

**Universidad Politécnica de Catalunya  
Departamento de Construcciones Arquitectónicas I**

**Master Oficial en Tecnología de la Arquitectura  
Construcción e Innovación Tecnológica**

## **ARQUITECTURA Y BIOMIMESIS**

**Caso de estudio: análisis del tejido del  
cactus para modelos arquitectónicos  
inspirados en la naturaleza.**

**arch. Ludovica Rossi**

**Tutor: prof. Fernando Juan Ramos Galino**

**Barcelona 02 de septiembre 2009**

Universidad Politécnica de Catalunya  
Departamento de Construcciones Arquitectónicas I

Master Oficial en Tecnología de la Arquitectura  
Construcción e Innovación Tecnológica

## ARQUITECTURA Y BIOMIMESIS

Caso de estudio: análisis del tejido del cactus para  
modelos arquitectónicos inspirados en la naturaleza.

arch. Ludovica Rossi

Tutor: prof. Fernando Juan Ramos Galino

<http://mastersuniversitaris.upc.edu/tecnologiaarquitectura/>

mail: ludovica.ro@gmail.com

Barcelona 02 de septiembre 2009

máster universitario

TECNOLOGIA EN LA ARQUITECTURA



Departamento de  
Construcciones  
Arquitectónicas I

Departamento de  
Estructuras en  
la Arquitectura

Departamento de  
Ingeniería de  
la Construcción

## **Agradecimientos**

*A los profesores de la UPC Joan Lluís Zamora, Josep Ignasi Llorens, Ramon Sastre y Fernando Ramos, y al investigador del CNR-ISAFOM Giorgio Matteucci por sus aportes en este trabajo. A mi familia Teresa, Piero, Alejandro y Teo por compartir mis intereses. A mis amigos y compañeros por el soporte y diálogo permanente.*



# Índice

<b>Introducción</b>	<b>7</b>
<b>1. Arquitecturas inspiradas en la naturaleza</b>	<b>11</b>
1.a La naturaleza como fuente de inspiración.	11
1b Siglo XX: Biotécnica, Biomecánica, Biónica y...	12
1.c Ejemplos de biomimetismo: estado del arte.	16
A. <i>Productos y sistemas.</i>	
B. <i>Ejemplos construidos.</i>	
C. <i>Materiales.</i>	
D. <i>Modelos construidos y virtuales</i>	
<b>2. Ejemplos en la naturaleza</b>	<b>39</b>
2.a Una percepción del tiempo.	39
2.b Evolución y selección natural.	41
2.c El tamaño.	43
2.d Estructuras en la naturaleza.	45
<b>3. Las plantas suculentas</b>	<b>51</b>
3.a Taxonomía y evolución de las plantas.	51
3.b La familia de las cactáceas.	57
3.c Evolución de las cactáceas.	58
3.d Caracteres morfológicos de los cactus con tallo suculento.	60
3.e Fisiología de los cactus con tallo suculento.	63
3.f Estructura y crecimiento de los cactus con tallos suculentos.	65
<b>4. Reproducción de la estructura del cactus: los modelos</b>	<b>71</b>
4.a Marco de investigación.	71
4.b La madera de cactus seco.	73
4.c Los modelos.	78
I Fase: <i>primera interpretación (febrero/abril 2010)</i>	
II Fase: <i>intuitiva (abril/mayo 2010)</i>	
III Fase: <i>definición de los elementos base (abril/mayo 2010)</i>	
IV Fase: <i>reiteración en el plano y forma cilíndrica (mayo/junio 2010)</i>	
V Fase: <i>modelos virtuales (junio/julio 2010)</i>	
VI Fase: <i>modelos físicos y virtuales (mayo/julio 2010)</i>	
4.d Relación entre el cactus y los modelos: escenarios.	88
<b>Conclusiones</b>	<b>91</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>93</b>



## Introducción

El presente trabajo apunta a investigar la metodología de análisis sobre procesos arquitectónicos inspirados en la naturaleza. Hay múltiples ejemplos de una arquitectura basada en la observación de la naturaleza desde niveles más formales, hasta la búsqueda de la aplicación de principios y mecanismos naturales.

Además este trabajo final de máster tiene la aspiración de seguir desarrollando la misma temática en el marco de una tesis doctoral. Por lo cual el objetivo del trabajo es generar una base teórica y científica, referente a los modelos naturales y a los antecedentes arquitectónicos, que permita desarrollar experimentos prácticos por medio de modelos físicos y virtuales.

La interpretación de observar la naturaleza como fuente para resolver problemas humanos toma en la actualidad el término de biomimetismo (de bio, vida; y mimesis, imitar). A pensar que el nombre de Biomímesis es de uso relativamente reciente, el área científica relacionada encuentra sus orígenes formales al comienzo del siglo XX. Su objetivo es estudiar el mundo natural para resolver problemas de la esfera humana, y su campo de aplicación se extiende a diferentes áreas entre las cuales se encuentra la arquitectura.

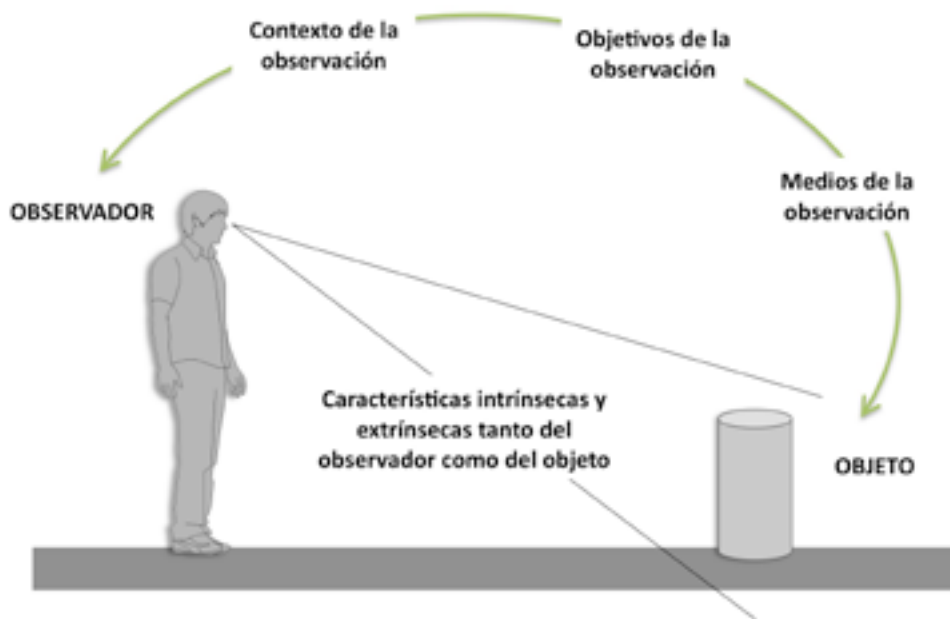
Cuando observamos un objeto construido o un prototipo que se inspira en un organismo se observa la pérdida de una referencia directa del mundo natural por el normal proceso de descontextualización que conlleva. Por eso este trabajo se orienta a la aplicación de una metodología que investiga el proceso de análisis referente al biomimetismo.

El método de estudio se ha desarrollado buscando ejemplos y referentes del ámbito de la arquitectura que se inspira en principios y mecanismos de la naturaleza. En paralelo se investigan los conceptos bases que sustentan y motivan la observación de los organismos vivos en la arquitectura; como los principios de economía y optimización en el uso de material y/o energía, y los mecanismos y sistemas de agregación que pueden crecer y/o decrecer en el tiempo, para así contribuir a una arquitectura no sólo respetuosa del medioambiente sino integrada con el mismo.

