.

Sin embargo existe otra manera de aproximación al estudio de la biomímesis, al igual que el apartado anterior, busca el acercamiento entre el entendimiento de las leyes naturales y su aplicación en el campo de la arquitectura.

Para ello se desarrollará brevemente en que consiste cada una de las aproximaciones y su posterior aplicación en arquitectura, pues cada una de ellas es complementaria a la anterior.

La aproximación en el **nivel de organismo**, como su propio nombre indica, trata de imitar a un organismo específico de la biología. Este nivel trata de aplicar sus funciones o formas en la construcción de elementos arquitectónicos. Cabe destacar que tanto en el mundo de la arquitectura como en el de la biología, sacar a un organismo y estudiarlo como si no se relacionase con su entorno, en muchas ocasiones, no suele ser suficiente, dado que un organismo siempre está supeditado a un contexto más amplio.

Por esto es totalmente necesario dar un paso más hasta la segunda aproximación. En este nivel, el **nivel de comportamiento**, se trata de imitar la manera en el que el organismo se relaciona con su entorno, su comportamiento y el contexto en el que se encuentra.

Por último, englobando las dos estrategias anteriores y dando otro paso más nos encontramos en el **nivel de ecosistema**. Este nivel trata de imitar los factores y procesos que forman un ecosistema.

“Para que el diseño arquitectónico imite a la naturaleza en el nivel del ecosistema, debe seguir estos seis principios. [...]”

Los principios del ecosistema indican que los ecosistemas:

- 1. dependen de la luz solar contemporánea;*
- 2. optimizar el sistema en lugar de sus componentes;*
- 3. se sintonizan y dependen de las condiciones locales;*
- 4. son diversos en componentes, relaciones e información;*
- 5. crear condiciones favorables para una vida sostenida; y*
- 6. adaptarse y evolucionar a diferentes niveles y a diferentes velocidades.*

Básicamente, esto significa que [...] deben trabajar entre ellos en lugar de contra para que el ecosistema funcione sin problemas.”⁵³

⁵³ AAVV. Arquitectura Biomimética. En: *HisoUR*. [En línea]. [Consulta: 27 Feb. 2019]. Disponible en: <https://www.hisour.com/es/biomimetic-architecture-28827/>

4.2.1. ORGANISMO.

Imitación de un organismo aplicando sus funciones o formas a elementos arquitectónicos

TORRE SWISS RE O “THE GHERKIN”
NORMAN FOSTER. LONDRES, INGLATERRA, REINO UNIDO. 2003.

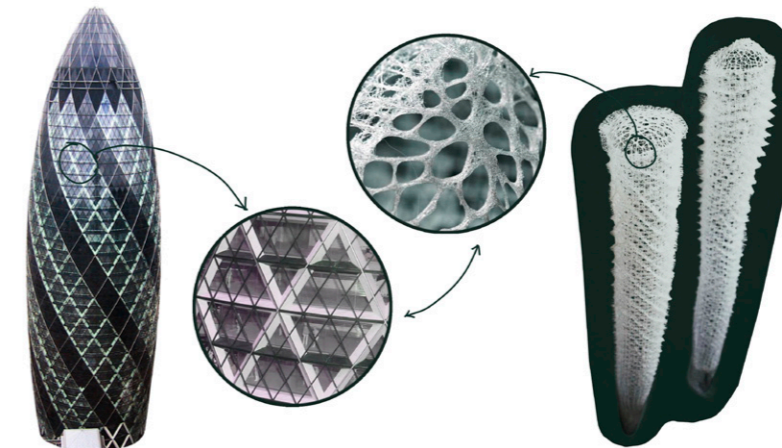


Ilustración 41. Collage de imágenes de la Torre Swiss y la esponja canasta de Flores de Venus, para mostrar las similitudes que existen entre ellas. Elaboración propia.

Este proyecto de **Norman Foster** es uno de los rascacielos más conocidos de Londres. Al igual que a lo largo del resto del trabajo, me centraré en explicar del proyecto únicamente su relación con la biomimética.

En este caso explicaremos la importancia de **la esponja canasta de flores de Venus** para el desarrollo del proyecto, visto que tanto su estructura, como su ventilación, están inspiradas en esta esponja.

La estructura de este animal se caracteriza por tener un tubo cilíndrico y paredes delgadas compuestas por una malla de espículas de sílice. Es este exoesqueleto reticular y su configuración geométrica lo que dotan a esta esponja de una mayor rigidez, límite elástico y mínima propagación de las grietas. Eso les permite dispersar las fuerzas de las corrientes marinas y poder sobrevivir a grandes profundidades con grandes fuerzas de columnas de agua sobre ellas.

Son estos elementos los que el arquitecto trata de trasladar a la arquitectura. La torre Swiss imita la forma estructura de la esponja, para trasladar lo que ella hace en el agua, al aire que soporta el edificio. Con la forma redondeada, no solo consigue obtener una menor desviación del viento, si no que con la diferencia de presión, que se genera, se obtiene un sistema de ventilación natural.

El desarrollo de la estructura del edificio fue un reto, ya que la estructura diagonal y la forma circular hacen que en cada planta, las uniones tengan ángulos diferentes. Este problema se resolvió en los nudos de la estructura, cada uno de ellos tiene un ángulo diferente, a que se conectan los tubos de acero de la estructura. Con todo esto consiguió, al igual que en la cesta de venus, una estructura perimetral capaz de resistir al viento, sin necesidad de columnas en el interior.

Como resultado de esta estructura, se pudo imitar otro comportamiento de la esponja. Se trasladó el comportamiento que tiene a la hora de absorber los nutrientes a través de los flujos de agua. Otra vez se cambió el funcionamiento en agua al aire. Por esta razón, se consigue un sistema mixto de ventilación pasiva gracias a las aperturas de la fachada. Por eso se consigue reducir la energía que necesitaría un edificio de estas características para poder climatizarse.

Con este ejemplo, vemos como una vez más, la naturaleza ya había resuelto algunos de los problemas a los que nos enfrentamos a la hora de construir.

E D E N P R O J E C T

NICHOLAS GRIMSHAW + MICHAEL PAWLYN. CORNUALLES, INGLATERRA, REINO UNIDO .2001.



Ilustración 42. Vista panorámica del Eden Project. [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eden_Project_geodesic_domes_panorama.jpg

El proyecto de los biomas, en cuanto a imitación de la naturaleza se refiere, se centra principalmente en la imitación de las burbujas, los granos de polen y los radiolarios. Fué gracias al estudio de estos organismos, aparentemente tan diferentes, los que hicieron posible la generación de la estructura del proyecto.

El proyecto se ubicó en una mina de arcilla, y el reto era proyectar en un emplazamiento donde el terreno era sumamente irregular y cambiante. Ante este problema, el arquitecto **Grimshaw**, junto con el conocido arquitecto especializado en biomimética **Michael Pawlyn**, miraron en la naturaleza para hallar la solución más óptima.

En base a estas dificultades, una de las claves para la generación de los biomas surgía al fijarse en las burbujas. Imitando su modelo generativo, les proporcionó la idea de diseñar una manera de construir la estructura que fuese independiente de la morfología final del terreno. Así podrían adaptarse a él, al igual que las pompas de jabón se adaptan a la superficie donde se generan.

Otro de los problemas surgía al tener que enfrentarse a tener que salvar las grandes luces y la gran extensión de los espacios. Por esta razón recurrieron a la estructura del polen y las radiolarias. Estas estructuras, junto al sistema de cúpulas geodésicas que el arquitecto **Buckminster Fuller** había empleado con anterioridad, fueron el punto de partida de su propuesta estructural.



Ilustración 43. Composición formada por: Pompas jabón Frei Otto Otto [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://pt.slideshare.net/quest2515e/unab2-frei-otto-natura> .Vista en microscopio de un grano de polen [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://esacademic.com/pictures/eswiki/73/lpomoea_purpurea_pollen.jpg .Vista en microscopio de una radiolaria [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Radiolaria-sp2_hq.jpg

Gracias a la combinación de ambas ideas, propusieron soluciones estructurales basadas en cúpulas formadas por hexágonos y pentágonos. Con esta solución se consiguió generar una solución estructural más eficiente, que combinada con los cerramientos de ETFE, un material que es muy ligero y resistente, consiguieron reducir aún más el material de los perfiles de aluminio de esta gran estructura.

De tal forma que aprender de las leyes naturales, siempre nos enseña que se puede resolver los desafíos aparentemente más complejos porque la propia naturaleza ya los ha resuelto antes. Aplicando la ley del mínimo esfuerzo, es decir, optimizando los diseños y construcciones de la manera más eficiente.

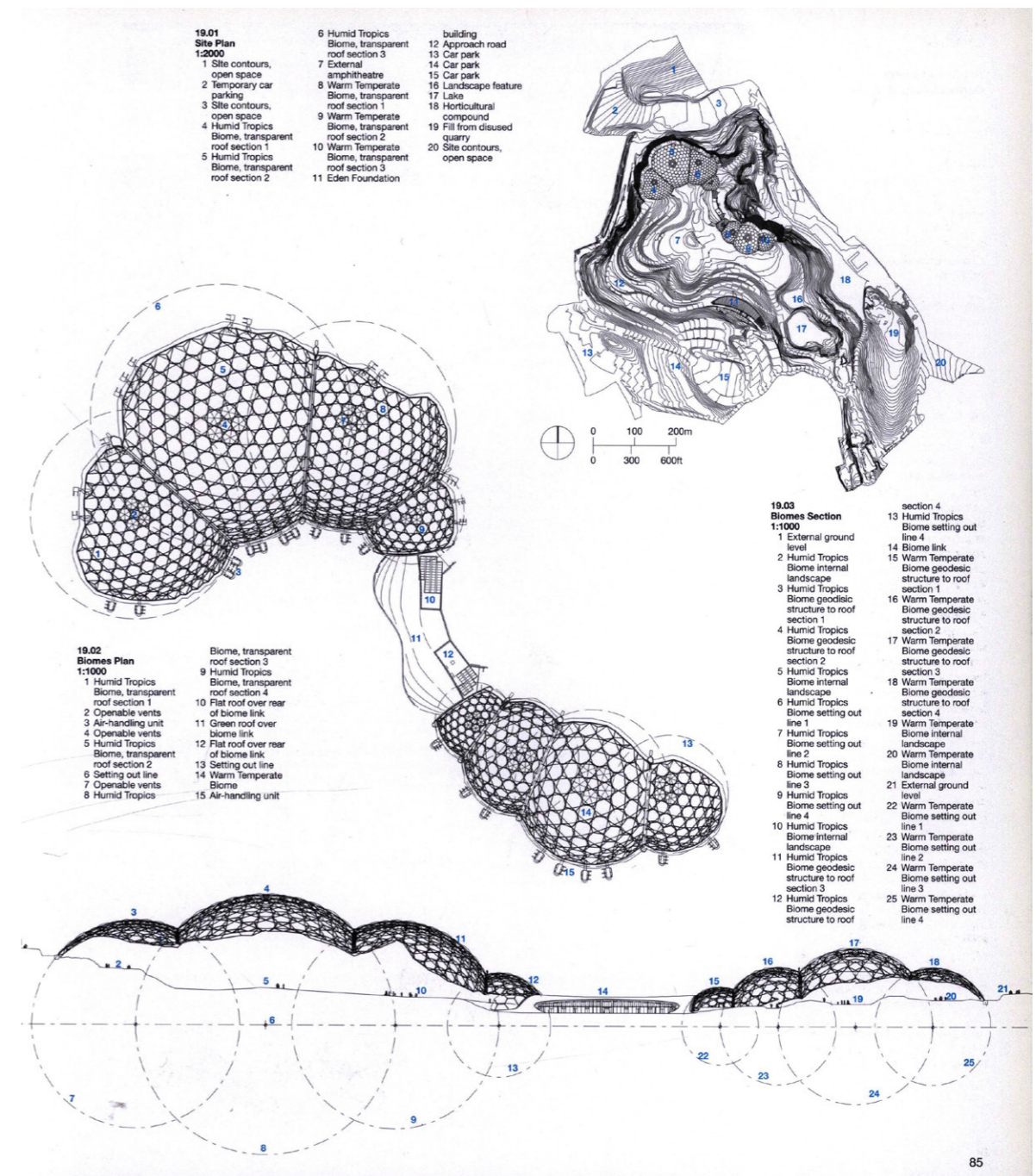


Ilustración 44. GRIMSHAW, Nicholas. Eden Project Plans [imagen digital], 1996. Urban Haptics. [consulta: 22 de Dic. 2019] Disponible en: <https://www.pinterest.co.uk/pin/449304500303705927/>

4.2.2. NIVEL DE COMPORTAMIENTO

Imitación de la interacción de un organismo con su entorno y el contexto en el que se encuentra.

E A S T G A T E C E N T E R
MICK PEARCE + ARUP ASSOCIATES. HARARE, ZIMBABUE. 1996.



Ilustración 45. Complejo comercial y de oficinas Eastgate Center, Harare, Zimbabwe. [imagen digital]. Fuente de la imagen base: <https://www.livinspaces.net/ls-tv/watch-how-the-eastgate-center-in-zimbabwe-cools-itself-without-air-conditioning/>

El proyecto Eastgate Center es un edificio de usos mixtos, que por un lado cuenta con un centro comercial, y por otro con oficinas. Hasta aquí podría parecer un edificio como otro cualquiera, pero es su relación con las termitas africanas lo que hace de esta una construcción excepcional.

Su inspiración en los montículos de termitas surge por la necesidad de construir un gran edificio reduciendo los costes energéticos de este. De tal forma que el arquitecto **Mick Pearce** solo tuvo que mirar a su alrededor. Así se dio cuenta de que las termitas de Zimbabwe, con sus grandes construcciones, los termiteros, lograban sobrevivir en las mismas condiciones climáticas.

Así pues, se dispuso a investigar el comportamiento de estos animales para poder trasladar después lo aprendido en su edificio. Con ello aprendió que:

“Las termitas en Zimbabwe construyen montículos gigantes dentro de los cuales cultivan un hongo que es su principal fuente de alimento. El hongo debe mantenerse exactamente a 87 grados F, mientras que las temperaturas exteriores varían de 35 grados F por la noche a 104 grados F durante el día. Las termitas logran esta notable hazaña al abrir y cerrar constantemente una serie de respiraderos de calefacción y refrigeración en todo el montículo a lo largo del día. Con un sistema de corrientes de convección cuidadosamente ajustadas, el aire es aspirado en la parte inferior del montículo, hacia abajo en recintos con paredes fangosas y hacia arriba a través de un canal hasta el pico del montículo de termitas. Las termitas laboriosas cavan constantemente nuevos respiraderos y tapan los viejos para regular la temperatura.”⁵⁴

⁵⁴ FEHRENBACHER, Jill. Biomimetic Architecture: Green Building in Zimbabwe Modeled After Termite Mounds. En: *Inhabitat*. [En línea]. 2012. [Consulta: 6 Dic. 2019]. Disponible en: <https://inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-center-in-zimbabwe/>

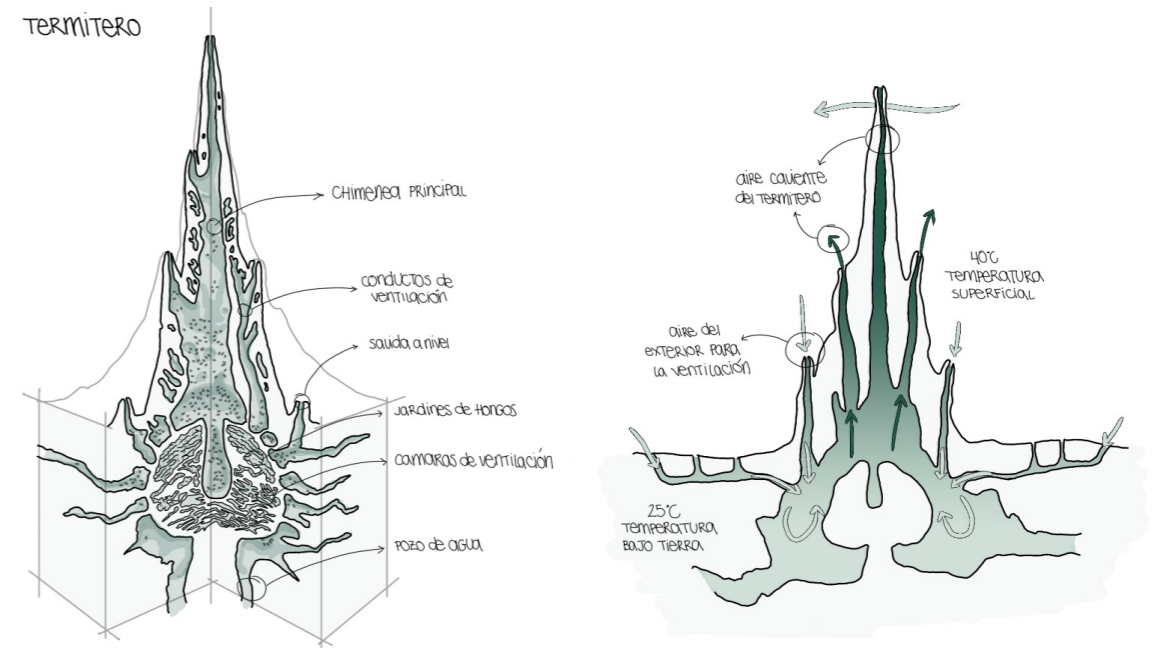


Ilustración 46. Partes y refrigeración de un termitero. Elaboración propia.

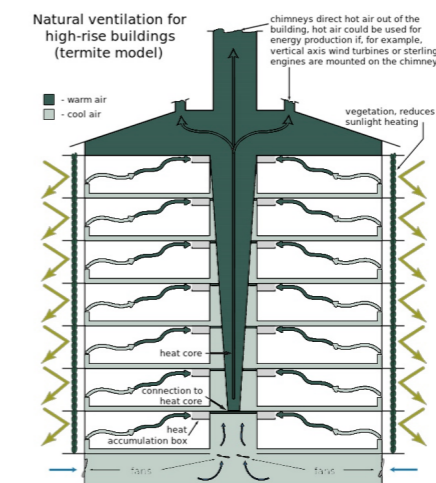


Ilustración 47. Esquema de la ventilación natural del edificio. [imagen digital]. Fuente de la imagen base: https://www.wikiwand.com/en/Eastgate_Centre,_Harare.

Este sistema de climatización pasiva, fue uno de los aspectos más importantes que aplicó en el proyecto. Los edificios se refrigeran a través de unos conductos verticales, por los que el aire exterior entra desde el primer piso y este se va calentando o enfriando dependiendo de la temperatura. Este aire fresco, es impulsado a cada una de las plantas, donde el aire viciado sube y sale hacia las chimeneas de cada uno de los tejados.

Este sistema de ventilación se mejora gracias a la orientación y los materiales con los que se construyeron. Su ubicación, al igual de los termiteros, está orientada en el eje norte-sur, para facilitar dicha ventilación. Además, gracias al empleo de materiales de alta capacidad térmica, junto con la estrategia de elementos de piedra de la fachada que sobresalen para proteger las ventanas, ayudan a mejorar la pérdida o ganancia de calor por el día o noche.

Si bien no se consiguió que el edificio funcionase exactamente igual que los termiteros, ya que es necesaria la ayuda de ventiladores para mover el aire en el interior, se consiguió reducir hasta un 90% la energía necesaria para su climatización para un edificio de sus mismas características.



Ilustración 48. Render del proyecto Qatar Sprouts. [imagen digital]. Fuente de la imagen base: <https://inhabitat.com/>

El proyecto Qatar Sprouts, fue diseñado para para el Ministerio de Asuntos Municipales y Agricultura de Qatar, aunque finalmente no se construyó. El edificio, al igual que el ejemplo anterior, se fija en su entorno para resolver uno de los grandes problemas del clima del desierto.

El concepto biomimético en el que se basa el edificio, es en un cactus, que se ubica en el desierto de la zona. Este organismo es crucial, ya que lo que se pretende es reducir el consumo energético, y se ha adaptado para sobrevivir en climas áridos y secos.

Una de las características fundamentales que se pretenden imitar, es cómo con su morfología le permite regular su temperatura para almacenar el agua. Debido a que en este tipo de clima las precipitaciones a lo largo del año son muy escasas. Esto lo consigue principalmente por particularidades, sus espinas y sus estomas.

Las espinas, aparte de proteger a la planta de sus depredadores, tienen una doble función. Por un lado, sirven a la planta para la recolección y canalización del agua de lluvia. Esta agua, es canalizada hacia la base de la planta, donde posteriormente la almacena. Otra de las funciones más importantes de las espinas, es que ayudan al cactus a protegerse del sol. La sombra que le proporcionan, ayuda a la planta a regular la temperatura y evitar la evaporación del agua.

Pero las espinas, no son el único factor que ayuda a mantener su temperatura, y es aquí donde entran en juego los estomas de la planta.

"el sistema orgánico del cactus [...], donde intervienen una serie de interconexiones nerviosas que accionan y reaccionan entre sí, impulsados por las condiciones climáticas del desierto, operando interiormente de modo que en determinado momento los estomas se abren para dar paso al aire frío de la noche, y en otro momento se cierran para evitar ese paso, cuando ya el aire se ha calentado durante el día. De este modo, la planta logra mantener la transpiración abriendo sus estomas por la noche cuando la temperatura es menor."⁵⁵

Con todos estos procesos biológicos definidos, veremos cómo estos se trasladan al edificio. El proyecto traslada la protección solar al edificio a través de un sistema de oscurecimiento inteligente en toda la envolvente. Este sistema permite controlar la intensidad de radiación solar que se transfiere al edificio. Esta fachada inteligente, tiene la capacidad de variar su posición dependiendo de la temperatura y la luz que se requiera en el interior, gracias a los sensores termodinámicos. Esto permite al edificio disminuir la cantidad de climatización artificial requerida para un edificio de sus características.

Además de con esta fachada inteligente, el edificio cuenta con un sistema de gestión de aguas. El agua del edificio, será reciclada gracias a la incorporación de organismos vivos, que facilitarán su descomposición y reducirán el coste energético en el proceso. Pudiendo utilizar el agua el su cúpula botánica, compuesta de vegetación viva. Este proceso, al igual que en el cactus, servirá al edificio para almacenar el agua y generar vida a través de la vegetación.

CACTUS. (CACTACEAE)

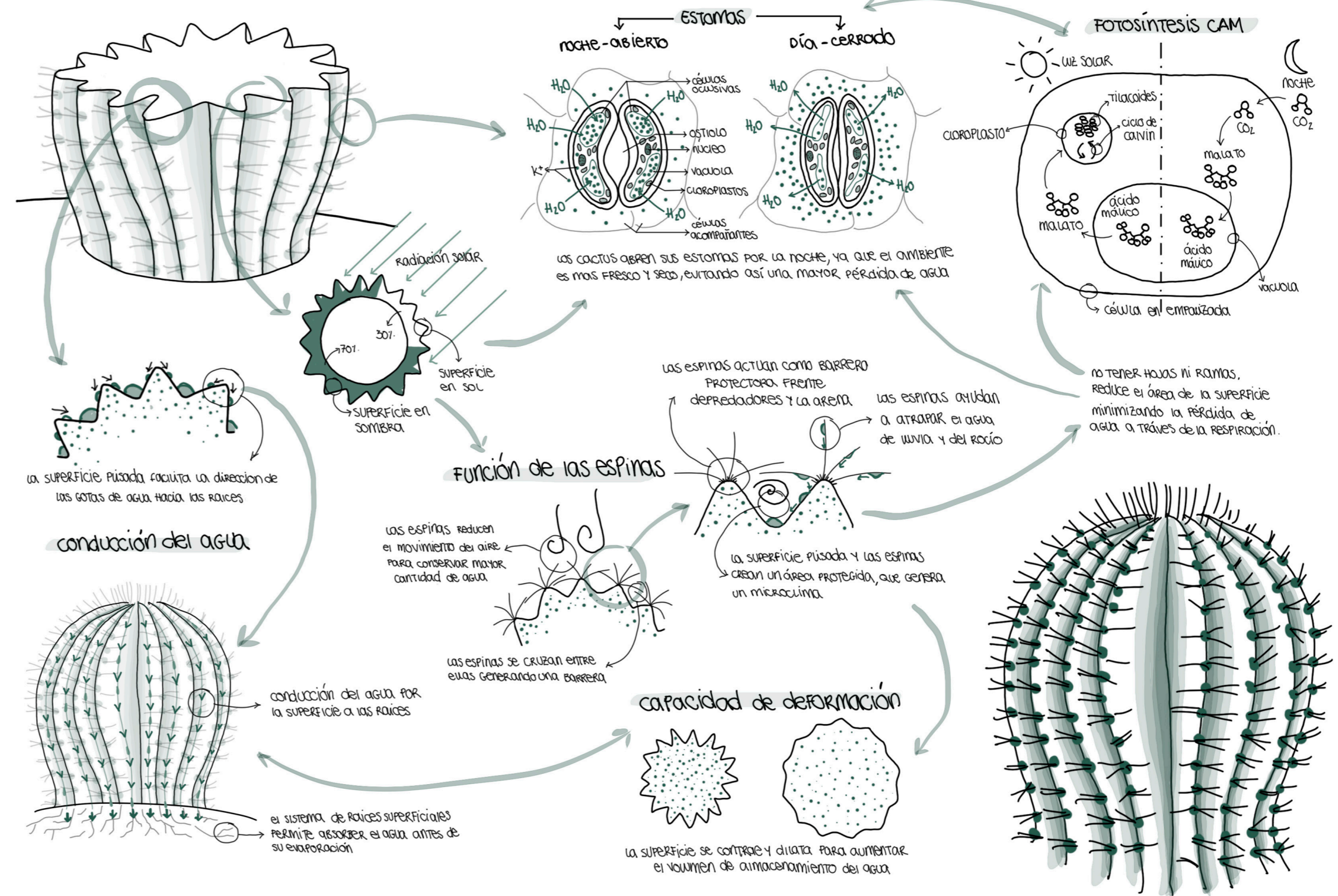


Ilustración 49. Funcionamiento del cactus. Elaboración propia.

55 EDGARDO VEDOYA, Daniel. Introducción a la biomimesis aplicada a la arquitectura. En: *Medium*. [En línea]. 2018. [Consulta: 7 Dic. 2019]. Disponible en: <https://medium.com/@lulalator/introducci%C3%B3n-a-la-biom%C3%ADmesis-aplicada-a-la-arquitectura-ae588898682c>

4.2.3. ECOSISTEMA

Imitación de los factores y procesos que forman un ecosistema aplicados a la arquitectura.

En este punto, antes de pasar a explicar las obras, me gustaría matizar algunos términos sobre que es un ecosistema. La definición de la RAE para ecosistema es:

“Comunidad de los seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente.”⁵⁶

Este conjunto de seres vivos, que habitan en un área determinada, se desarrollan y relacionan entre sí y con su ambiente abiótico. Son estas relaciones, las que generan las principales funciones de los ecosistemas, siendo la más importante la función de regulación, ya que las otras funciones dependen de esta. Según la clasificación de De Groot:

1. Funciones de regulación: la capacidad de los ecosistemas para regular los procesos ecológicos esenciales –p.e. regulación climática, control ciclo nutrientes, control ciclo hidrológico, etc.-.

2. Funciones de sustrato: la provisión de condiciones espaciales para el mantenimiento de la biodiversidad. (También denominadas por diferentes autores como funciones de hábitat).

3. Funciones de producción: la capacidad de los ecosistemas para crear biomasa que pueda usarse como alimentos, tejidos, etc.

4. Funciones de información: la capacidad de los ecosistemas de contribuir al bienestar humano a través del conocimiento, la experiencia, y las relaciones culturales con la naturaleza –p.e. experiencias espirituales, estéticas, de placer, recreativas, etc.-.⁵⁷

A mi juicio es importante subrayar estas funciones, ya que inevitablemente van ligadas a los métodos de estudio de los ecosistemas. Brevemente, explico cuáles son los tres métodos de estudio más habituales, ya que las obras que expongo a continuación van ligados a ellos.

La **primera aproximación**, surge a través del análisis de un ecosistema en base a las relaciones alimenticias que se producen en él, es decir, como las cadenas tróficas van transfiriendo la materia orgánica y la energía entre las diferentes especies que la componen.

La **segunda aproximación**, surge a través del estudio de los ciclos de la materia de un ecosistema. Esta materia forma un ciclo cerrado en el ecosistema, ya que como dijo **Antoine-Laurent Lavoisier**: *“La materia no se crea ni se destruye: solo se transforma”*

La **tercera aproximación**, se centra en el estudio del flujo de la energía, y como esta va pasando por los distintos niveles que la componen, encargándose del buen funcionamiento dentro de los ecosistemas.