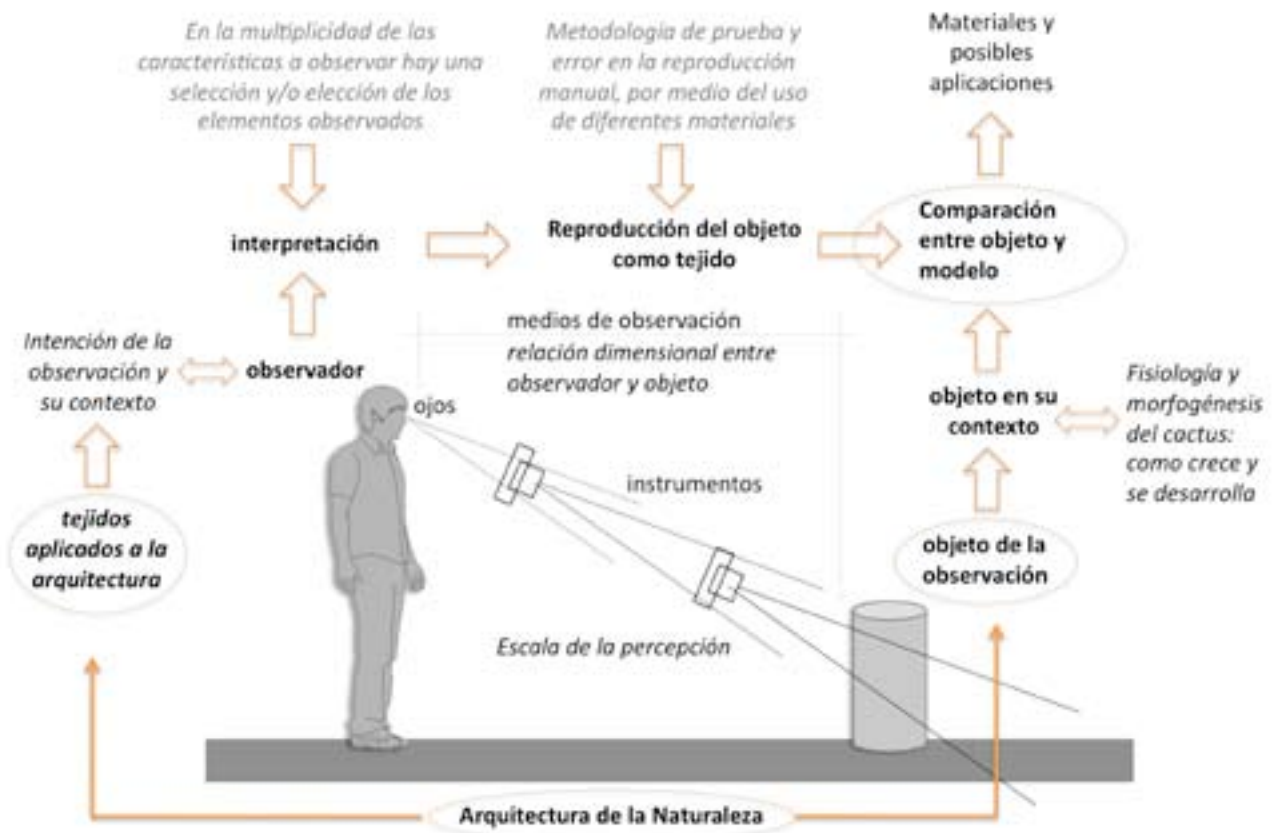
Por otra parte el análisis metodológico sería incompleto sin el estudio y la aplicación de un ejemplo natural específico por medio de la construcción de modelos físicos y virtuales a pequeña escala. Por lo cual se ha limitado el campo de estudio al tejido de la madera de cactus seco como referente de la naturaleza.

Las cactáceas son plantas que contienen en su interior gran cantidad de agua almacenada, y una vez secas (o sea cuando han perdido sus funciones vitales) es posible ver, también a «ojo desnudo», las fibras onduladas que caracterizan sus tejidos resistentes. Mirando en detalle la estructura del esqueleto del cactus se observa la *«cáscara cilíndrica perforada, formada con una estructura fibrosa de reducido peso propio. Con un mínimo de peso se consigue un máximo de resistencia al pandeo»* (Conrad Rolando, 1973).

El marco general en el cual el trabajo se sitúa es parte de la necesidad actual de respetar el



**Fig. 1** Esquema que muestra como en la observación del objeto intervienen diferentes factores que afectan los resultados finales. Estos son tanto externos como internos al proceso de observación.



**Fig. 2** Esquema de la metodología de análisis desarrollada en este estudio, donde se ha escogido como referente natural el tejido de cactus seco.



medio ambiente con un enfoque que prioriza la naturaleza. Eso genera incertidumbre debido a la gran amplitud del área temática escogida y por eso se ha decidido enfocar el trabajo a un tejido natural en particular. De esta forma se limita el ámbito de los experimentos a un caso específico y al mismo tiempo es posible buscar reglas a una escala más general que puedan ampliarse también a otros ejemplos naturales.

En el desarrollo de los cuatros capítulos propuestos en el presente trabajo se definen diferentes fases de estudio que resultan ser unas más teóricas y otras con un enfoque más práctico.

En el primer capítulo se desarrolla un breve análisis histórico de los conceptos y principios de la naturaleza aplicados a la arquitectura. Y un estado del arte referido a productos, materiales, ejemplos construidos y modelos de los últimos 20 años que nos muestran la gran variedad de aplicaciones. Se observa que el campo de trabajo resulta heterogéneo, con múltiples puntos de partidas, diferentes aplicaciones e interpretaciones.

En el segundo se investigan los conceptos bases del biomimetismo: la diferencia de la escala temporal entre la edad de la tierra y desarrollo de la cultura humana; el concepto de evolución y selección natural como procesos que han determinado el diseño de los seres vivos; la temática del tamaño tanto desde la mirada del crecimiento que debe garantizar la continuidad de las funciones vitales en cualquier organismo, como el cambio de escala entre el organismo observado y su ampliación en otros contextos. Además se ofrecen unos ejemplos de las estructuras presentes en el mundo natural para mostrar la gran variedad del punto de partida.

Como se ha dicho anteriormente, para investigar la metodología de análisis de la biomímesis, se propone en el capítulo 3 un estudio de las cactáceas como referente natural escogido para este trabajo. Se observa la planta viva, en lo posible en su medio natural. El objetivo no es usar la madera de cactus como material de construcción ya que no parece ser una respuesta adecuada a las necesidades actuales, simplemente porque es una planta que demora muchos años en crecer. Sino, estudiar los mecanismos propios de la planta como la morfología de sus tejidos, su fisiología, su crecimiento, etc.

El cuarto capítulo, con un carácter más práctico, muestra la evolución de diferentes experimentos inspirados en el tejido del cactus seco. Los modelos propuestos, tanto físicos como virtuales, se orientan a configuraciones estructurales en el espacio sin una función específica, para observar los equilibrios de los esfuerzos internos generados. Esta elección pone en segundo lugar el rol de la función en la arquitectura (tipologías y/o usos) porque muchas veces una configuración espacial surge de la necesidad de uso y no de los equilibrios de esfuerzos que caracterizan el material usado para la construcción de la misma.

La investigación apunta a liberar la forma de la función y se caracteriza por la voluntad de definir el marco de la investigación y no el objetivo último del trabajo. Esto para responder a la idea/imaginario de descubrir lo desconocido siguiendo el ejemplo del arquitecto Frei Otto, uno de los padres de este modelo de investigación.

El campo de investigación propuesto es indudablemente muy amplio. Cada capítulo se ofrece como una puerta abierta a vastos ámbitos de estudios e investigación. En su conjunto el trabajo apunta a individuar las relaciones existentes entre la observación de la naturaleza y el objeto arquitectónico construido. En un marco de investigación que hace referencia a la reproducibilidad material y física de modelos naturales, es decir a una construcción basada en ellos.



## **1. Arquitecturas inspiradas en la naturaleza.**

En este capítulo se ha desarrollado un breve análisis histórico sobre la observación de la naturaleza en la vida humana y de las disciplinas científicas relacionadas. Además de un estado del arte en el campo de la arquitectura con ejemplos construidos, materiales y modelos (físicos y virtuales) de los últimos años inspirados en los principios y mecanismos naturales.

### **1.a La naturaleza como fuente de inspiración.**

Cuando salimos al mundo natural, caminando por la naturaleza, observamos una gran variedad de formas, colores, materiales, etc. Por eso no sorprende que desde la antigüedad el hombre haya podido utilizar el gran laboratorio de la naturaleza como fuente de inspiración.

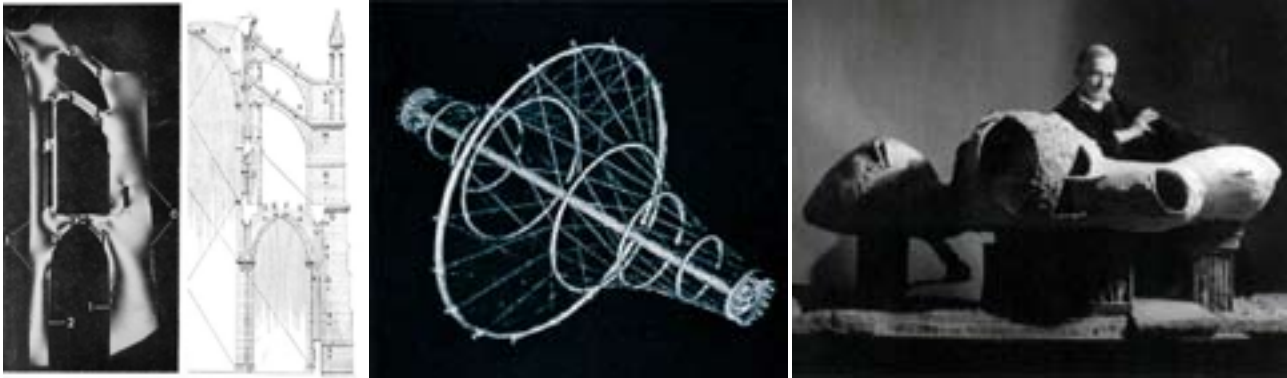
Gracias a la capacidad de observación y de análisis, el hombre ha generado diferentes mecanismos y/o maquinarias para mejorar sus hábitats y sus condiciones de vida. Distinguiendo las fases de observación, aprendizaje y diseño, el ser humano por medio de un proceso de prueba y error ha ido acumulando experiencia.