⁵⁶ RAE. Ecosistema. En: 23ª Edición del <<Diccionario de la lengua española>> Real Academia Española. [En línea] [Fecha de consulta: 9 Dic. 2019]. Disponible en: https://dle.rae.es/ecosistema?m=30_2

⁵⁷ GÓMEZ BAGGHETUN, Erik, Pedro L. Lomas, Berta Martín López, Carlos Montes. Funciones y servicios de los ecosistemas: una aproximación a los conceptos clave. En: Ecomilenio. [En línea]. 2009. [Consulta: 9 Dic. 2019]. Disponible en: <http://www.ecomilenio.es/funciones-y-servicios-de-los-ecosistemas-una-aproximacion-a-los-conceptos-clave/169>

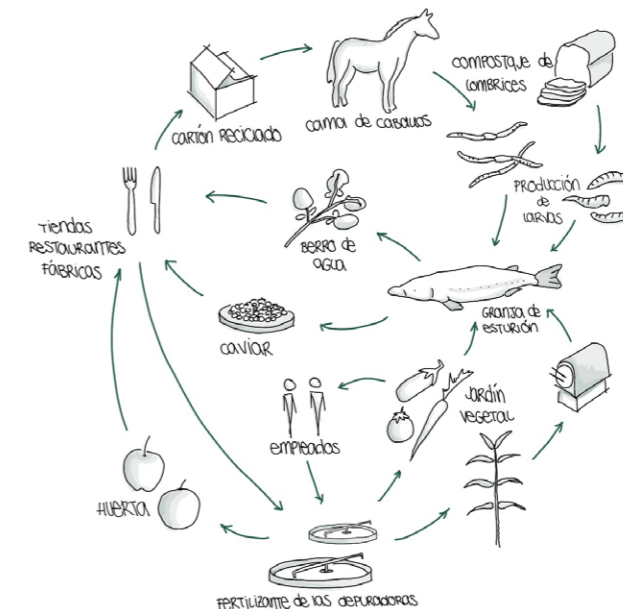


Ilustración 50. Esquema de funcionamiento del proyecto Cardboard to Caviar. Elaboración propia.

El proyecto **Cardboard to Caviar**, quizá no es un proyecto arquitectónico o urbanístico al uso, pero he considerado oportuno incluirlo, ya que genera o modifica diferentes espacios de la ciudad y es un gran ejemplo para el apartado que nos encontramos desarrollando.

El proyecto surge como un *sistema de bucle cerrado*, es decir, se retroalimenta de sí mismo. Trata de emular los diferentes métodos de estudio de los ecosistemas, explicados anteriormente, para reducir así los diferentes residuos y darles un nuevo uso.

En la zona donde comienza el ciclo, existen muchos bares y restaurantes, cuyos residuos no siempre se reciclaban bien, y es aquí donde surgió la idea de aprovechar alguno de ellos como el cartón. El proyecto recoge el cartón de los diferentes restaurantes y les da un nuevo uso triturándolos y convirtiéndolos en camas de caballos.

Cuando este material es ensuciado, se recoge y se le da un nuevo uso, convirtiéndose en compost con la ayuda de otro eslabón más de esta cadena, los gusanos. Por tanto en este nuevo proceso nos encontramos con dos nuevos productos que a su vez se van a reutilizar. Los gusanos servirán como alimento para los esturiones de la piscifactoría y el compost servirá para los jardines y huertos.

En esta piscifactoría, se crían los esturiones con los que se obtiene el caviar. Esta piscifactoría utiliza un sistema de filtración de microorganismos y berros para limpiar el agua, por lo que sirve a la vez para cultivar este tipo de vegetales, que junto con el caviar son vendidos de nuevo a los restaurantes donde se recogieron los cartones, cerrando una parte del ciclo.

Además, en los alrededores del lugar, se están generando jardines vegetales y huertos, en los cuales se emplea a gente desfavorecida. Estos alimentos, del huerto sirven a su vez como alimento de los peces y de las personas. Además la madera y desechos que se produce del jardín, se utilizan para mantener la temperatura del agua de la piscifactoría con una caldera de biomasa.

Este proyecto es un gran ejemplo de cómo imitando los procesos naturales de los ecosistemas, se consigue que los residuos de unos sean alimentos de otros, y cómo es posible transformar un gran problema de hoy en día, como es la gestión de residuos, en una gran oportunidad.

T H E L A V A S A P R O J E C T

HOK (HELLBATA, OBATA + KASSABAUM INC.).LAVASA, INDIA. 2008.



Ilustración 51. Acuarela de la representación temprana de la ciudad de Lavasa. [imagen digital] Fuente base de la imagen: <https://harvardmagazine.com/2009/09/architecture-imitates-life>

La ciudad de **Lavasa**, es uno de los muchos ejemplos de ciudades en los que vemos como las construcciones han modificado el entorno en el que se ubican, hasta tal punto que el ecosistema en el que se encuentran se ve gravemente alterado.

Dada la ubicación de la ciudad en el valle que se forma entre las cadenas montañosas de los **Ghats occidentales**, y su clima tropical, hace que la ciudad se llene de agua aumentando hasta nueve metros de altura durante la estación monzónica, mientras el resto del año encontramos un terreno árido. A medida que pasan los años, se observa como estos cambios son cada vez más bruscos agravados por el consumo de los recursos del ser humano.

Por esta razón, el equipo de **HOK** junto con **Biomimicry Guild**, generaron un equipo de trabajo para que la nueva planificación de la ciudad de 8000 acres ayudase a revertir el proceso.

La primera aproximación para este gran proyecto, fue estudiar el ecosistema local, tanto para aprender de él como para saber qué problemas se encontraban en base a su deterioro. Se dieron cuenta que la agricultura y la ciudad actual, habían hecho desaparecer el bosque caducifolio anterior, deteriorando el terreno y convirtiéndolo en un paisaje árido.

“En su estado original, los árboles habrían mantenido la calidad del suelo, almacenado el agua durante la estación seca y proporcionado un dosel para controlar la evaporación. El equipo tomó esto como el punto de partida del diseño.”⁵⁸

⁵⁸ GENDALL, John. Architecture That Imitates Life. *Harvard Magazine Inc.* [En línea] Massachusetts: John S. Rosenberg, 2009, Septiembre-Octubre, pp.8-10. ISSN 0095-2427 [Consulta: 2 Ene. 2020]. Disponible en: <http://www.harvardmag.com/pdf/2009/09-pdfs/0909-HarvardMag.pdf>

Por esto, uno de las soluciones principales que plantearon, fue emular estos árboles, diseñando un sistema de cimentación, de la mano de la consultora de ingeniería **Buro Happold**, que permitan almacenar y retener el agua de lluvia y subterránea para su posterior uso en los meses secos. También se fijaron en higuera nativa de Banyan, autóctona de la zona, para facilitar la escorrentía de agua de los edificios y favorecer la auto limpieza de los mismos, al igual que hacen las hojas de este árbol con la forma de sus hojas acabadas en punta de goteo. Con estas estrategias pretenden favorecer a la revitalización del terreno del lugar.

En cambio otro de los problemas que surgían, era la subida del agua durante la temporada de lluvias. Para esto, también observaron cómo solucionaba ese problema los animales del lugar, encontrando la solución en las hormigas. Estas, para evitar que el agua penetre en sus nidos, construyen canales subterráneos donde reconducen el agua por el subsuelo. Y fue esta misma estrategia, la que se aplicará en el plan maestro, donde se canalizará el agua siguiendo sus mismas estrategias para evitar las futuras inundaciones.

T H E S A H A R A F O R E S T P R O J E C T
EXPLORATION ARCHITECTURE. AQABA , JORDANIA + DOHA, QATAR. 2008

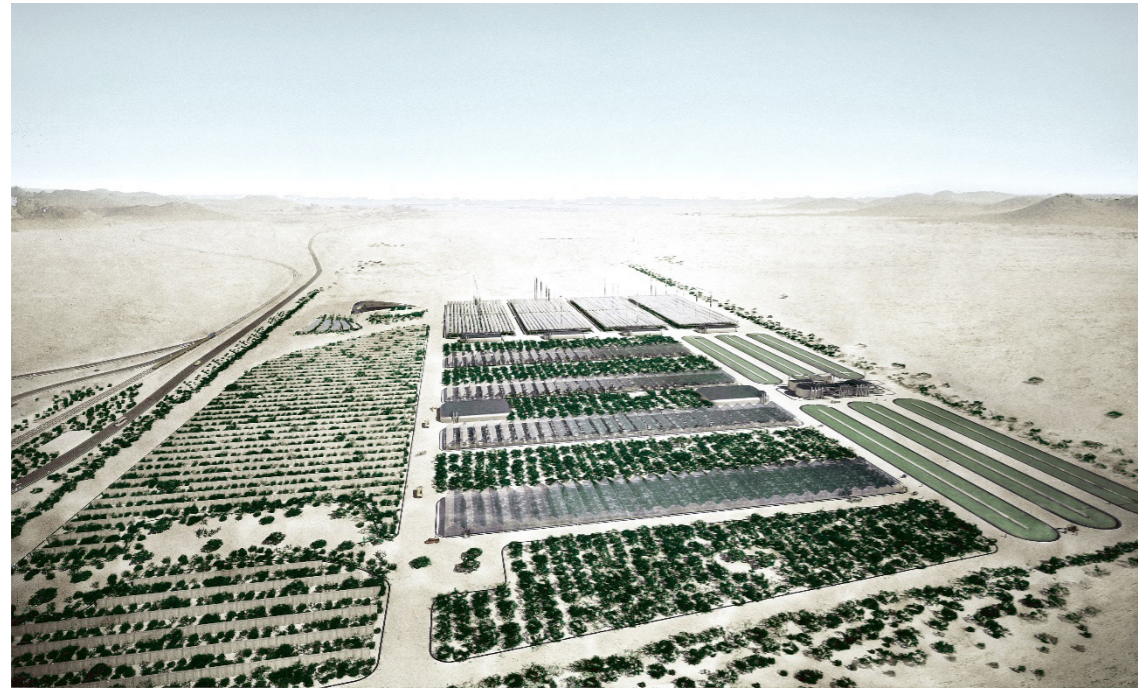


Ilustración 52. The Sahara Forest Project. [imagen digital] Fuente base de la imagen: <https://www.saharaforestproject.com/>

Para el correcto funcionamiento del **proyecto Sahara Forest**, es necesaria la relación que se produce entre los diferentes elementos que la componen, ya que juntos forman un sistema de ciclo cerrado, al igual que los ecosistemas.

La idea de proyecto, surge tras el descubrimiento del **grupo Exploration**, donde ambos desiertos, anteriormente, estaban constituidos por bosques. Por esa razón, decidieron actuar en ellos y revertir los efectos de desertificación, pero este no es el único factor que les impulsó a la realización del proyecto.

Otras causas que fomentaron el desarrollo del proyecto, fue la escasez de alimento que se produce en la zona, la escasez de agua y el gran consumo de energía que se necesita para subsanar ambas carencias, con todas las consecuencias sobre la contaminación, el cambio climático, sociales y económicas que esto conlleva.

Una de las mayores inspiraciones de este proyecto es el escarabajo de niebla de Namibia, explicado en el apartado anterior, sin embargo, no se utiliza de la misma manera. En el proyecto se centran en cómo el escarabajo de color negro durante el día absorbe e irradia el calor, mientras por la noche se enfría y produce la condensación de las gotas para luego beber, pero no a nivel microscópico como explicábamos anteriormente, si no en su conjunto como organismo y en como este se relaciona con el ecosistema en el que se encuentra.

Estos principios los aplican en el proyecto a una mayor escala, gracias a la evaporación frente al invernadero del agua del mar, la cual es recolectada mediante el aire o es bombeada para acercarla, y así poder crear un clima húmedo que favorezca al cultivo del interior, consiguiendo además separar el agua y la sal.

El agua es utilizada en varias partes del proyecto, una de ellas es para limpiar la matriz de espejos que utilizan para concentrar los rayos de sol que a su vez calientan el agua hasta convertirla en vapor, y este vapor impulsa las turbinas que generan el doble de energía que otras plantas que simplemente funcionan con energía solar.

Aunque la idea primigenia de este sistema surgió del escarabajo, observamos como a lo largo del proceso también se imita el ciclo hidrológico de la Tierra.

“El ciclo del agua, también conocido como ciclo hidrológico, describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra.”⁵⁹

El resto de agua se utiliza para el riego de las plantas del interior del invernadero, pero como este sistema produce más agua de la que necesitan, el resto de agua se arroja a las plantas del exterior, que sirven para reforestar la zona, las cuales también favorecen a los cultivos y a la ganadería, que proporcionan mayor cantidad de sombra. Con la ganadería local se consigue además que los animales enriquezcan con nutrientes el suelo a través de su estiércol.

Además este proyecto cuenta con una granja de algas y halófilos, la cual proporciona humedad al ambiente en el proceso de cultivo, favoreciendo al microclima que se pretende generar. Las algas a su vez, son usadas como biomasa y como alimento en los estanques de maricultura.

Como podemos ver en este proyecto, también se trabaja a nivel de ecosistema como un sistema cíclico, ya que los diferentes factores que influyen trabajan conjuntamente y se van retroalimentando los unos de los otros, para tratar de lograr un sistema de cero residuos.

The Saltwater Infrastructure

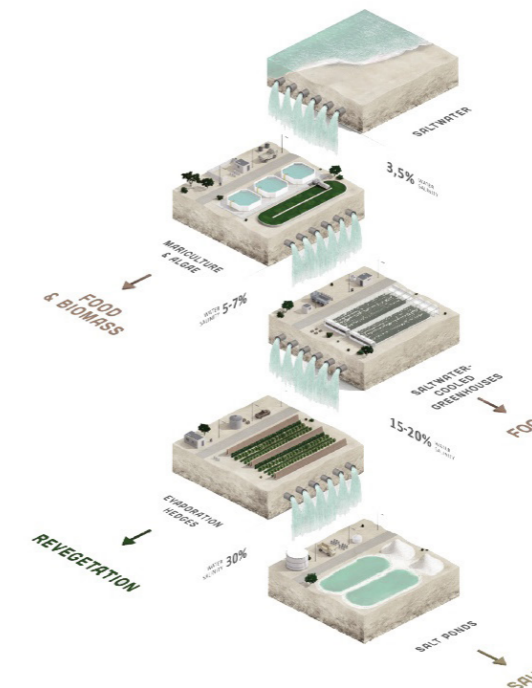


Ilustración 53. The Saltwater Infrastructure [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://www.saharaforestproject.com/>

59 PÉREZ, Guillermo. Ciclo hidrológico (o del agua). En: *Ciclo Hidrológico*. [En línea]. [Consulta: 4 Ene. 2020]. Disponible en: <https://www.ciclohidrologico.com/>

Me gustaría concluir este capítulo con una de las frases de Janine, que a mi juicio resume de manera clara y concisa las ideas generales que se han tratado de transmitir en este apartado:

"El primer nivel de la Biomimesis es la imitación de la forma, pero muchas veces no basta. El nivel más profundo es replicar el proceso natural, aunque existe aún tercer nivel, y es recrear el funcionamiento de un ecosistema. Porque no se trata sólo de innovar por innovar, sino de restaurar la mismo tiempo el equilibrio perdido".

Janine Benyus

4.3. EL MOVIMIENTO.

Anteriormente hemos hablado de las diferentes aproximaciones y estrategias que existen a la hora de abordar la biomimética. Sin embargo, me gustaría inducir en este apartado una nueva aproximación de la mimesis del movimiento como nuevo punto de partida de diseño biomimético.

Una manera fascinante de explicar la relación que en la biología se construye entre movimiento y estructura formal, puede encontrarse en los trabajos de **Jan Knippers**. Este autor dirige en la Universidad de Sturgartt un equipo de investigación multidisciplinar, que aborda el estudio de cuestiones tan variadas como el movimiento de las flores, o las telas de araña.

F L E C T O F I N
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES AND STRUCTURAL DESIGN (ITKE). UNIVERSITY OF STUTTGART. 2011.



Ilustración 54. Prototipo de Flectofin® [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://d-nb.info/1055944583/34>

Uno de sus proyectos se trata de aparentemente, un simple parasol, y digo aparentemente con toda la intención, dado que todo el estudio que lleva detrás para la elaboración de este muestra la existencia de un gran trabajo de investigación por parte de sus creadores.

El Flectofin está diseñado para ser un nuevo sistema, para proporcionar sombra en la arquitectura, y una de las mayores diferencias que encontramos con otro tipo de sistemas de oscurecimiento como las lamas, es la falta de bisagras para conseguirlo.

Esto se debe principalmente a que durante su desarrollo han imitado a la naturaleza para conseguirlo, como dice Janine Benyus, en cada paso del proceso se han ido preguntando como estaba resuelto el problema por la naturaleza, y gracias a ese tipo de preguntas han conseguido el resultado deseado.

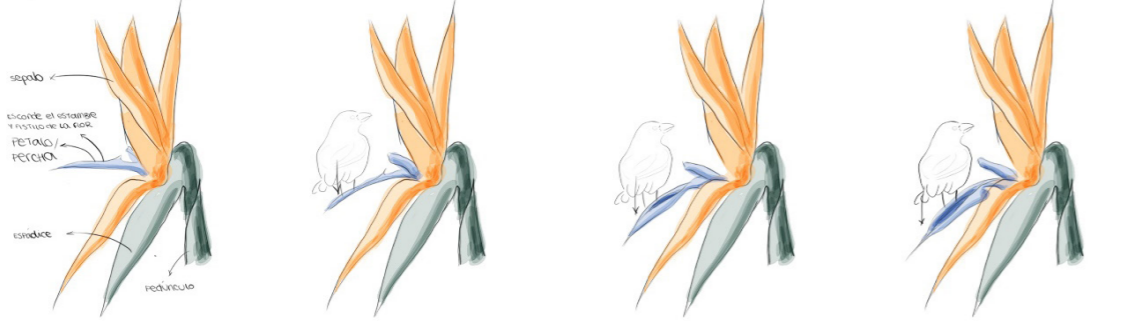
Con este fin se han fijado en como la geometría de, en concreto tres plantas que encontramos en el mundo natural, resolvían los problemas que iban surgiendo a la hora del diseño.

La primera de ellas fue la planta *Strelitzia Reginae*, también conocida como flor ave del paraíso, de la cual extrajeron la idea de la deformación elástica inspirada en las plantas, de modo que observándola vieron como en esta a diferencia de otras flores, la polinizaban las aves, y como la antera, donde se encuentra el polen de la planta, se encuentra oculto y protegido.

Es cuando el pájaro se posa sobre la antera, ejerciendo una fuerza perpendicular a esta, se despliega y muestra su polen para que quede pegado en las patas del pájaro y así esta se pueda reproducir mediante la polinización.

STRELTZIA REGINAE

Fuerza mecánica sobre la flor



sección transversal de la percha

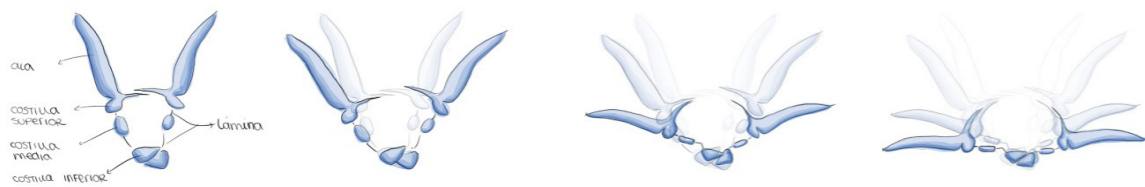


Ilustración 55. Cinemática de la flor y sección de la percha en posición cerrada y abierta. Elaboración propia.

Mediante la abstracción de esta parte de la flor, fue cuando el proyecto empezó a cobrar sentido, ya que dedujeron la ley para una estructura a la cual se le pudiese aplicar una flexión continua sin que deformara plásticamente, y colocando a 90° otro elemento sobre esta, el conjunto de ambas podía plegarse y volver a su forma original sin necesidad de bisagras, gracias a la deformación elástica a flexión.

Una vez llegados a este punto se les plantea otro problema, el cual resuelven observando la geometría de la hoja del eucalipto, el problema que se les plantea es que al aplicar la flexión en el elemento situado a 90° se generaban unas tensiones a tracción muy elevadas, que el material empleado era incapaz de soportar sin partir, sin embargo al fijarse en las hojas veían como la geometría de estas les dotaban de una mayor flexibilidad en la transición de su base con el pecíolo, por lo que decidieron aplicarla en el dispositivo.

HOJA DE EUCALIPTO

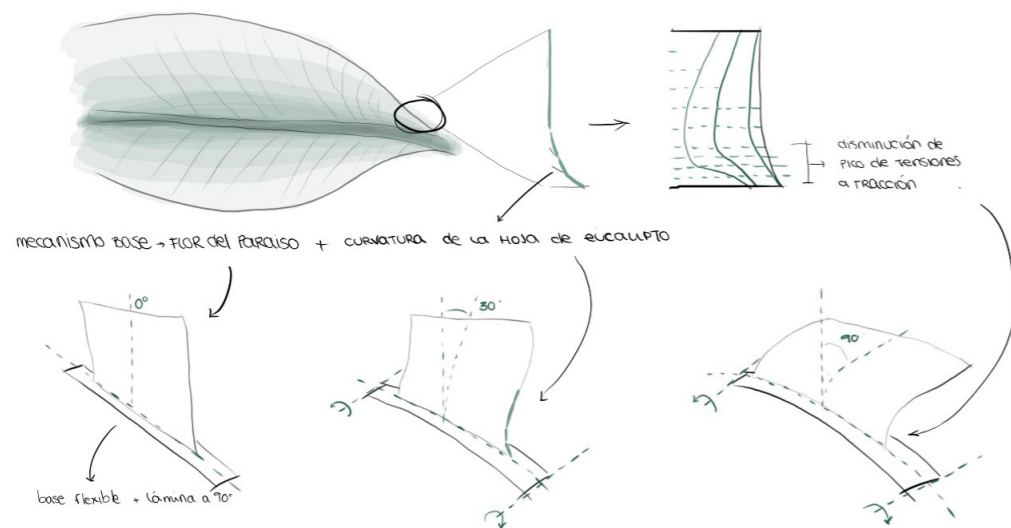


Ilustración 56. Mecanismo base del principio de deformación de Strelitzia Reginae y optimización del contorno por la geometría de la hoja de eucalipto. Elaboración propia.

Una vez aplicada, vieron como en esta parte gracias a la geometría de la hoja, podían lograr reducir los picos de tensión máxima entre un 60-90% según el tramo en el que se encontrasen. Pero aún con este problema resuelto, les faltaba otro, ya que estaba resuelto el contorno, se debían resolver las tracciones internas que generaba el movimiento de flexión.

Para ello contaron con la ayuda del mecanismo de la Aldrovanda Vesiculosa, que estudiaron poniendo especial interés en cómo esta tiene la capacidad de tener deformaciones reversibles, ya que al tratarse de una planta carnívora, esta reacciona ante el estímulo de su presa abriéndose y cerrándose para poder atraparla. Tras observarla detenidamente, llegaron a la conclusión de que la deformación de las diferentes fases, en las que la planta se abre y cierra, se debe principalmente a dos causas, a un sistema estructural de costillas, que permiten la absorción de los esfuerzos internos del movimiento, y la otra causa es que para que todo funcione de forma correcta, a esas costillas las envuelve una superficie que interactúa con el conjunto para lograr un movimiento homogéneo.

“Cada Aldrovanda de hojas termina en una pequeña trampa de almeja como de aproximadamente 5 mm de longitud. La trampa tiene dos regiones estructurales distintivas, una parte central en forma de lente y dos lóbulos en forma de hoz, llamada porción marginal. El central porción dispone de un nervio central rígido, que distribuye su impacto estructural lineal sobre la porción central. Ambas porciones son de rigidez desigual. Mientras que la parte central tiene tres capas de células, la porción marginal sólo tiene dos.

Un pliegue curvado y costilla, llamado recinto límite, enlaces ambas porciones juntos y actúa como bisagra viva. [...] El mecanismo de accionamiento de este movimiento de cierre es una cascada de deformación, a partir de una contracción repentina de la nervadura central que se dobla la parte central y por lo tanto provoca una flexión sucesiva de los lóbulos en forma de hoz adyacentes. Durante la etapa de estrechamiento posterior de los lóbulos tocar agotan el agua y cerrar herméticamente una sobre la otra, la captura de la presa en el espacio hueco dentro de la trampa.”⁶⁰

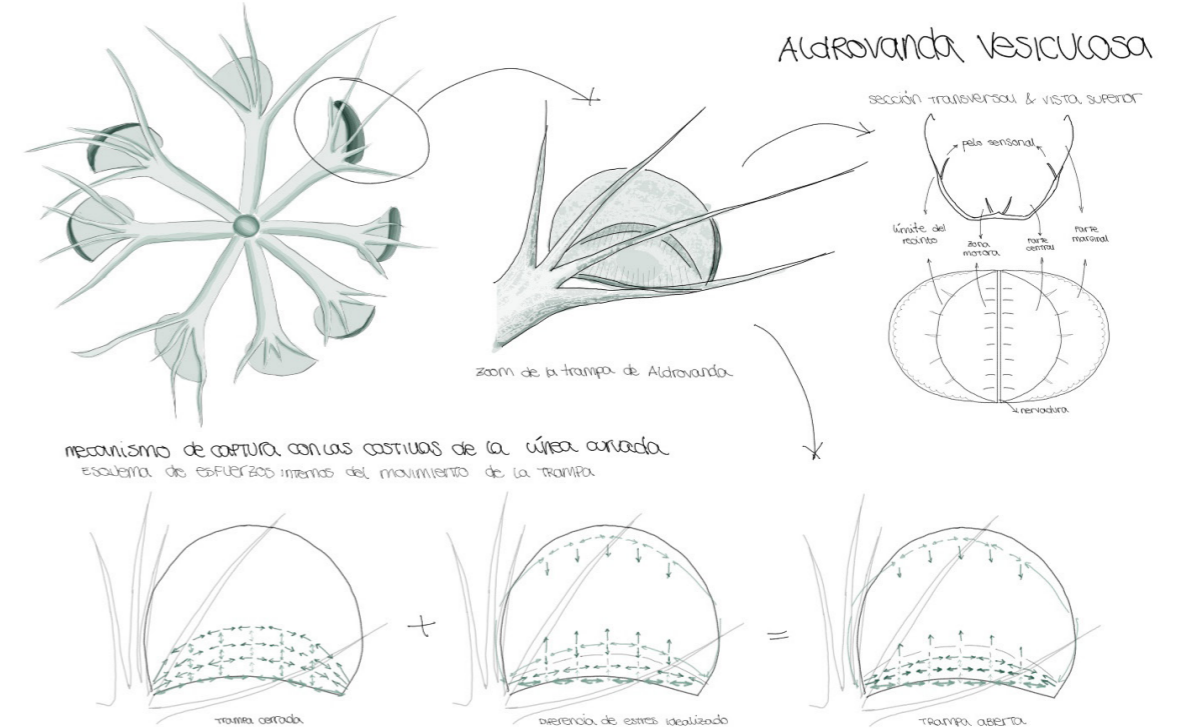


Ilustración 57. Trampa de lóbulos de la planta Aldrovanda Vesiculosa y su mecanismo de captura con las costillas de la línea curvada. Elaboración propia.

60 KNIPPERS, Jan, Julian Lienhard, Simon Poppinga, Simon Schleicher, Tom Masselter, Markus Milwich, Thomas Speck. Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature. *Bioinspiration & Biomimetics* [En línea] Alemania: IOP PUBLISHING. 2011. 6(4) [Consulta: 15 Abr. 2019]. doi:10.1088/1748-3182/6/4/045001. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/51839563_Flectofin_A_hingeless_flapping_mechanism_inspired_by_nature

Tras todo el estudio previo, me dispuse a reproducir este mecanismo para la asignatura de la estructura en el proyecto arquitectónico, al principio intenté reproducir los mecanismos estructurales anteriormente descritos, para eso probé con diversos materiales y finalmente como tela elegí una compuesta de 85.0% Poliéster y 15.0% Poliuretano. Para la estructura utilicé varillas roscadas de acero de 2,5mm y como eje central una barra de aluminio. Al no tener la posibilidad de soldar para las uniones usé una impresora 3D con materiales PLA y Poliuretano termoplástico (TPU), para tratar de conseguir una mayor flexibilidad.



Ilustración 58. Proceso de montaje de la maqueta. Elaboración propia.

No es aleatorio que describa los materiales ya que tras la realización de la maqueta en ellos aprendí una gran lección, puesto que no solo la perfección del montaje era fundamental para su movimiento, ya que aquí la compatibilidad geométrica era muy importante para el buen funcionamiento de la misma, si no que según la escala y los materiales empleados, el mecanismo es diferente. Hablamos en este caso en que la biomimética no es solo importante en sus procesos cinemáticos o de formas, sino que también es importante fijarse en los materiales que ella misma emplea, ya que no siempre se obtiene el resultado deseado.

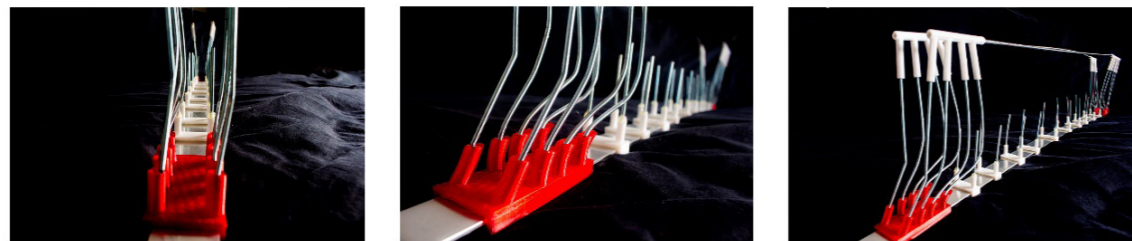


Ilustración 59. Detalle de la estructura y las uniones. Elaboración propia.

En el proyecto original, se tuvieron que desarrollar nuevos materiales que fuesen capaces de comportarse de manera similar a los de las plantas que estaban copiando, debido a que hasta ese momento no existían materiales que pudiesen soportar ese tipo de esfuerzos estructurales para conseguir el movimiento deseado.