El mundo en el cual vivimos no deriva únicamente de la observación de la naturaleza, pero sí hay muchos mecanismos que tienen su origen en la observación de mecanismos naturales. Un ejemplo muy común es el velcro, con sus varias aplicaciones fue inventado alrededor del 1950 por el ingeniero suizo George de Mestral. A la vuelta de un paseo con su perro vio lo difícil que resultaba desenganchar los frutos de un cardo alpino del pelo de su mascota. Tras el estudio de la planta, y en particular de sus semillas recubiertas de espinas rígidas y ganchudas, inventó el velcro. Este es un ejemplo de observación de la naturaleza y de la imitación morfológica de uno de sus mecanismos. La reproducción de la forma de las espinas ha permitido realizar un cierre diferente de los botones. Pero si observamos el proceso de fabricación y el material empleado quedamos aun lejos de reproducir un ciclo de vida cerrado, propio de los sistemas naturales.

Dada la necesidad actual de respetar el medio ambiente para poder reinsertar los sistemas humanos dentro de los sistemas naturales y ser una especie más amigable para el planeta, la observación e imitación de la naturaleza es uno de los caminos que ingenieros y arquitectos están recorriendo. La biomimesis o biomimetismo consiste en la observación de los seres vivos, que llevan más de 500 millones de años evolucionando en equilibrio con su medio natural sin comprometer la continuidad general del sistema (J. I. Llorens, 2008). La idea central es que la naturaleza, imaginativa por necesidad, ya ha resuelto muchos de los problemas que estamos intentando resolver, como la producción de energía limpia, el control de la temperatura, una química no tóxica, etc. Buscando así soluciones sostenibles mediante la emulación de patrones probados por la naturaleza a lo largo del tiempo (Jorge Riechmann 2003).

El encuentro de diferentes disciplinas como la biología, la ingeniería y la arquitectura permite integrar los sistemas naturales a nuevos procesos tecnológicos creando el potencial para

nuevas acciones y nuevas vías de trabajo. El biomimetismo es esencialmente un campo de investigación interdisciplinar, una serie de colaboraciones entre botánicos, físicos, matemáticos, ingenieros y zoólogos; donde la rígida división entre disciplinas «puras» cede lugar a un área de investigación que apunta a generar tecnología inteligente (smart technologies), utilizando materiales o procesos que sean de alguna manera sensibles al medio ambiente (M. Weinstock, 1998).



**Fig. 1** Corte de la catedral gótica de Amiens y modelo fotoeléctrico bajo su propio peso en el cual las zonas de la construcción en peor estado (H. Hossdorf y C. B. Hernández, "Modelos reducidos" Ed. IETcc, Madrid 1972) - **Fig. 2** Modelos estructurales experimentales del ingeniero francés Robert Le Ricolais (A. Juárez, "El arte de construir con agujeros", Revista Orbis Tertius, Fundación SEK, N° 1, Mayo 2007) - **Fig. 3** Endless House 1961 del arquitecto Frederick Kiesler primero en utilizar la palabra biotécnica (B. Kolarevic y A. M. Malkawi, "Performative architecture - Beyond Instrumentality", Spon Press, New York 2005).

### 1.b Siglo XX: Biotécnica, Biomecánica, Biónica y...

El término *Biomímesis* surge a partir de los años 90 en ámbitos disciplinares como la robótica, donde se observaba, por ejemplo, la locomoción de los insectos para desarrollar robots hexápodos que funcionaran correctamente.

En efecto, la observación de la naturaleza por parte del ser humano es presente a lo largo de su historia. Los primeros ejemplos de carácter científico datan de la Edad Media con los estudios de Da Vinci sobre sus máquinas voladoras que imitaban las alas de los pájaros, o los numerosos ejemplos de los esqueletos de las catedrales góticas con sus estructuras nervadas. Por lo cual resulta difícil reconstruir una historia coherente de dónde y cuándo ha surgido tal idea.

Alcanza pensar en las tejas que se solapan entre sí para obtener la estanquidad al agua de los tejados. Este mecanismo recuerda las esquemas del pescado, pero probablemente los dos no tienen entre ellos una estrecha relación. Es cuando vemos en arquitectura el desarrollo de superficies complejas que las escamas del pez o la piel de la serpiente son una fuente de inspiración, eso también, por los avances de los medios informáticos.

El desarrollo científico está estrechamente vinculado a los avances tecnológicos. Aunque en este estudio no se ha ampliado este aspecto, resulta importante aclarar esta relación mutua. Y también la investigación en el campo de la biomimesis está relacionada con los actuales modelos matemáticos, de cuantificación y de modelación.

Recordando que el libro "*El origen de las especies*" de Charles Darwin ha sido publicado

en el 1856, encontramos que el mayor desarrollo de esta área científica se encuentra a lo largo de todo el siglo XX.

La tradición literaria en Europa sobre la estrecha relación existente entre la naturaleza y las invenciones humanas, tanto en el arte como en diferentes áreas científicas, puede remontarse al 1870 con, entre otras, la obra "*Las enseñanzas de la naturaleza: la inventiva humana anticipada por la naturaleza*" del reverendo J.G. Wood (London, 1862 – Convery, 1923). Pero es a partir de los años 20 y 30, del siglo pasado, que surge el término *Biotécnica* como disciplina que estudia la analogía entre la biología y la tecnología. El debate gira alrededor de la forma como producto de la evolución y por lo tanto óptima y única (Philip Steadman, 1982).

Las formas en la naturaleza no son únicas, en su observación nos damos cuenta que hay una amplia variedad de soluciones formales, como una gran variedad de tipos de hojas o de setas. En los años 40 del siglo pasado eran conocidas las más de 5.000 especies de diatomeas unicelulares que viven bajo las mismas condiciones. Mientras, a lo largo del tiempo y con diferentes objetivos e interpretaciones, la búsqueda de la optimización en la arquitectura sigue siendo válida, sino necesaria.

Por medio del proceso evolutivo, la naturaleza ha desarrollado mecanismos optimizados con un menor consumo de energía, seleccionando los mecanismos que funcionan y/o duran en el contexto ambiental actual. Sus mecanismos siguen principios como el ahorro energético, el reciclaje, la optimización de las formas, la economía de materiales, la adaptación al medio o la sostenibilidad (J. I. Llorens, 2008). En general estos modelos no suelen ser directamente aplicables, pero sí lo son las funciones y los procesos que se observan, considerando que las limitaciones y los objetivos son similares: funcionalidad, optimización y eficiencia.

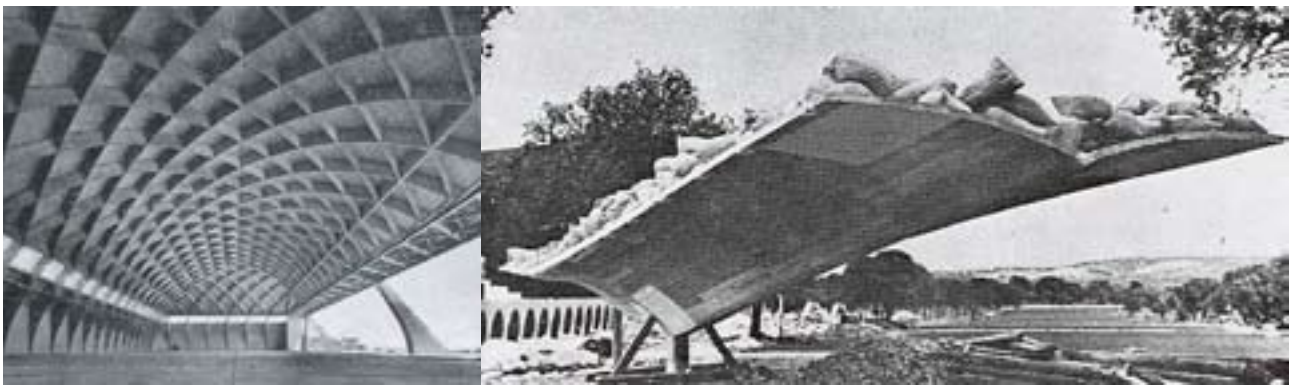
Lewis Mumford (New York, 1895 - 1990) describe la arquitectura y el urbanismo biotécnico del futuro, cuyas características principales serían la flexibilidad y la abertura al cambio, ofreciendo así la posibilidad de crecer. En este caso la biotécnica se propone como una solución a problemas mundiales, como la destrucción de ecosistemas, la polución o el suministro de energía. La imagen es de simplificar y liberar la vida urbana gracias a una tecnología biológica inspirada en modelo de economía de medios, en mecanismos fisiológicos y en el ingenio de las estructuras de los seres vivos (Philip Steadman, 1982).