De manera que en muchas ocasiones no es fácil copiar a la naturaleza ya que como le pasaba a Leonardo Da Vinci, podemos estudiarla y aprender de sus formas pero tendremos que esperar algún tiempo a que la tecnología sea capaz de poder imitar sus mecanismos para que sean realmente eficientes.

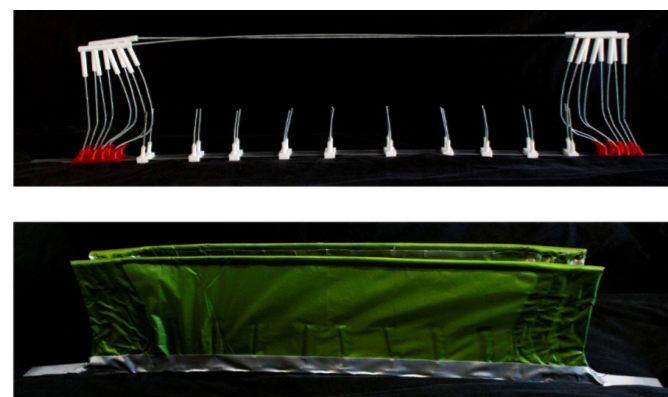


Ilustración 60. Modelo estructural y maqueta final. Elaboración propia.

S I L K P A V I L I O N
MEDIATED MATTER GROUP. MIT MEDIA LAB. 2013.



Ilustración 61. Pabellón de Seda [imagen digital]. Fuente de la imagen base: https://www.theepochtimes.com/3d_191560.html

Uno de los aspectos fundamentales de este pabellón es la exploración entre lo digital y lo biológico, llevado a la escala arquitectónica. Lo más característico de este pabellón, aunque pudiese parecer que es el hecho de que está fabricado con gusanos de seda va muchos más allá. Bajo mi punto de vista, me parece mucho más relevante la investigación previa que ha inducido a generarlo.

En esta investigación se realizó un estudio acerca del comportamiento de los gusanos de seda. Se trataron a estos insectos como sujetos capaces de la auto-organización de material en respuesta al entorno físico que los rodea.

Esto lo consiguieron metiendo a gusanos de seda con imanes en la cabeza en diferentes cajas dotadas con magnetómetros. Así durante el periodo de construcción de los capullos de seda pudieron registrar su movimiento en un espacio tridimensional. Con estos datos obtuvieron una representación visual de su comportamiento a través de una nube de puntos. Gracias a esta visualización se pudo analizar la organización y las diferentes variaciones de las propiedades del material de seda que los gusanos habían formado.

Tras ese primer análisis se realizó el mismo experimento cambiando la morfología del espacio donde se introducirían los gusanos de seda. Esto llevó a los investigadores a entender mejor la relación entre el gusano de seda y el entorno que les rodea.

Después estas investigaciones es cuando se generó el pabellón. Primero se construyó una subestructura mediante la fabricación digital. Con este fin se tejió una estructura compuesta de 26 paneles poligonales formados por seda con la ayuda de una máquina de control numérico computarizado. Esta máquina proporciona a la subestructura poder generar el pabellón a través de un hilo continuo. La densidad del material de hilo en cada una de las partes atiende a las restricciones ambientales de luz y calor obtenidos en los análisis previos de los gusanos.

Una vez creada la subestructura se colocaron unos 6500 gusanos de seda para reforzar la subestructura y actúa como piel del pabellón.

“La fibroína no tejida hilada con gusanos de seda se adhiere y envuelve alrededor de la seda depositada en forma diáfana fibras y proporciona un "relleno" fibroso debido a la interacción entre los dos agentes químicos depositados por el gusano de seda: la fibroína que actúa como fibra y la sericina que actúa como pegamento o tejido conectivo.”⁶¹

El resultado de este pabellón plantea un nuevo enfoque de construcción para aplicar dos sistemas complementarios a la hora de la fabricación. Las herramientas digitales trabajando con los sistemas biológicos para promover una colaboración entre estos dos mundos.

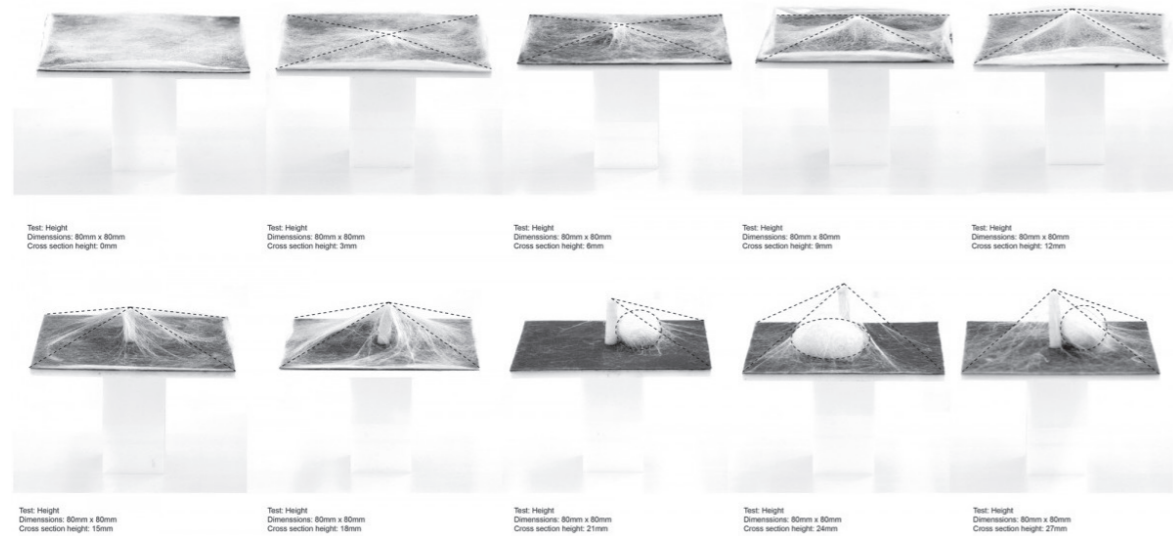


Ilustración 62. Galería del Pavellón de Seda [imagen digital]. Fuente de la imagen base: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-290166/pabellon-de-seda-mit-media-lab/51b0f8aeb3fc4b225b000237?next_project=no

61 OXMAN, Neri. Jared Laucks, Markus Kayser, Jorge Duro-Royo, Carlos Gonzales Uribe. *Silk Pavilion: a case study in fibre-based digital fabrication*. This publication is based on peer-reviewed papers, contributed to the FABRICATE conference 2014 at ETH Zurich. [En línea] Zurich: ETH Zurich, 2014 [Consulta: 22 Nov. 2019]. ISBN 978-3-85676-331-2 (Online) Disponible en: <https://neri.media.mit.edu/publications/article/silk-pavilion-a-case-study-in-fiber-based-digital-fabrication.html>

A la hora de diseñar un proyecto, por muy simple que sea, es interesante el reto que surge cuando intentamos aplicar la biomimética en él, aplicando los conocimientos de los diferentes niveles a la hora de proyectar.

Uno de mis proyectos más recientes relacionados con la biomimética, consistió en proyectar un stand teniendo en cuenta diferentes estrategias que utiliza la naturaleza. Para ello la primera regla que intento cumplir a la hora de diseñar es la ley del mínimo esfuerzo, es decir emplear el mínimo material para conseguir la forma más eficiente, buscando inspiración en las formas geométricas con la que obtener la mayor eficacia en su configuración.

Este stand está pensado para ser desmontable y estar ubicado en el exterior, y la primera idea que se me pasó por la cabeza era como encontrar protección solar de manera natural, entonces pensé en un árbol, y en como la configuración de estos los hacía idóneos para dar sombra pues ellos buscaban lo contrario, expandirse para captar la mayor luz posible.

Hasta este punto todo encajaba, pero llegó la parte del diseño, y el reto de como emular un árbol y sus complejas leyes, y como acercarlo al campo de la arquitectura y de un buen funcionamiento estructural. Para ello me basé principalmente en entender su geometría, mezclando varios de los conceptos explicados en el capítulo 2, y viendo como todos ellos tenían relación y conexión entre sí.

Principalmente aplique la relación entre la ley de Ludwig, el número phi, y el crecimiento fractal entre otras, para hacer la estructura más eficiente y para conseguir una mayor sombra con la menor cantidad de material.

Para el diseño estructural del stand, se hace un estudio de la estabilidad mecánica de los árboles y el efecto de la combinación de cargas estáticas y dinámicas que los hacen estables.

“La primera de estas relaciones se extrae directamente de los principios básicos de la teoría de la estabilidad elástica, y dice que la altura máxima, H_{max} , que un elemento estructural vertical (e.g. el tronco de un árbol) puede alcanzar antes de que pandee elásticamente bajo su propio peso depende del diámetro, d , y de la rigidez específica, E/ρ , de los materiales (tejidos) que lo componen.”¹¹

“Así, desde un punto de vista mecánico, la altura máxima a la que pueden crecer las plantas arborescentes se calcula mediante la ecuación de Euler-Greenhill. Esta ecuación afirma que la altura crítica de pandeo es proporcional a la rigidez específica del material de la planta (tejido) elevada a la potencia 1/3, i.e. $(E/\rho)^{1/3}$, y al diámetro del tallo elevado a la potencia de 2/3, i.e. $d^{2/3}$. Las especies de plantas progresivamente más altas emplean tejidos más rígidos y más ligeros como estrategia de refuerzo principal en sus tallos. Matemáticamente, la ecuación de Euler-Greenhill se expresa como:

$$H_{max} \propto C \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/3} d^{2/3}$$

Donde C es una constante de proporcionalidad, E es el módulo elástico de Young y ρ es la densidad del material.”¹¹

"La segunda relación importante para entender la estabilidad mecánica de las plantas terrestres está relacionada con las estructuras sometidas a cargas horizontales, como la presión de viento. Esta relación indica que para asegurar la estabilidad mecánica de un elemento estructural vertical, el momento de arrastre en la base del elemento (igual al producto entre la fuerza de arrastre, D, y la altura a que esta fuerza actúa, H) no puede exceder el momento gravitacional (igual al peso de la columna, W, por la distancia, r, entre su línea de acción y el punto de rotación ubicado a un lado del centro de la base del elemento)" 62

Teniendo como principios estas leyes estructurales para lograr una mayor estabilidad del stand, ahora las relacionamos con el número phi, ya que este es el número que encontramos en la naturaleza que de manera más eficiente nos relaciona el grosor entre el tallo y las derivaciones de sus ramas, con ello y las formulas anteriores, no solo conseguimos lograr una mayor estabilidad, si no también reducir la cantidad de material al mínimo para lograrlo.

Otra de las características que observamos en el crecimiento de los árboles es la relación que tienen con la ley de Ludwig que explica cómo crecen para obtener una mayor eficiencia energética y captación solar, y como además el patrón de crecimiento que siguen se trata de un crecimiento fractal, ya que las ramas de los árboles son copias parecidas del tronco, pero más pequeñas.

Para reproducir un fractal se aplica una proporción menor que 1 para obtener el siguiente nivel, y es aquí donde entra en juego el número phi, ya que al usar la proporción de crecimiento 1/phi observamos que las ramas no se llegan a tocar pero se abren el máximo posible.

Y es mediante el conjunto de todos estos datos con lo que se forma el diseño de la estructura del stand. El cual ayudados del programa informático Rhinoceros con su plugin Grasshopper podemos introducir todos estos parámetros para proceder al cálculo y diseño de la estructura.

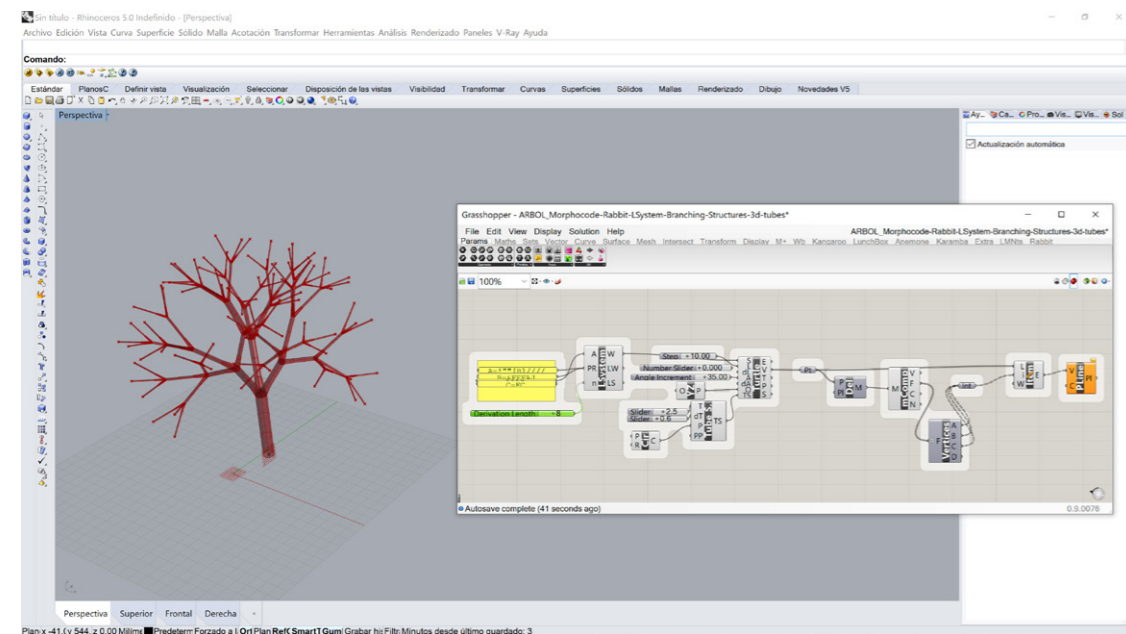


Ilustración 63. Captura de pantalla del proceso de diseño en Rhinoceros y Grasshopper. Elaboración propia.

Para la configuración del scrip de Grasshopper, ha sido necesaria la instalación del plugin Rabbit y partíamos de un scrip ya hecho en Morphocode (<https://morphocode.com/3d-branching-structures-with-rabbit/>) al que se le han cambiado algunos parámetros para adaptarse al estudio

62 VARGAS, Gustavo. Estrategias mecánicas de las plantas arborescentes: enseñanzas estructurales de los árboles. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. [En línea] Arica: Universidad de Tarapacá, 2017, 25(3), pp.510-523 [Consulta: 5 May. 2019]. ISSN 0718-3305. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000300510> . Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052017000300510

previamente descrito. Para ello también ha sido necesario el libro de LINDENMAYER, A. & PRUSINKIEWICZ P. "The Algorithmic Beauty of Plants" En el que se explica matemáticamente e informáticamente como programar el patrón de crecimiento de ciertas especies de árboles. Para el diseño de la parte que proporciona sombra, me he inspirado en el movimiento de apertura de las flores y en el funcionamiento de la cinemática de la flor del paraíso, la cual como vimos anteriormente se abría por flexión al ejercer una fuerza sobre ella. Estas flores estarán colocadas en la estructura siguiendo la ley de Ludwig, proporcionando así la mayor cantidad de sombra con el menor material posible, además de crear un juego de luces y sombras al igual que los que produce la copa de los árboles.