En este breve recorrido histórico se observa cómo la mirada hacia la naturaleza ha ido cambiando. En principio vista como forma única y óptima, se refleja en arquitectura con la optimización de la estructura, como una consecuencia lógica. Recordamos los experimentos del ingeniero francés Robert le Ricolais (1894 - 1977) con sus prototipos de vigas metálicas atirantadas. Ricolais estudia y observa tanto el esqueleto de las radiolarias como del cuerpo humano en los cuales veía una sorprendente economía de material, un andamiaje estructural tridimensional que presentaba una curiosa síntesis entre estructuras trianguladas y láminas resistentes. En estas organizaciones espaciales se encerraba para él el futuro de las estructuras (Antonio Juárez, 2007).

De manera más o menos explícita también ingenieros como Pier Luigi Nervi (Italia, 1891-1979) y Eduardo Torroja (España, 1899-1961) o el arquitecto Félix Candela (España, 1919 - EEUU, 1997) trabajaron en la optimización de la estructura con sus cáscaras nervadas de hormigón. En ellos se encuentra la relación con formas geométricas que mejoran la resistencia y el comportamiento de la estructura para cubrir grandes luces.

A la mitad del siglo XX vemos que se define otra área científica relacionada, la *Biomecánica*,

cuyo promotor fue el ingeniero Yuan-Cheng Fung (Jiangsu, China, 1919). Esta ciencia estudia la aplicación de las leyes de la mecánica a estructuras y órganos de los seres vivos, con particular atención hacia el cuerpo humano. Se ocupa tanto de las fuerzas físicas externas que actúan sobre los cuerpos, como de la mecánica interna, de los aspectos físicos y biofísicos de las articulaciones, de los huesos y de los tejidos del cuerpo. Esta ciencia, a su vez, está estrechamente ligada a la *Biónica*, que en la última década del 1900 ha pasado a ser una rama científica autónoma, gracias a la mejora de la potencia de los ordenadores, al uso de la microfotografía y del microscopio electrónico de barrido. La biónica se ocupa de la aplicación de soluciones biológicas a la tecnología moderna, aunque estemos acostumbrados a verla aplicada a un contexto médico, como implementación en prótesis humanas. Su campo se extiende a sistemas de ingeniería y arquitectura tratando la relación forma/función y entrando en el dominio de la morfología funcional, definiéndola en el campo de la construcción como biomórfica.



**Fig. 3** Hangar para aviones en Orvieto del ingeniero Pier Luigi Nervi, 1936 - **Fig. 4** Ensayo al comportamiento bajo carga de unos de los elementos de la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid en escala real, Eduardo Torroja 1936. (H. Hossdorf y C. B. Hernández, "Modelos reducidos" Ed. IETcc, Madrid 1972)

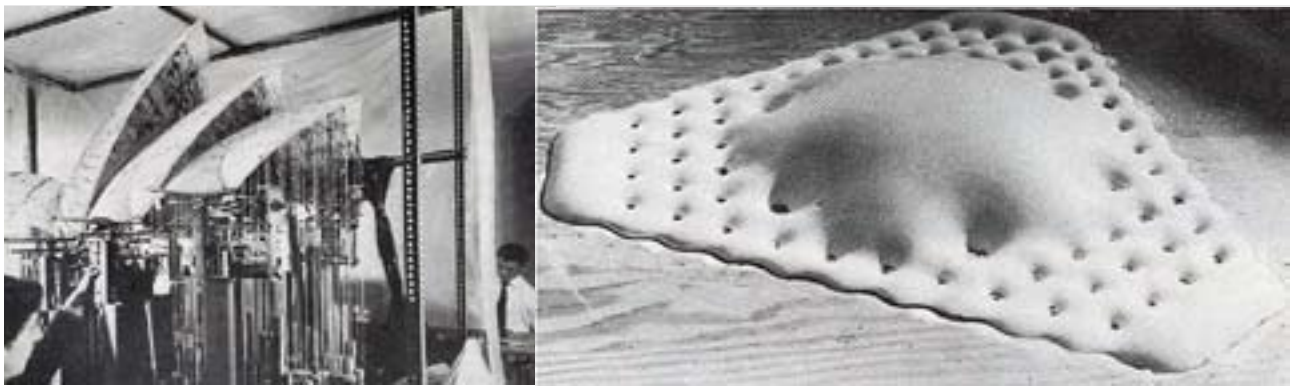
Encontramos un nuevo paso en la observación de la naturaleza: la relación entre morfología y función. En el ámbito arquitectónico, encontramos en la obra del arquitecto Nicholas Grimshaw (Reino Unido, 1939), la aplicación de los principios mecánicos de las estructuras vivientes. Las partes se conectan en un articulado sistema de *huesos*, *tendones* y *membranas* donde la construcción mecánica no está solo en una parte u otra, sino en el armonía y concatenación de todas las partes rígidas, blandas o flexibles aptas a la tracción o la compresión.

De la optimización de la estructura del edificio un pasaje importante lleva a mirar y estudiar las formas naturales. Se recuerda la obra del arquitecto Frei Otto (Alemania, 1925) por sus estructuras inspiradas a los fenómenos biológicos, como la telaraña y sus estructuras tensadas o la investigación sobre la relación entre membrana neumática en la naturaleza y la tecnología. En "*Fundamentos de una arquitectura del mañana*", publicado en 1997, pone en evidencia cómo «*la conciencia ecológica es una novedad en el ámbito de la arquitectura; ha aparecido para proteger no sólo los hombres, sino también la vida en su conjunto. (...) Si no conoce los procesos de la evolución de la forma, el arquitecto carece del control de su propio quehacer; debe conocer la diferencia entre lo que hace y lo que ocurre en los procesos autónomos*» (Publicado en "*Frei Otto. Conversación con Juan María Songel*", Ed. Gustavo Gili, Barcelona 2008).

En este escenario hemos visto cambiar la mirada hacia la naturaleza que hoy no sólo



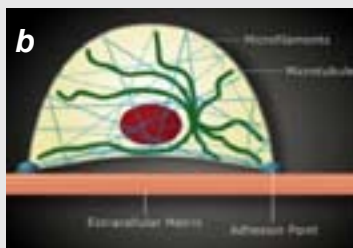
involucra las características formales, sino apunta a conocer y comprender los principios y mecanismos de funcionamiento de la vida en sus diferentes niveles. Desde siempre el hombre ha utilizado materiales biológicos, desde los huesos y pieles en la prehistoria, hasta los tableros de fibra de madera actuales. Ha aprendido a usar la naturaleza para responder a sus necesidades como el uso de los animales o la extracción de materia prima. Y en la actualidad, la técnica que hemos desarrollado busca nuevas conexiones con el ecosistema natural, de manera que el espacio urbano, industrial y agrario sea más integrado en el medio ambiente. Ya que la naturaleza es «*la única empresa que nunca ha quebrado en unos 4.000 millones de años*», y que según el biólogo alemán Frederic Vester (Saarbrücken, 1925 - 2003), nos proporciona el modelo para una economía sostenible y de alta productividad (J. Alemany, 2009).



**Fig. 5** Modelo de las cáscaras en la cubierta de la Opera House en Sydney (H. Hossdorf y C. B. Hernández, “Modelos reducidos” Ed. IETcc, Madrid 1972) - **Fig. 6** Frei Otto, proyecto de investigación sobre el Convention and Exhibition Hall, Chicago, Illinois 1960. (L. Glaeser, “The work of Frei Otto and his teams 1955-1976”, Institut für leichte Flächentragwerke IL 17, Stuttgart, 1977)

### *Richard Buckminster Fuller (1895-1983).*

Los orígenes modernos de la biomímesis suelen atribuirse al ingeniero Richard Buckminster Fuller, que se hacía la pregunta: «¿Tiene la humanidad una posibilidad de sobrevivir final y exitosamente en el planeta Tierra y, si es así, como?». Entre sus trabajos se recuerda el estudio de estructuras en tensegrity, sistema que se encuentra también en las células del cuerpo humano. Según los estudios de “mecanobiología” del Hospital Infantil de Boston y la Universidad de Harvard, este sistema permite a las células extenderse en contextos de tejido vacíos, como en casos de lesiones, hasta que vuelven a estar comprimidas entre sí y dejan de crecer. Así es como los tejidos se regenera.