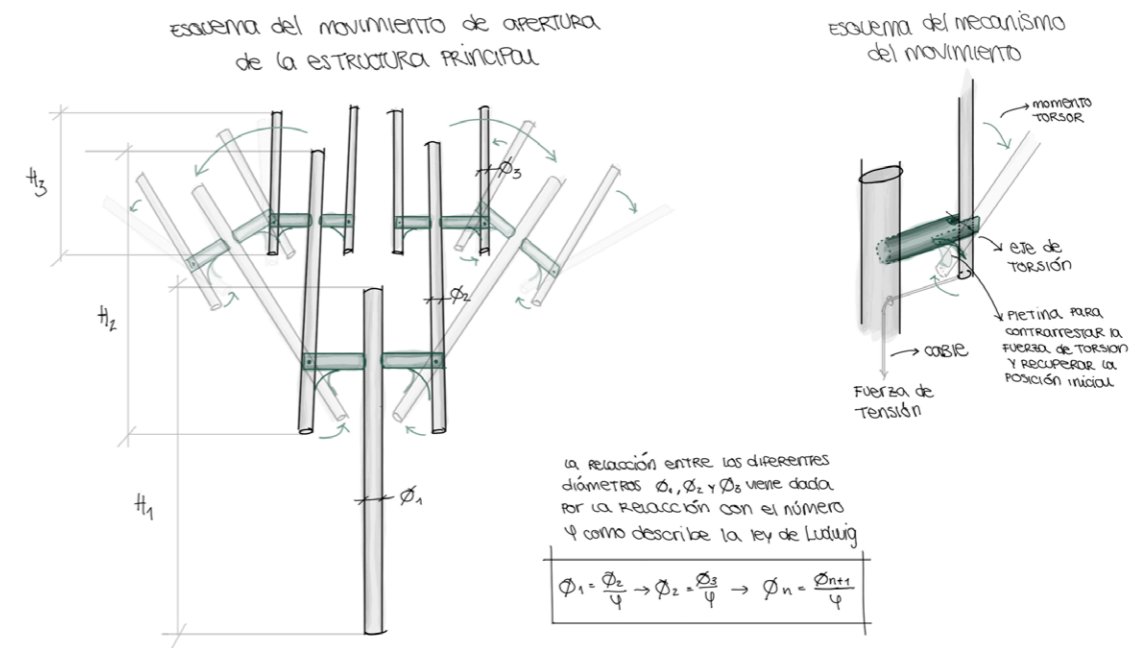


Ilustración 64. Esquema del movimiento y el mecanismo de la estructura principal del Flectotree. Elaboración propia.



Ilustración 65. Alzado y planta del stand Flectotree. Elaboración propia.

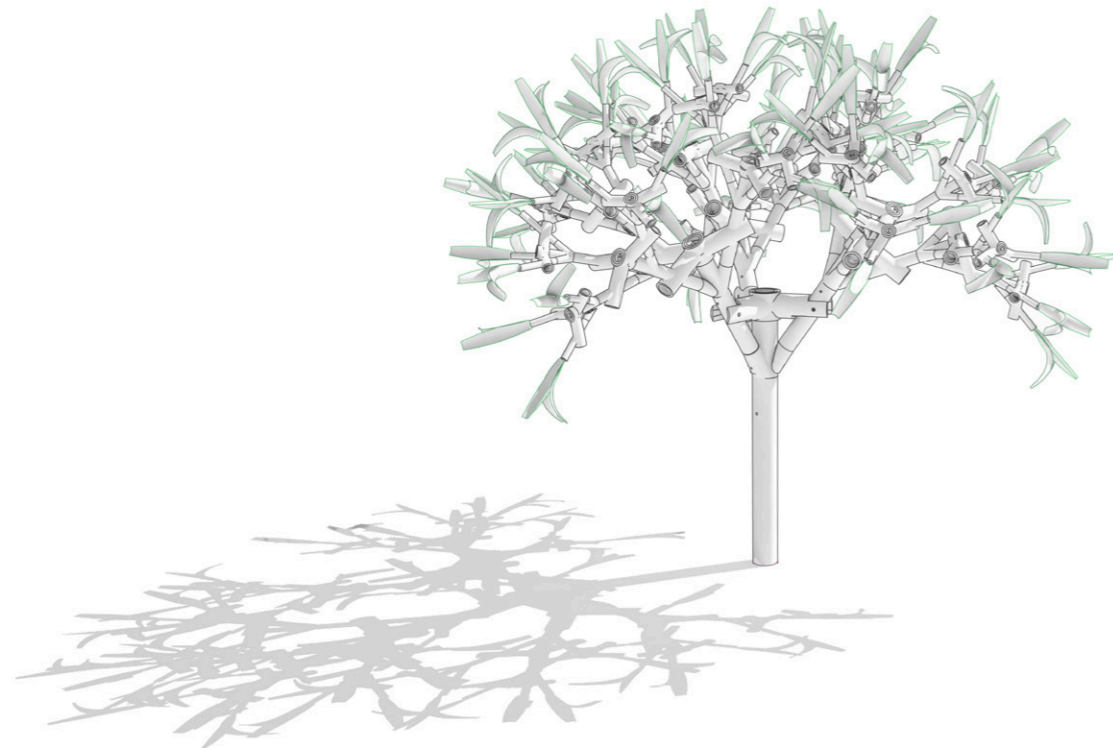


Ilustración 66. Perspectiva axonométrica del stand Flectotree. Elaboración propia.

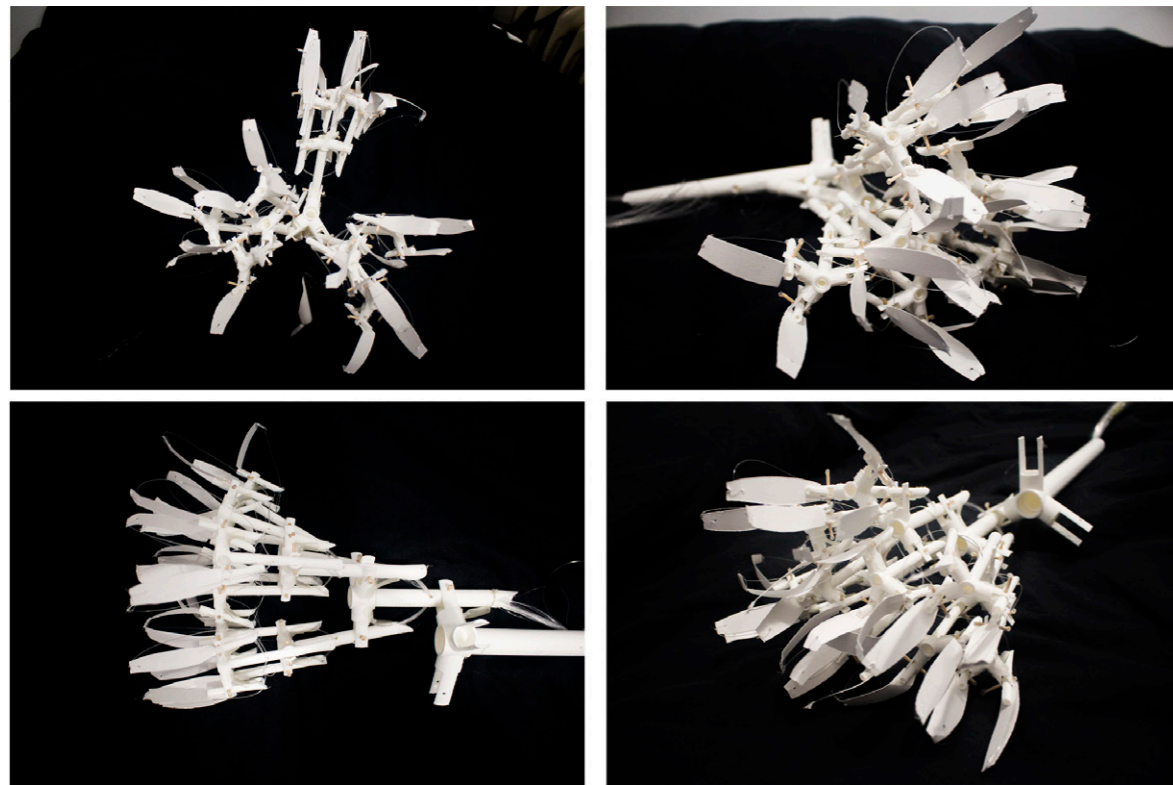


Ilustración 67. Fotografías de la maqueta de una parte de la estructura del Flectotree. Elaboración propia.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

La realización del trabajo me ha permitido reflexionar acerca de la biomímesis, abarcando diferentes puntos de vista y pudiendo así obtener un conocimiento desde una perspectiva más amplia acerca de todo lo que representa.

A pesar de que el término biomimética es un concepto que lleva poco tiempo entre nosotros, la cuestión de mimesis de la naturaleza relacionada con la arquitectura ha existido desde el principio de esta, no es una cuestión tan innovadora como pudiera parecer.

De esta manera, se puede entender la biomímesis como una manifestación más, dentro del procedimiento persistente de la historia, por hacer explícita la interacción entre naturaleza y arquitectura. Ya que, como se explica a lo largo del trabajo, nos remontamos a la Edad Antigua con los tratados de Vitruvio, para explicar las primeras aproximaciones que se tienen a la mimesis de la naturaleza, aunque eso sí, muy distantes de las que existen en la actualidad.

No fue hasta el Renacimiento, cuando comenzaron a vislumbrarse los primeros rasgos científicos de la naturaleza ligados al estudio de la mimesis, no obstante, no es hasta la Modernidad, donde podemos apreciar mayores similitudes con el término de biomímesis que conocemos en la actualidad, impulsado en su inicio con la ilustración y revolución científica, y pasando por el organicismo y la especialización en los diferentes campos de la ciencia, entre otros.

Sin embargo, nos damos cuenta como en la actualidad, esta especificidad en los campos de conocimiento pudiera llegar a ser un inconveniente a la hora de diseñar desde la biomímesis, ya que este enfoque exige interrelaciones complejas para obtener de él un buen diseño arquitectónico. No obstante, esto que puede parecer una desventaja, se puede convertir en una fortaleza, ya que múltiples disciplinas trabajando juntas en una misma dirección, desde un equipo interdisciplinar o multidisciplinar, llegan a soluciones aparentemente complejas si únicamente fuesen enfocadas desde una sola disciplina.

Estos resultados los podemos ver en las diferentes obras estudiadas, así como en el capítulo de Biogeometría y Morfogénesis, donde vemos como Wegensberg al igual que otros autores nombrados dentro del mismo, estudian las formas desde una aproximación de naturaleza, no siendo ellos expertos en biología como tal, y cómo tras analizar muchas de estas formas aparentemente inconexas con el mundo de la arquitectura, pueden aplicarse las leyes que la rigen a la hora de construir.

De igual modo, gracias a estudiar los diferentes proyectos acercándome desde diferentes niveles biológicos, y desde el entendimiento de las leyes naturales y su aplicación en el campo de la arquitectura, se puede observar cómo, a mayor nivel de complejidad, influyen más factores a la hora del diseño, y por tanto la obra en cuestión, es más eficiente desde el enfoque de la biomimética.

Como resultado de este análisis, se puede ver como la metodología de diseño de la biomimética nos presenta diferentes propuestas, que se adaptan en menor o mayor medida, a soluciones ecológicas y sostenibles de un modo más eficaz, ya que todas tratan de hacer un uso más eficiente de los materiales y los recursos energéticos en su construcción.

Aunque como en todos los campos, existen ciertas ventajas y desventajas, esto se debe a que la biomímesis sigue siendo una disciplina emergente, y le queda mucho camino de desarrollo. Quizás esto sucede porque actualmente existe un número reducido de obras que consigan abarcar el concepto a gran escala, quizás, al igual que le sucedía a Da Vinci, no tengamos aún los materiales y la tecnología suficiente para afrontar los proyectos de igual manera que la naturaleza lo hace.

No obstante, dada la necesidad que existe en la actualidad de que nuestros edificios cambien hacia un diseño más ecológico y sostenible, no podemos ignorar la relevancia de este enfoque bioinspirado para lograrlo, puesto que necesitamos que esta disciplina trabaje con la naturaleza, en lugar de enfrentarse a ella.

Durante el desarrollo del trabajo, he podido observar como mi percepción de la arquitectura y la manera de diseñar con ella, se han visto cada vez más influenciadas por la simbiosis que se genera entre lo orgánico y lo arquitectónico, advirtiendo que cuantas más cosas descubro de la biomimética, menos cosas sé, pero más quiero seguir investigando. Espero que cada futuro proyecto se convierta en una excusa para seguir profundizando o aprendiendo del vínculo que se establece entre naturaleza y arquitectura, y hacer de este enfoque bioinspirado un estilo propio a la hora de diseñar.

Me gustaría concluir con una cita de Nery Oxman, con el fin de inspirar los lectores de este trabajo como me inspiró a mí para seguir en este campo de investigación que es la biomimética:

“Aquí está una nueva era de diseño, una nueva era de la creación, que nos lleva de un diseño inspirado en la naturaleza a una naturaleza inspirada en el diseño, que exige de nosotros, por primera vez, que nos hagamos cargo de la naturaleza.”

BIBLIOGRAFÍA O FUENTES DE INFORMACIÓN

LIBROS

- HWANG, Irene. *Verb Natures*, ed.: Actar, Barcelona, 2006.
- PIOZ, Javier. *Arquitectura biónica Principios*. 1a. ed. Madrid: Munilla-Lería. 2018.

INFORMACIÓN DIGITAL.

LIBROS EN LÍNEA.