**a.** Needle Tower del artista Kenneth Snelson 1969. [http://www.nasa.gov/vision/earth/livingthings/19jun\\_cytoskeletons.html](http://www.nasa.gov/vision/earth/livingthings/19jun_cytoskeletons.html)

**b.** Estructura en tensegrity de la célula. <http://www.childrenshospital.org/research/Site2029/mainpageS2029P23sublevel24.html>

### 1.c Ejemplos de biomimetismo: estado del arte

En la investigación y búsqueda de ejemplos inspirados en la naturaleza se han utilizado tanto la red de Internet como diversas fuentes bibliográficas. El campo de trabajo concierne al desarrollo de materiales y sistemas constructivos actualmente presentes en el mercado de la construcción. También hay ejemplos de la realización de edificios que en parte se inspiran en la naturaleza para dar una mejor respuesta del comportamiento estructural y/o energético.

Además, se observa la presencia de diferentes grupos de investigación que están desarrollando modelos que siguen en términos formales y sustanciales los mecanismos de organización y crecimiento de organismos vivos. En esta dirección encontramos la realización de prototipos como elementos aun desvinculados de una aplicación directa, pero que en términos generales podrían ser insertados como parte de una construcción.



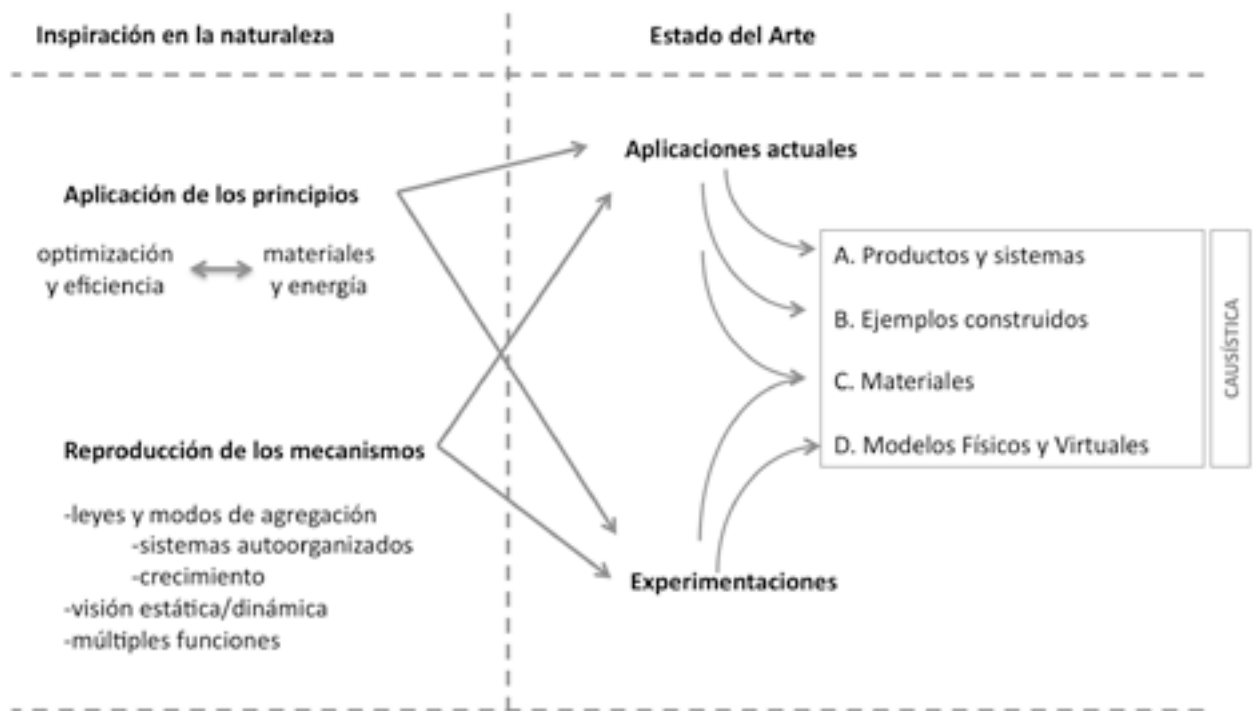
Fig. 7 Esquema de las prevalente áreas de interés en el campo del biomimetismo.

Por otro lado se observan ejemplos experimentales desarrollados por medio de modelos virtuales de representación. Estos, a veces, resultan aun alejados de la materialidad de la construcción real. Igualmente el uso de instrumentos informáticos ofrece un diferente proceso de análisis e investigación de la naturaleza extremadamente interesante. Además el desarrollo de los prototipos y los modelos virtuales están estrechamente relacionados entre sí por el uso de máquinas a control numérico.

El campo de trabajo aparece heterogéneo ya que se encuentra una amplia variedad de ejemplos naturales tomados en referencia correspondiente a una multiplicidad de interpretaciones y puntos de partidas. Es posible encontrar soluciones que aplican principios y conceptos presentes en la naturaleza como la optimización del material (en el uso y/o comportamiento) o de la energía producida y/o consumida. En paralelo hay ejemplos que reproducen los mecanismos propios de la naturaleza como las leyes y modos de agregación de las células tanto en una visión estática como dinámica de los seres vivos.



Dada la gran variedad de ejemplos que tienen una connotación en el campo de la biomímesis que cruzan diferentes áreas de trabajo, la casuística propuesta no sigue un análisis taxonómico clásico sobre el objeto arquitectónico. Se ha priorizado la relación existente entre los diferentes ámbitos involucrados más que los elementos y/o componentes propios de una construcción.



**Fig. 8** Esquema de la casuística propuesta en relación al estudio e interpretación de la naturaleza.

## A. Productos y sistemas.

En esta catalogación de ejemplos se insertan elementos presentes en el mercado que se aplican a la edificación y nuevos productos que se están desarrollando. Como vemos, en términos generales, siguen el principio de la optimización del uso y comportamiento del material empleado. Otros incorporan el desarrollo de nuevos materiales y/o de los procesos de fabricación. Probablemente algunos de los ejemplos propuestos son, entre toda la casística desarrollada, entre los más conocidos porque están ampliamente utilizados en el mercado. Por lo dicho anteriormente, la relación con la naturaleza es una práctica que desde hace un siglo está presente en forma explícita en el desarrollo de la tecnología humana, por eso encontramos ejemplos que forman parte de nuestra vida cotidiana.

(1) El sistema en celdas hexagonales de las colmenas y avisperos es uno de los ejemplos naturales empleado en los paneles de madera y cartón permitiendo una importante reducción del peso sin perder resistencia. (2) El sistema Bubble Deck de aligeramiento de las placas bidireccionales de hormigón armado mediante pelotas de plástico es otro ejemplo sobre la reducción de la cantidad de material utilizado en las áreas menos solicitadas. (3) La manipulación del material a nanoescala, integrando la funcionalidad a un nivel atómico, modifica la línea entre lo que es el material y lo que hace, como el caso de los engranajes en lana realizados por Vereinigte Filzfabriken AG, Alemania 2004. (4) Sistema BOTONGLASS® de fijación para vidrio de fachada, empresa Isolar Glas. (5) Carbon Isogrid desarrollada por ILC Dover Inc. y NASA EE.UU, 2001. Es una malla en filamentos de carbono y resina epoxi con memoria de forma, que se auto-despliega a determinadas temperaturas. (6) Perfil de fibra poltrusionados a semejanza del tallo vegetal del Institute of Textile Technology and Process Engineering, Denkendorf. (7) Los sistemas reticulares optimizan el comportamiento estructural y permiten la realización de superficies complejas desde el más conocido sistema Mero hasta la investigación de retículos con propiedades multifuncionales y no sólo mecánicas del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge. (8) La hamaca WAVE diseñada por Erik Nyberg y Gustav Strom y fabricada por Real Botania, en junio de 2008.

### Fuentes:

Josep Ignasi Llorens Durán, *"Zoomorfismo y bio-arquitectura. Entre la analogía formal y la aplicación de los principios de la naturaleza"*, II Jornadas de investigación en construcción: Actas de las Jornadas. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja 2008, España.

Matilda McQuaid, *"Extreme textiles. Designing for high performance."*, Princeton Architectural Press, New York 2005.