- BARAONA POHL, Ethel. *Watercube: The book*. [En línea]. Barcelona: dpr editorial, 2008 [Consulta: 9 Jul. 2019]. ISBN: 978-84-612-4419-5. Disponible en: https://issuu.com/ethel.baraona/docs/watercube_the_book
- GIMÉNEZ, Carlos, Marta Mirás, Julio Valentino. La analogía biológica desde la perspectiva de la teoría contemporánea. *Seminario de crítica nº 185, 2013*. Instituto de Arte Americano e Investigaciones Estéticas. [En línea] [Consulta: 12 Jun. 2019]. Disponible en: <http://www.iaa.fadu.uba.ar/publicaciones/critica/0185.pdf>
- LINDENMAYER, A. & PRUSINKIEWICZ P. *The Algorithmic Beauty of Plants*. [En línea] Estados Unidos: Springer-Verlag, pp. 1-50. [Consulta: 25 Abr. 2019]. ISBN-13: 978-0387972978. Disponible en: <http://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop-ch1.pdf>
- QUATREMÈRE DE QUINCY, Antoine. *Diccionario de arquitectura: voces teóricas. Serie textos teóricos. Director Jorge Sarquis*. [En línea] Buenos Aires, Argentina: Nobuko. 2007. [Consulta: 26 Dic. 2019] ISBN 978 987 584 119 2. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=xO6Es-FtXsMC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- SMITH, James Edward. *A grammar of botany, illustrative of artificial, as well as natural, classification with an explanation of Jussieu's system*. [En línea] Londres: Longman, 1821. [Consulta: 17 Mar. 2019]. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.31288> Disponible en: <https://www.biodiversitylibrary.org/page/23255819#page/9/mode/1up>
- T. ESTÉVEZ, Alberto. Del microscopio electrónico a la estrategia digital en arquitectura. *SiGraDi, XX Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 2016*. Escuela de Arquitectura y Diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana. En línea [Consulta: 16 Abr. 2019]. Disponible en: http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2016_530.pdf
- T. ESTÉVEZ, Alberto. Arquitecturas genéticas II: medios digitales y formas orgánicas. [En línea] Barcelona: ESARQ/SITESBooks, 2005, pp.18-54. [Consulta: 3 Mar. 2019]. ISBN: 0-930829-59-X Disponible en: http://www.albertoestevez.es/writing/escritos_almargen/escritos_almargen23.pdf

ARTÍCULOS DE REVISTA EN LÍNEA.

- ALVARADO CILLERO, Fernando. Relación del número fi con la naturaleza, la ciencia y la tecnología. *Temas para la educación*. [En línea] Sevilla: Federación de Enseñanza de C.C.OO. de Andalucía, 2010, 7(16) [Consulta: 23 Mar. 2019]. ISSN 1989-4023. Disponible en: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6962.pdf>
- CALATRAVA ESCOBAR, Juan A. Arquitectura y naturaleza. El mito de la cabaña primitiva en la teoría arquitectónica de la Ilustración. *Gazeta de Antropología* [en línea]. Granada: Universidad de Granada, 1991-06, 8(9) [Consulta: 18 Feb. 2019]. ISSN 0214 – 7564. Disponible en: http://www.ugr.es/~pwlac/G08_09JuanA_Calatrava_Escobar.html
- FRESNEDA, Carlos. 'Todas las respuestas están en la naturaleza'. *El Mundo* [En línea]. 2012. [Consulta: 25 Feb. 2019]. Disponible en: <https://www.elmundo.es/blogs/elmundo/ecoheroes/2012/01/25/todas-las-respuestas-están-en-la.html>
- J. ROSSIN, K. Biomimicry: nature's design process versus the designer's process. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. [En línea]. Reino Unido: CA Brebbia, Instituto de Tecnología de Wessex e Italia: A. CARPI, Universidad de Pisa, 2010, 138, pp. 559-570. [Consulta: 2 Dic. 2020] ISSN 1743-3541, doi: 10.2495/DN100501 Disponible en: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/DN10/DN10050FU1.pdf>
- NKANDU, Mwila Isabel, Halil Zafer Alibaba. Biomimicry as an Alternative Approach to Sustainability. *Architecture Research*. [En línea]. Chipre: Publicación científica y académica, 2018, 8(1), pp. 1-11. [Consulta: 27 Feb. 2019]. ISSN: 2168-5088. doi:10.5923/j.arch.20180801.01 Disponible en: <http://article.sapub.org/10.5923.j.arch.20180801.01.html>
- SCOBAY-THAL, Jake. Biomimetics: A Short History. *Foreignpolicy* [En línea] Washington, DC: FP Group, 2014. [Consulta: 24 Feb. 2019]. Disponible en: <https://foreignpolicy.com/2014/12/01/biomimetics-a-short-history/>

TESIS DOCTORALES, TRABAJOS FIN DE MASTER Y TRABAJOS DE FIN DE GRADO EN LÍNEA.

- GARCÍA CAMPOS, Tania. *Extracción y aplicaciones alimentarias de membranas de cáscaras de huevo*. [En línea] Manuel Rendueles, dir. Trabajo fin de Master. Universidad de Oviedo, 2015. [Consulta: 21 Abr. 2019]. Disponible en: http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/32400/3/TFM_TaniaGarciaCampos.pdf
- IDROVO G. Daniela. *Diseño interior contemporáneo con enfoque biomimético integral*. [En línea] Paul Ordoñez, dir. Trabajo fin de grado. Universidad de Azuay, 2017. [Consulta: 12 Jun. 2019]. Disponible en: <file:///D:/Universidad/Arquitectura/SEPTIMO/SEGUNDO%20CUATRIMESTRE/TFG/REFERENCIAS/13046.pdf>
- J. MAGLIC, Michael. *Biomimicry: Using nature as a model for design*. [En línea]. Kathleen Lugosch, dir. Tesis doctoral. University of Massachusetts Amherst, 2012. [Consulta: 7 Dic. 2019]. Disponible en: <https://www.mobt3ath.com/uplode/book/book-1044.pdf>
- MALLO ZURDO, María. *Sistemas radiolarios: geometrías y arquitecturas derivadas*. [En línea] María Jesús Muñoz Pardo, dir. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2015. [Consulta: 6 Oct. 2019] Disponiblen en: <http://oa.upm.es/39863/>
- SCHLEICHER, Simon. *Bio-inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design*. [En línea]. Jan Knippers, dir. Tesis doctoral. Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) at the University of Stuttgart, 2016. [Consulta: 15 Abr. 2019]. Disponible en: <https://d-nb.info/1088404367/34>
- TORRENS BERMEJO, Mercedes. *Selección de las formas matemáticas en la naturaleza y su emergencia en la arquitectura*. [En línea] Eduardo Azofra Agustín, Dir. Trabajo fin de Master. Universidad de Salamanca, 2013. [Consulta: 15 Sep. 2019]. Disponible en: https://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/125826/1/TFM_MercedesTorrens_Seleccionformasmatematicas.pdf

VIDEOS EN LÍNEA

- AAVV. *Fractals - Hunting the Hidden Dimension*. [En línea] Producida y dirigida por Michael Schwarz y Bill Jersey. 52 min. WGBH Educational Foundation and The Catticus Corporation. 2008. [Consulta: 7 Abril. 2019]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=KKAb_oxKcoU&t=714s
- Benoît Mandelbrot: Fractales y el arte de la fracturación [en línea]. 17 min. En: TED2010, Publicado en Febrero 2010. [Consulta: 9 Abril. 2019]. Disponible en: https://www.ted.com/talks/benoit_mandelbrot_fractals_the_art_of_roughness#t-5445
- Jan Knippers: IAAC Lecture Series 2014 [en línea]. 83 min. En: Youtube, IAAC, Publicado el 20 Noviembre 2014 [Consulta: 22 Feb. 2019]. Disponible en: <https://youtu.be/TGzwYfbrMQ8>
- Janine Benyus: Biomimicry in action [en línea]. 17 min. En: TEDGlobal 2009, Publicado en Julio 2009. [Consulta: 20 Feb. 2019]. Disponible en: https://www.ted.com/talks/janine_benyus_biomimicry_in_action#t-48761
- Michael Pawlyn: Using nature's genius in architecture [en línea]. 17 min. En: TEDSalon London 2010, Publicado en Noviembre 2010. [Consulta: 20 Feb. 2019]. Disponible en: https://www.ted.com/talks/michael_pawlyn_using_nature_s_genius_in_architecture/transcript?language=es

PARTES DE SITIOS WEB.

- AAVV. A desert food and energy plant inspired by beetle design. En: *Biomimicry and Remote sensing inventions*. [En línea]. 2009. [Consulta: 4 Ene. 2020]. Disponible en: <http://bio-sensinginventions.blogspot.com/2009/07/sahara-forest-project-defies-belief.html>
- AAVV. Aplicaciones Voronoi. En: *VoroWiki*. [En línea]. 2004. [Consulta: 15 Abr. 2019]. Disponible en: http://www.voronoi.com/wiki/index.php?title=Voronoi_Applications
- AAVV. Biomimicry Architecture #3. En: *Parametric House: Explore The Parametric World*. [En línea]. 2019. [Consulta: 4 Dic. 2020]. Disponible en: <https://parametric3d.com/biomimicry-architecture-3/>
- AAVV. Biomimicry: Nature as Design Inspiration. En: *Fenner & Esler*. [En línea]. 2017. [Fecha de consulta: 27 Feb. 2019]. Disponible en: <https://www.fenner-esler.com/blog/biomimicry-nature-as-design-inspiration/>
- AAVV. El Renacimiento y la Revolución Científica. En: *Filosofía.net*. [En línea]. 2009. [Consulta: 12 Mar. 2019]. Disponible en: http://www.filosofia.net/materiales/sofiafilia/hf/soff_mo_1.html
- AAVV. Estadio olímpico de Pekín. En: *Wikiarquitectura*. [En línea]. [Consulta: 9 Jul. 2019]. Disponible en: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/estadio-olimpico-de-pekín/>
- AAVV. Historia de la ilustración botánica. En: *Universidad de Costa Rica - Jardín Lankester*. [En línea]. 2016. [Consulta: 5 Ene. 2020]. Disponible en: <http://www.jbl.ucr.ac.cr/noticias/historia-de-la-ilustracion-botanica>
- AAVV. Janine Benyus Quotes. En: *Azquotes*. [En línea]. [Consulta: 3 Mar. 2019]. Disponible en: https://www.azquotes.com/author/22304-Janine_Benyus
- AAVV. Janine Benyus. En: *Biomimicry Institute*. [En línea]. [Consulta: 3 Mar. 2019]. Disponible en: <https://biomimicry.org/janine-benyus/>
- AAVV. La materia y la energía en los ecosistemas. En: *Quimicaweb*. [En línea]. [Consulta: 9 Dic. 2019]. Disponible en: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema12/
- AAVV. Sahara Forest Project. En: *saharaforestproject*. [En línea]. [Consulta: 4 Ene. 2020]. Disponible en: <https://www.saharaforestproject.com/>

- AAVV. Sistemas Materiales Emergentes. En: *Cargocollective*. [En línea]. 2014. [Consulta: 15 Abr. 2019]. Disponible en: <https://cargocollective.com/sme/INFORMACION>
- AAVV. Watercube. En: *Wikiarquitectura* [En línea]. [Consulta: 25 Nov. 2019]. Disponible en <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/water-cube/#water-cube-2>
- AskNature Team. Eastgate Centre: Passive and low-energy heating and cooling saves building costs. En: *Asknature*. [En línea]. 2016. [Consulta: 6 Dic. 2019]. Disponible en: <https://asknature.org/idea/eastgate-centre/>
- BOULLOSA, Nicolás. Biomimética: 10 diseños que imitan la naturaleza. En: *Faircompanies*. [En línea]. 2011. [Consulta: 10 Jun. 2019]. Disponible en: <https://faircompanies.com/articles/biomimetica-10-disenos-que-imitan-la-naturaleza/>
- Colaboradores de Wikipedia. Alexander Graham Bell En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 11 Mar. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Alexander_Graham_Bell
- Colaboradores de Wikipedia. Benoît Mandelbrot. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 6 May. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Beno%C3%A9t_Mandelbrot
- Colaboradores de Wikipedia. Código sobre el vuelo de los pájaros. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 13 Mar. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%B3dice_sobre_el_vuelo_de_los_p%C3%A1jaros
- Colaboradores de Wikipedia. Ernst Haeckel. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 18 Mar. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Ernst_Haeckel
- Colaboradores de Wikipedia. George Cayley. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 18 Mar. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/George_Cayley
- Colaboradores de Wikipedia. Kunstformen der Natur. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 18 Mar. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Kunstformen_der_Natur#cite_ref-2
- Colaboradores de Wikipedia. La choza primitiva. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 20 Feb. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/La_choza_primitiva
- Colaboradores de Wikipedia. Leonardo da Vinci. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 11 Mar. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci#Libros_de_notas
- Colaboradores de Wikipedia. Renacimiento. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 12 Mar. 2019]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Renacimiento>
- Colaboradores de Wikipedia. Revolución científica. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 20 Dic. 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Revoluci%C3%B3n_cient%C3%ADfica
- Colaboradores de Wikipedia. On Growth and Form. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 6 Ene. 2020]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/On_Growth_and_Form
- Colaboradores de Wikipedia. Venus' flower basket. En: Wikipedia, La enciclopedia libre. [En línea]. 2019. [Consulta: 5 Dic. 2019]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Venus%27_flower_basket
- ELAKHYA, N. Biomimicry – Better Ideas Inspired By Nature. En: *ecoideaz*. [En línea]. [Consulta: 26 Dic. 2019]. Disponible en: <https://www.ecoideaz.com/innovative-green-ideas/biomimicry-better-ideas-inspired-nature>
- HEJFELDT, Mathias. Case Study / The Water Cube / Digital Production. En: *Blogspot* [En línea]. 2015. [Consulta: 25 Nov. 2019]. Disponible en: <http://mathias-hoejfeldt-nielsen.blogspot.com/>
- HERNÁNDEZ CASO, Gregorio. El número de oro. En: *Agrega.juntadeandalucia*. [En línea]. 2002. [Consulta: 21 Mar. 2019]. Disponible en: http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/27012014/73/es-an_2014012712_9131608/ND0IAND-20080118-0003/naturaleza.html
- LÓPEZ, Brenda. Diseños arquitectónicos basados en plantas. En: *Prisma la vista* [En línea] [Consulta: 10 Abr. 2019]. Disponible en: <https://prismalavista.com/2018/03/10/disenos-arquitectonicos-basados-en-plantas/>