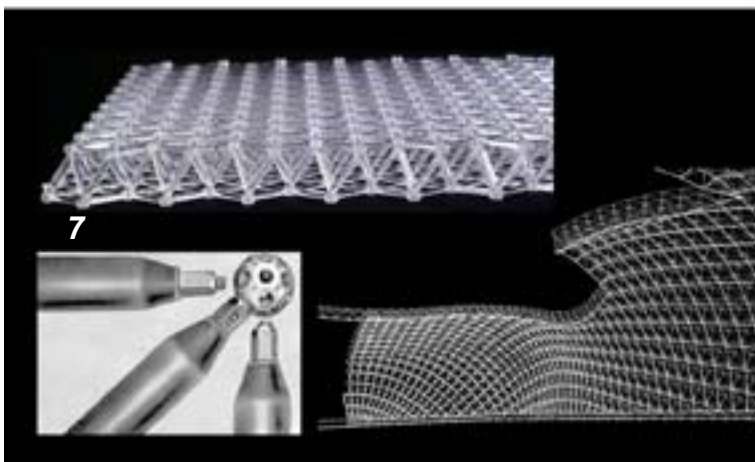
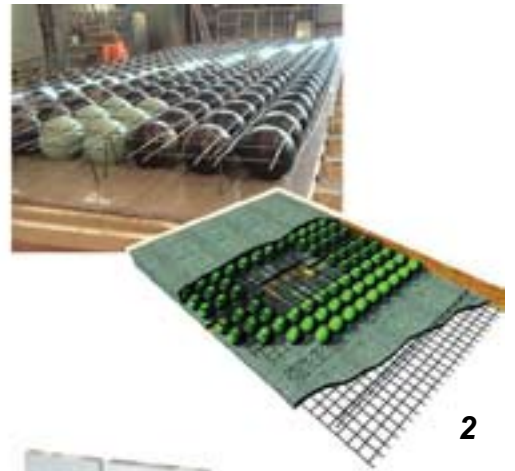
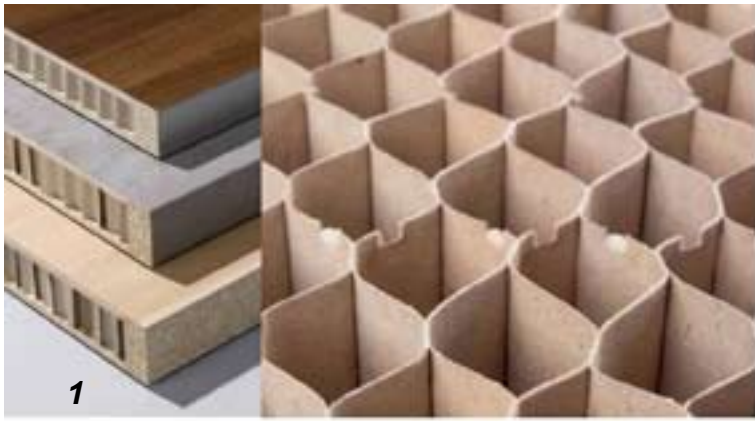
J. Sanchez Alvarez, *"The Geometrical Processing of the Free-formed Envelopes for The Esplanade Theatres in Singapore"*, MERO GmbH & Co., Germany 2002.

Institute of Textile Technology and Process Engineering Denkendorf (ITVD): <http://www.itvd.uni-stuttgart.de/>  
Department of Engineering, University of Cambridge: <http://www.g.eng.cam.ac.uk/>

<http://www.bubbledeck.com/>

<http://www.royalbotania.com>

<http://www.vitrocristalglass.com>



## **B. Ejemplos contruidos.**

Con el aumento de la escala de referencia, o sea pasar al objeto construido como es un edificio, hay un incremento de la complejidad en términos generales. Por una parte hay que considerar que el hombre es uno de los animales más grandes, por lo cual incide el factor de escala entre el ejemplo natural y la dimensión humana. Además una construcción es un sistema complejo que afecta múltiples funciones y necesidades.

Los ejemplos propuestos en este estudio consideran el objeto construido en su vida de uso, por lo cual se han clasificados según las siguientes analogías:

1. En relación al sistema estructural en la optimización del comportamiento para cubrir grandes luces, reducir el uso del material, etc. En un contexto donde la analogía entre estructura y sistema natural aparenta tener una relación privilegiada debido a un largo recorrido histórico.
2. En relación al ahorro energético que se analiza respecto a la producción de energía y a la reducción del gasto energético. En este último caso se involucra tanto la reducción del consumo propiamente eléctrico como en términos más generales una mirada hacia la reutilización o reciclaje de material como comportamiento sostenible propio de los seres vivos.
3. En relación a una visión dinámica que responde a cambios de necesidades que varían en un determinado plazo de tiempo, a los tiempos de uso y transporte del objeto arquitectónico.

Un concepto que se entrelaza entre los ejemplos es el de «multifuncionalidad». Tanto en la arquitectura como en la naturaleza hay elementos que sirven para responder a más de una necesidad o función.

Además aunque no se hayan seleccionados ejemplos hay que recordar el carácter ecológico que toma en la actualidad el biomimetismo. Por lo cual la casuística es ampliable a conceptos como el crecimiento del edificio en términos de montaje y/o ampliación evaluando el ciclo de vida desde la producción de sus componentes hasta el desmontaje y/o derribo.

Igualmente, con el aumento de escala y de los parámetros que evalúan las analogías con el mundo natural, se observa la ausencia de ejemplos que abarcan a todos estos factores. Se subraya la imagen utópica que conlleva el biomimetismo como objetivo lejano que involucra diferentes ámbitos y no sólo la arquitectura.

## Fuentes:

El Corquis 147, "Toyo Ito 2005-2009", Madrid 2009.

Kieran Long, "Jóvenes arquitectos. Nuevas voces de la arquitectura mundial.", Ed. Blumes S. L., Barcelona 2008.

Josep Ignasi Llorens Durán, "Zoomorfismo y bio-arquitectura. Entre la analogía formal y la aplicación de los principios de la naturaleza", II Jornadas de investigación en construcción: Actas de las Jornadas. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja 2008, España.

Alejandro Bahamón y Ana Cañizares, "Iglú. De arquitectura vernacula a contemporánea", Ed. Parramón S.A., Barcelona 2008.

Michael Hensel, Achim Menges y Michael Weinstock, "AD 180: Techniques and Technologies in morphogenetic design", Ed. Wiley Academy, 2006.

Hugh Aldersey-Williams, "Zoomorphic: new animal architecture", Ed. Laurence King, London 2003.

Tensi News, "Foldable umbrellas for Alden Biesen" Newsletter N° 5, Noviembre 2005.

<http://www.grimshaw-architects.com>

<http://www.shigerubanarchitects.com>

<http://www.orproject.com>

<http://www.calatrava.com/>

<http://www.hoberman.com/>

<http://www.atelierten.com>

<http://www.via-arquitectura.net/17/112-017.htm>

<http://www.inhabitat.com:8080/2007/12/10/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/>

<http://www.asknature.org/product/373ec79cd6dba791bc00ed32203706a1>

<http://www.eco-trees.org/flexible-fabric-equipped-with-photovoltaic-cells/#more-2104>

<http://www.arquitectnews.com/obra/reiser-umemoto/torre-014-dubai/>





← Richard Rogers & Partners, Terminal 4 Areopuerto de Madrid Barajas, 2004.

↓ Nicholas Grimshaw Architects, Ijburg Bridge, Amsterdam Olanda, 2001.

COX Architecture(Australia), ARUP (Australia) y Architects 61 (Singapur), Puente peatonal Marina Bay, Singapur 2009 ↓



↑ Toyo Ito & Associates, Parque de la relajación, Torrevieja Alicante, 2000, obra no terminada.

→ Nicholas Grimshaw Architects, Eden Project, Cornwall UK, 2001.

↓ Norman Foster & Partners, Swiss Re HQ, London UK, 1997-2004.





← Reiser + Umemoto Architects, Torre de oficina O-14, Dubai, Emiratos Árabes Unidos, 2006-2009

↓ DP Architects (Singapur) y Michael Wilford & Partners (London), Esplanade Theatres, Singapur, 2002.



↑ Shigeru Ban, Centre Pompidou Metz, Francia 2007.



← PTW Architects, CSCEC International Design y Arup, Centro Acuático Nacional Water Cube, Pekín, China 2004-2008



# ANALOGIA ESTRUCTURAL



**Ahorro energético respeto a la producción de energía.**



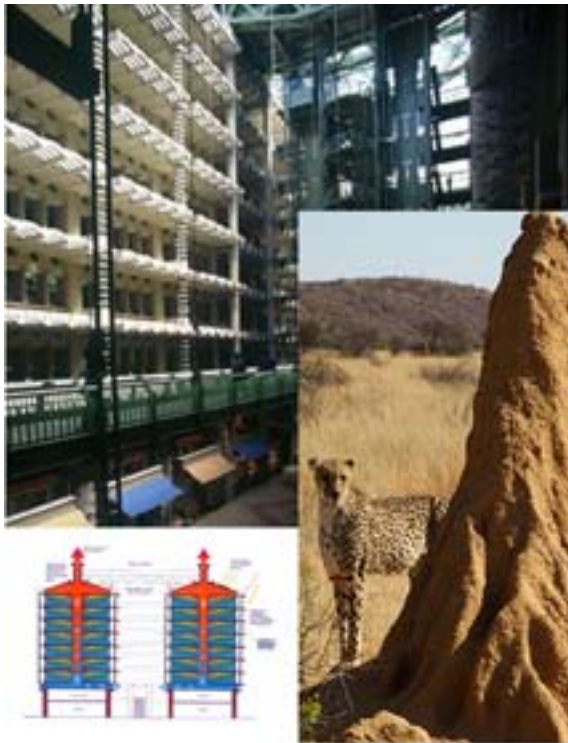
↑ Toyo Ito & Associates, Estadio Central Kaohsiung, Taiwan, 2009.

→ Aplicación militar del tejido FTL Solar con película delgada de paneles solares.

↓ Árbol OR<sup>2</sup> fuente de sombras en el día, emite la luz recolectada por sus células fotovoltaicas en la noche. Instalación ORPROJECT Londre, UK, julio 2010.







### Reducción del gasto energético.

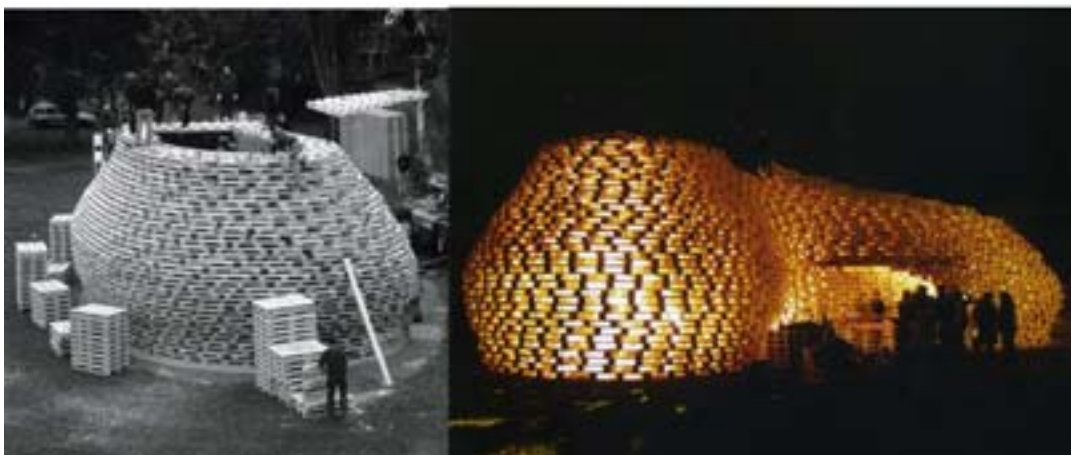
↓ M.Pearce, refrigeración pasiva en el Eastgate Centre Harare, Zimbabwe,



### Reciclo y Reuso

← Adaptación de una construcción del 1780, semidestruida durante la Segunda Guerra Mundial, en un salón de ventas. FNP Architekten, Alemania, 2005.

↓ A. ML & Partners, Pavellón de prensa, Oberstdorf, Alemania 2005.



ANALOGIA ENERGETICA



**Sistemas dinámicos como protección solar en los edificios.**



↑ S. Calatrava, Milwaukee Art Museum, EE.UU. 1994-2001.

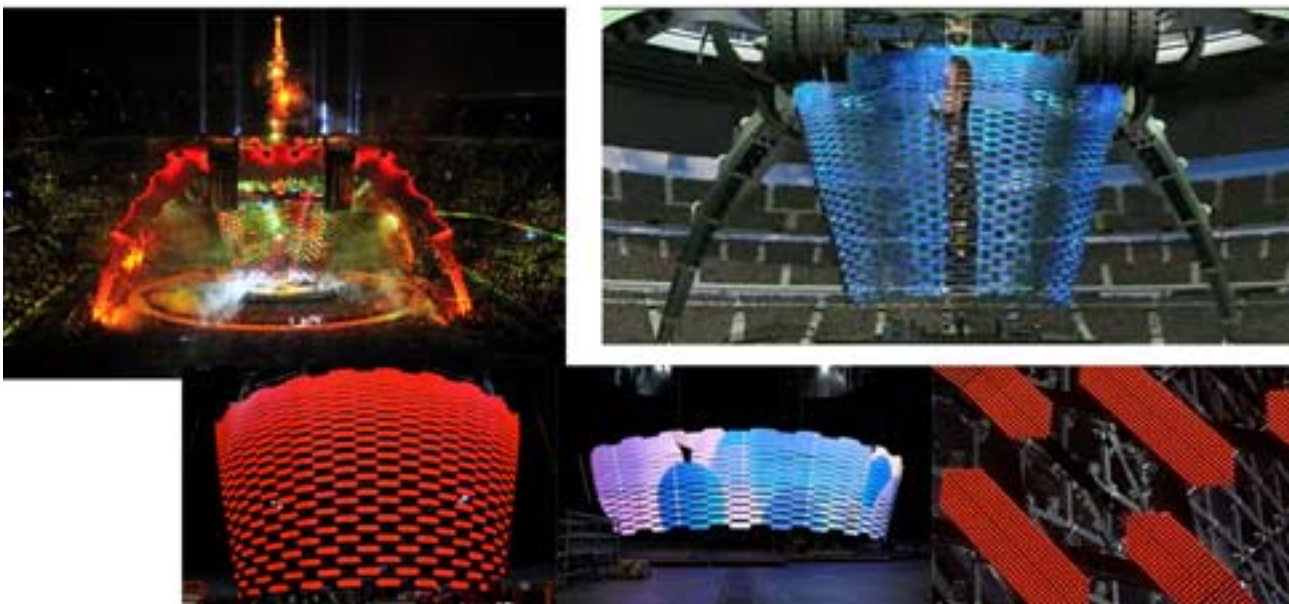
→ Ney&Parteners, Alden Biesen, Bilzen Belgica 2003.



↑ Fruto Vivas, Pavellon Venezuela, Expo Hannover, Alemania 2000.

**Sistemas dinámicos para los escenarios.**

↓ Hoberman Associates, 360° Ture U2, pantallas luminosas expandibles, 2009.



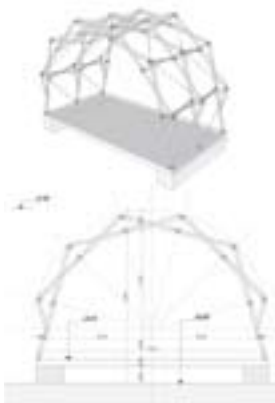




### Sistemas dinámicos en estructuras.

#### DESPLEGABLE

← Ramon Sastre, Arco desplegable ETSAV, UPC.



← Estudio boveda, Solar Workshop ETSAV 2009.

↓ Hoberman Associates, New York, EE.UU. 2006.



#### INFLABLES



Veech Media Architecture, Pabellón de las lenguas, Viena Austria 2001.

ANALOGIA DINAMICA

### C. Materiales

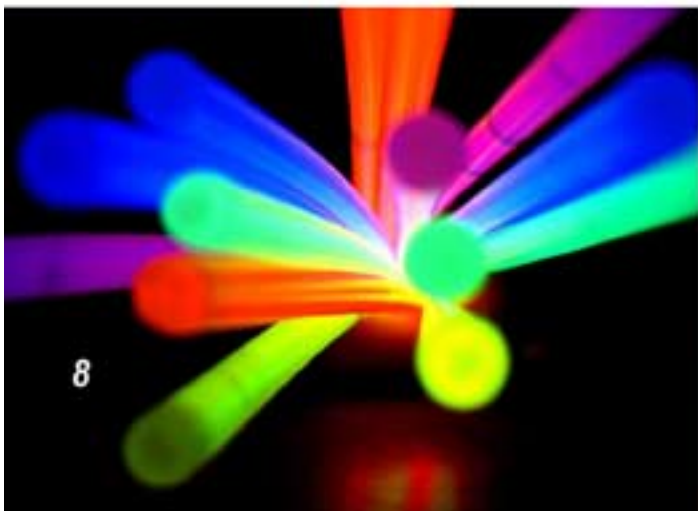
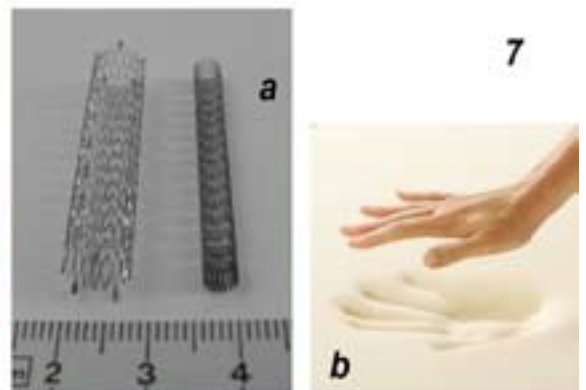
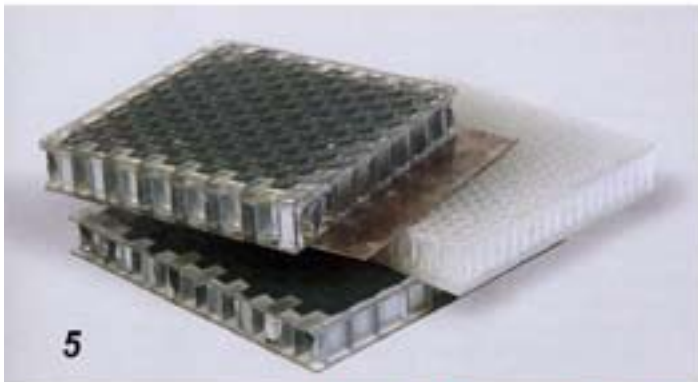
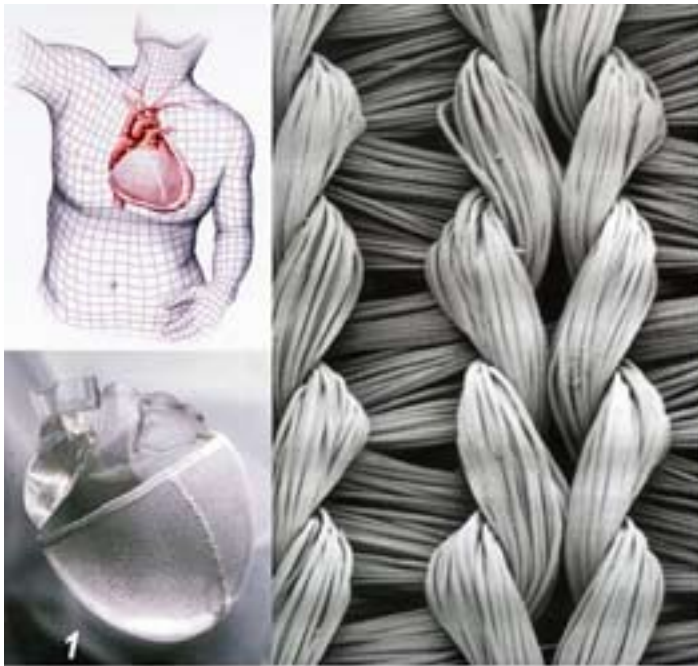
La aplicación del biomimetismo a la industria de los materiales tiene en la actualidad un amplio desarrollo. El campo de aplicación concierne la optimización de las características del material con el aumento de las propiedades mecánicas o con una marcada connotación medioambiental (biodegradables, reciclados y/o reciclables), como es el caso de las espumas cerámicas, de madera (3) o a base de aceite de semilla de girasol (2).