- LOUGUINA, Alëna. Bionics ≠ Biomimetics ≠ Biomimicry. En: *Biology to Design*. [En línea]. 2012. [Consulta: 19 Feb. 2019]. Disponible en: <https://biologytodesign.wordpress.com/2012/05/08/design-biology-linguistics/>
- MIDDLETON, Andy. Cardboard to Caviar. En: *TYF*. [En línea]. 2009. [Consulta: 2 Dic. 2020]. Disponible en: <https://www.tyf.com/blogs/news/cardboard-to-caviar>
- ORRÚ, Anna Maria. Sahara Forest Project. En: *annamariaorru*. [En línea]. [Consulta: 4 Ene. 2020]. Disponible en: <http://annamariaorru.com/Sahara-Forest-Project>
- OPPENHEIM, Leonora. Lessons in Biomimicry - Part 2 Natural Systems. En: *treehugger*. [En línea]. 2008. [Consulta: 2 Dic. 2020]. Disponible en: <https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/lessons-in-biomimicry-part-2-natural-systems.html>
- PARRA, Sergio. Obras de arte de la Naturaleza de Ernst Haeckel. En: *xatakaciencia* [En línea]. 2017. [Consulta: 25 Dic. 2019]. Disponible en: <https://www.xatakaciencia.com/biologia/obras-de-arte-de-la-naturaleza-de-ernst-haeckel>
- PÉREZ PORTO, Julián, María Merino. Definición de ecosistema. En: *Definicion.de*. [En línea]. 2012. [Consulta: 9 Dic. 2019]. Disponible en: <https://definicion.de/ecosistema/>
- PÉREZ SAN, Antonio. Curvas en la Naturaleza. En: *Matematicasentumundo*. [En línea] [Consulta: 23 Mar. 2019]. Disponible en: <http://matematicasentumundo.es/NATURALEZA/curvas%20naturaleza%20antonio%20perez.pdf>
- PRESAS, Juan Antonio. Nulla dies sine línea. En: *Juanantoniopresas*. [En línea]. 2017. [Consulta: 25 Dic. 2019]. Disponible en: <http://www.juanantoniopresas.com/blog/>
- SCOBAY-THAL, Jake. What is Biomimicry? En: *Environment and ecology* [En línea]. 2014. [Consulta: 24 Feb. 2019]. Disponible en: <http://environment-ecology.com/biomimicry-bioneers/367-what-is-biomimicry.html>
- SNAVES. Biomimetic Architecture: The Gherkin. En: *Steemit*. [En línea]. 2017. [Consulta: 5 Dic. 2019]. Disponible en: <https://steemit.com/architecture/@snaves/biomimetic-architecture-the-gherkin>

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

- **Ilustración 1.** DA VINCI, Leonardo. *Diseño para una máquina voladora*. [Imagen Digital]. 1488. [consulta: 5 Dic. 2019]. Disponible en: <http://www.drawingsofleonardo.org/> **21**
- **Ilustración 2.** BORELLI, Giovanni Alfonso. *De motu animalium*. [Imagen Digital]. 1680. Archivo jpeg. 1248x1528 px. Welcome Collection Gallery (2018-03-29) [consulta: 5 Dic. 2019]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Giovanni_Alfonso_Borelli%27s_De_motu_animalium_Welcome_L0022126.jpg **22**
- **Ilustración 3.** CAYLEY, George. *Studies on form and desing of a balloon*. [Imagen Digital]. 1829. Biomimetics in architecture. Petra Gruber. [consulta: 5 de Dic. 2019]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/khuongarch2703/kin-trc-phng-sinh-hc-57201580> **23**
- **Ilustración 4.** MONIER, Joseph. *Bocetos de las primeras macetas de hormigón y acero*. [Imagen Digital]. 1884. Aedas Homes. [consulta: 5 de Dic. 2019]. Disponible en: <https://www.aedashomes.com/blog/monier-hormigon-ar-mado-obra-nueva-canaveral-madrid/> **23**
- **Ilustración 5.** SCHWENDENER, Simon y LEITGEB, Hubert. *Imagen de las págs. 178 y 182 del libro "Beiträge zur wissenschaftlichen Botanik"* [imagen digital]. 1858. W. Engelmann. [consultado: 8 de Dic. 2019]. Disponible en: <https://archive.org/details/beitragzurwisse00leitgoog/page/n181> **24**
- **Ilustración 6.** HAECKEL, Ernst. *Pags. 211 y 236 del libro "Kunstformen der Natur"* [imagen digital]. 1899. [consultado: 8 de Dic. de 2019] Disponible en: http://www.biolib.de/haeckel/kunstformen/Haeckel_Kunstformen.pdf **24**
- **Ilustración 7.** HEINRICH FRANCÉ, Raoul. *Pags. 32-33 del libro "Die Pflanze als Erfinder"* [imagen digital]. 1920. [consultado: 10 de Dic. de 2019]. Disponible en: <https://archive.org/stream/diepflanzealsenf00fran/#page/32/mode/2up> **25**
- **Ilustración 8.** THOMPSON, D'Arcy. *Páginas 726-727 "On Growth and Form"* [imagen digital]. 1945. [consultado: 6 de Ene. de 2020] Disponible en: <https://archive.org/details/ongrowthform00thom/page/726> **26**
- **Ilustración 9.** *Funcionamiento de los materiales y la estructura que forman el huevo. Elaboración propia* **30**
- **Ilustración 10.** *Ejemplos de la espiral de Fibonacci en la naturaleza. Sección del Nautilus y semillas de girasol. Elaboración propia.* **32**
- **Ilustración 11.** *Relación entre la proporción aurea y la espiral de Fibonacci gráfica y matemática. Elaboración propia.* **33**
- **Ilustración 12.** *Esquema de la Ley de Ludwig en relación al número Phi. Elaboración propia.* **34**
- **Ilustración 13.** *Relación entre la hélice y la espiral con la cornamenta del ciervo. Elaboración propia.* **35**
- **Ilustración 14.** *El uso de la catenaria en la construcción de un panal de abejas. Elaboración propia.* **36**
- **Ilustración 15.** *El uso del hexágono en la construcción de un panal de abejas. Elaboración propia.* **37**
- **Ilustración 16.** *Representación del conjunto de Mandelbrot y la autosimilitud. Aunque Mandelbrot fue el primero que descubrió y puso nombre a los fractales, muchas de sus inspiraciones para desarrollarlo provenían de los llamados monstruos matemáticos que proceden de la matemática clásica. Elaboración propia.* **38**
- **Ilustración 17.** *Representación gráfica de las curvas de Peano, curva de Hilbert y curva de Koch. [imagen digital]* Fuente de la imagen base: <http://laaventuradelaciencia.blogspot.com/2013/09/fractales-los-colores-del-infinito.html> **39**

- **Ilustración 18.** Representación gráfica del triángulo de Spierpinski, alfombra de Sierpinski y esponja de Menger. [imagen digital] Fuente de la imagen base: http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/geometria_fractal/proyectos/movimiento_browniano/sierpinski.htm 40
- **Ilustración 19.** MANDELROT, Benoit. Representación gráfica del conjunto de Julia. Archivo jpeg. 800 x 450 px. Orden in Chaos 2013. [consulta: 10 de Ene de 2020] Disponible en: <https://orderinchaos.wordpress.com/tag/julia-set/> 40
- **Ilustración 20.** El hombre de Vitruvio de Leonardo da Vinci. Elaboración propia. 44
- **Ilustración 21.** Capitel corintio según Vitrubio. Elaboración propia. 45
- **Ilustración 22.** Cabaña primitiva de Viollet-le-Duc. Elaboración propia. 46
- **Ilustración 23.** Patrón de crecimiento de los árboles y bóveda central de la catedral de Salamanca. Elaboración propia. 47
- **Ilustración 24.** Comparación entre el crecimiento de los árboles y la estructura gótica de la catedral de Salamanca. Elaboración propia. 48
- **Ilustración 25.** El hombre como medida en la arquitectura. Elaboración propia. 49
- **Ilustración 26.** PERRAULT, Claude. Dibujo en alzado de Claude Perrault de la fachada este de la Cour Carrée del Louvre con secciones de las alas norte (izquierda) y sur (derecha) [imagen digital]. 1676. Escaneo del trabajo original: Berger, Robert W. (1993). El Palacio del Sol: el Louvre de Louis XIV. University Park: The Pennsylvania State University Press [Consulta: 25 Dic. 2019]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Claude_Perrault_elevation_of_the_east_facade_of_the_Cour_Carr%C3%A9e_of_the_Louvre_%E2%80%93_Berger_1993_figure_113.jpg 52
- **Ilustración 27.** Reproducción de la maqueta funicular de la iglesia de la Colonia Güell usada por Gaudí expuesta en el Museo del Templo de la Sagrada Familia. 2016. Imagen propia. 55
- **Ilustración 28.** LLOYD WRIGHT, Frank Casa de la cascada, de Frank Lloyd Wright. [Imagen digital] 1937. Richard Power Pensilvania. 2016. [Consulta: 2 Enero 2020] Disponible en: <https://losojosdehipatia.com.es/cultura/arte-2/la-casa-de-la-cascada-de-frank-lloyd-wright/> 56
- **Ilustración 29.** OTTO, Frei. Experimentación de formas con películas de Jabón. [Imagen digital] 1937. [Consulta: 2 Enero 2020] Disponible en: <https://medium.com/designscience/1964-2b6618ff93e7> 57
- **Ilustración 30.** KOZLOWSKI, Paul. Fotografía aérea de Esplanade – Theatres on the Bay, Singapur. [Imagen Digital]. 2004. [consulta: 20 Dic. 2019]. Disponible en: <https://structurae.net/de/fotos/17036-esplanade-theatres-on-the-bay-singapur> 63
- **Ilustración 31.** Dibujo de la fruta de durián. Elaboración propia 63
- **Ilustración 32.** Estadio del Nido del Pájaro [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://notesfromcamelid-country.net/2014/06/21/an-olympic-legacy-full-of-light-and-life/img_9297/ 64
- **Ilustración 33.** Imagen comparativa entre el Estadio Nacional de Beijing y el nido de pájaro. Elaboración propia. 65
- **Ilustración 34.** Water Cube, Centro Acuático Nacional de Beijing. [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://www.artnews.com/art-in-america/features/emoji-in-light-on-the-beijing-water-cube-59406/> 66
- **Ilustración 35.** Explicación estructural de Water Cube, las pompas de jabón y la estructura de Weaire-Phelan. Elaboración propia. 67
- **Ilustración 36.** CHHATRE, Shreerang. Malla que se está probando para su uso en dispositivos de recolección de niebla [imagen digital]. 2011. Patrick Gillooly. [consultado: 3 de Dic. de 2019] Disponible en: <http://news.mit.edu/2011/fog-harvesting-0421> 68

- **Ilustración 37.** Recolección de agua del escarabajo de Namibia. Elaboración propia. 68
- **Ilustración 38.** Estructuras Elytra. A) *Onymacris unguicularis*, B) *Onymacris laeviceps*, C) *Stenocara gracilipes* y D) *Physasteria cribripes*. A1-D1) Imágenes de foco de profundidad extendida de ejemplos de animales experimentales obtenidos con un microscopio de disección. Barra de escala = 5 mm. A2-D2) Imágenes de microscopio electrónico de barrido del ápice del elitro. Barra de escala = 1 mm. [imagen digital]. 2010. [consulta: 3 Dic. 2019] Disponible en: <https://frontiersinzoology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1742-9994-7-23> 69
- **Ilustración 39.** Flores de Loto con sus hojas. Elaboración propia. 70
- **Ilustración 40.** Vista al microscopio de la superficie de una hoja de flor de Loto con una gota de agua. [Imagen digital]. 2011. [consulta: 3 Dic. 2019] Disponible en: <https://faircompanies.com/articles/biomimetica-10-dise-nos-que-imitan-la-naturaleza/> 71
- **Ilustración 41.** Collage de imágenes de la Torre Swiss y la esponja canasta de Flores de Venus, para mostrar las similitudes que existen entre ellas. Elaboración propia. 73
- **Ilustración 42.** Vista panorámica del Eden Project. [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eden_Project_geodesic_domes_panorama.jpg 74
- **Ilustración 43.** Composición formada por: Pompas jabón Frei Otto Otto [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://pt.slideshare.net/quest2515e/unab2-frei-otto-natura>. Vista en microscopio de un grano de polen [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://esacademic.com/pictures/eswiki/73/Ipomoea_purpurea_pollen.jpg. Vista en microscopio de una radiolaria [imagen digital] Fuente de la imagen base: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Radiolaria-sp2_hq.jpg 74
- **Ilustración 44.** GRIMSHAW, Nicholas. Eden Project Plans [imagen digital]. 1996. Urban Haptics. [consulta: 22 de Dic. 2019] Disponible en: <https://www.pinterest.co.uk/pin/44930450030705927/> 75
- **Ilustración 45.** Complejo comercial y de oficinas Eastgate Center, Harare, Zimbabue. [imagen digital]. Fuente de la imagen base: <https://www.livingspaces.net/ls-tv/watch-how-the-eastgate-center-in-zimbabwe-cools-itself-without-air-conditioning/> 76
- **Ilustración 46.** Partes y refrigeración de un termitero. Elaboración propia. 77
- **Ilustración 47.** Esquema de la ventilación natural del edificio. [imagen digital]. Fuente de la imagen base: https://www.wikiwand.com/en/Eastgate_Centre,_Harare. 77
- **Ilustración 48.** Render del proyecto Qatar Sprouts. [imagen digital]. Fuente de la imagen base: <https://inhabitat.com/> 78
- **Ilustración 49.** Funcionamiento del cactus. Elaboración propia. 79
- **Ilustración 50.** Esquema de funcionamiento del proyecto Cardbaud to Caviar. Elaboración propia. 81
- **Ilustración 51.** Acuarela de la representación temprana de la ciudad de Lavasa. [imagen digital] Fuente base de la imagen: <https://harvardmagazine.com/2009/09/architecture-imitates-life> 82
- **Ilustración 52.** The Sahara Forest Project. [imagen digital] Fuente base de la imagen: <https://www.saharaforest-project.com/> 84
- **Ilustración 53.** The Saltwater Infrastructure [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://www.saharaforest-project.com/> 85
- **Ilustración 54.** Prototipo de Flectofin® [imagen digital] Fuente de la imagen base: <https://d-nb.info/1055944583/3487>
- **Ilustración 55.** Cinemática de la flor y sección de la percha en posición cerrada y abierta. Elaboración propia. 88

- **Ilustración 56.** Mecanismo base del principio de deformación de *Strelitzia Reginae* y optimización del contorno por la geometría de la hoja de eucalipto. Elaboración propia. 88
- **Ilustración 57.** Trampa de lóbulos de la planta *Aldrovanda Vesiculosa* y su mecanismo de captura con las costillas de laínea curvada. Elaboración propia. 89
- **Ilustración 58.** Proceso de montaje de la maqueta. Elaboración propia. 90
- **Ilustración 59.** Detalle de la estructura y las uniones. Elaboración propia. 90
- **Ilustración 60.** Modelo estructural y maqueta final. Elaboración propia. 90
- **Ilustración 61.** Pabellón de Seda [imagen digital]. Fuente de la imagen base: https://www.theepochtimes.com/3d_191560.html 91
- **Ilustración 62.** Galería del Pavellón de Seda [imagen digital]. Fuente de la imagen base: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-290166/pabellon-de-seda-mit-media-lab/51b0f8aeb3fc4b225b000237?next_project=no 92
- **Ilustración 63.** Captura de pantalla del proceso de diseño en *Rhinoceros* y *Grasshopper*. Elaboración propia. 94
- **Ilustración 64.** Esquema del movimiento y el mecanismo de la estructura principal del *Flectotree*. Elaboración propia. 95
- **Ilustración 65.** Alzado y planta del stand *Flectotree*. Elaboración propia. 95
- **Ilustración 66.** Perspectiva axonométrica del stand *Flectotree*. Elaboración propia. 96
- **Ilustración 67.** Fotografías de la maqueta de una parte de la estructura del *Flectotree*. Elaboración propia. 96