Otro campo de aplicación concierne la reproducción del diseño (o mecanismo) por medio de la reproducción de patrones naturales. Eso lleva a la producción de superficies *activas* como el caso de las autolimpiantes (4) que inspiran su textura a la hoja del loto. Otro ejemplo similar son las superficies capaces de reducir la formación de bacterias según su rugosidad, inspiradas a las escamas de tiburón.

También el estudio y desarrollo de tejidos encuentra su relación con el campo de la biomimesis. Tienen una importante aplicación en campo biomédico para la reparación de tejidos orgánicos de nuestro cuerpo. Su desarrollo concierne las propiedades de los materiales como es el caso de los poliméricos sintéticos y biodegradables. Paralelamente investiga la estructura y el entramado del tejido donde se irá regenerando el tejido orgánico. En la actualidad existen productos para la regeneración de la piel o del cartílago, y trabajos de ingeniería que han desarrollado mallas para tratar problemáticas cardiovasculares (1).

En el desarrollo de estos materiales hay también lo que se definen adaptivos. O sea materiales inteligentes, activos o multifuncionales que, como los organismos vivientes, son capaces de modificar de forma reversible y controlable alguna de sus propiedades cuando sobre ellos actúan estímulos físicos o químicos externos. Estos materiales se dividen en cuatro grupos:

- los materiales con memoria de forma de aleaciones metálicas (7a), polímeros (7b), etc. que tienen su correspondencia en la naturaleza en el músculo que se contrae al recibir un impulso eléctrico desde el cerebro, o en la flor que se abre por el día y se cierra por la noche.
- los materiales electro y magnetoactivos, como los piezoeléctricos (6), que actúan o reaccionan antes cambios eléctricos o magnéticos y son ampliamente utilizados en el desarrollo de sensores y actuadores.
- los materiales fotoactivos en los cuales se producen cambios por la acción de la luz o que por otro lado son capaces de emitir luz por la acción de fenómenos externos, como por ejemplo los electroluminescentes, fosforescentes (8), o fluorescentes.
- los materiales cromoactivos son aquellos en los cuales se producen cambios de color como en los fotocromáticos, los termocromáticos o los electrocromáticos (9), dependiendo del tipo de fenómeno externo que actúa sobre ellos.





(1) CorCrap™ soporte cardíaco producido por Acorn Cardiovascular Inc.™ EE.UU. 2004, en multifilamentos de poliéster (diámetro 15,9 cm). (2) Espuma a base de aceite de semilla de girasol, dimensiones 480x360x200 mm. (3) SLP espuma de madera realizada a partir de viruta. (4) Pintura Lotusan® autolimpiante que aprovecha el LotusEffect® descubierto por los botánicos Barthlott y Neinhuis en 1975. (5) Paneles sándwich con diferentes capas de materiales. (6) Material piezoeléctrico con su estructura cristalina que transforma impulsos mecánicos en eléctricos. (7) Materiales con memoria de forma: (a) malla tubular para abrir arterias, que se deforma agrandándose cuando es introducida en el cuerpo con un leve calentamiento a 39 ó 40 °C; (b) colchón con memoria de forma por compresión. (8) Tubos fosforescentes son materiales semiconductores que convierten la energía absorbida en luz emitida detectable en la oscuridad. (9) En Cetemmsa Centro Tecnológico encontramos los materiales cromóactivos como los tejidos que pueden cambiar de color o diseño según la temperatura inducida por el ambiente o impulsos eléctricos.

#### Fuentes:

Autores varios, "Mater. Centro de Materiales" Vol. 2/3, Ed. FAD (Foment de les Arts i del Disseny), Barcelona 2008.

Autores varios, "Mater. Tesis" Vol. 3/3, Ed. FAD (Foment de les Arts i del Disseny), Barcelona 2008.

Matilda McQuaid "Extreme Textiles. Designing for high performance", Princeton Architectural Press, New York 2005.

Nicolas Stattmann "Ultra Light - Super Strong: A new generation of design materials" Birkhauser -Verlag fur Architektur Edition, Basel - Boston - Berlin 2003.

Laia Banús, "Entrevista a José Manuel Barandiarán, responsable del grupo de investigación de la UPV Magnetismo y Materiales Magnéticos", 17 de julio de 2009 en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/32846-Entrevista-Jose-Manuel-Barandiaran-responsable-grupo-investigacion-UPV-Magnetismo.html>

<http://www.fad.cat>

<http://www.lotus-effekt.de/en/index.php>

<http://transmaterial.net/>

<http://www.inteligentes.org/blog/>

***Sharklet AF™: superficies antibacteriales inspiradas a la piel de tiburón de las Galápagos.***

El tiburón de las Galápagos es un escualo que nada muy lentamente lo cual debería facilitar la adhesión de las bacterias, sin embargo esto no ocurre. Observando la estructura y el patrón de las escamas, los científicos de la empresa Sharklet Technologies descubrieron que este diseño natural mantenía las superficies libres de bacterias. De hecho la investigación fue desarrollada a partir de 2002 por la doctora Anthony Brennan, que estaba de visita en la base naval de EE.UU. en Oahu Pearl Harbor, en el marco de una investigación patrocinada por la Marina. El objetivo era encontrar nuevas estrategias para reducir las incrustaciones que recubren los cascos de submarinos y barcos.

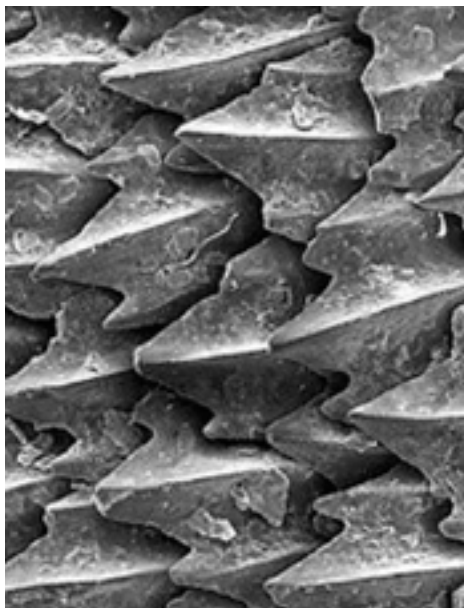
Un examen al microscopio electrónico de barrido mostró la organización de los dentículos de la piel del tiburón dispuestos en forma de diamante con diferentes costillitas pequeñas. La medición del patrón con el ancho y la altura de las costillas se hizo corresponder al modelo matemático para determinar la rugosidad de la superficie. Las primeras pruebas realizadas por la empresa Sharklet dieron una reducción del 85% de la adhesión de las algas verdes respecto a una superficie lisa.

Fuentes:

<http://www.sharklet.com/>

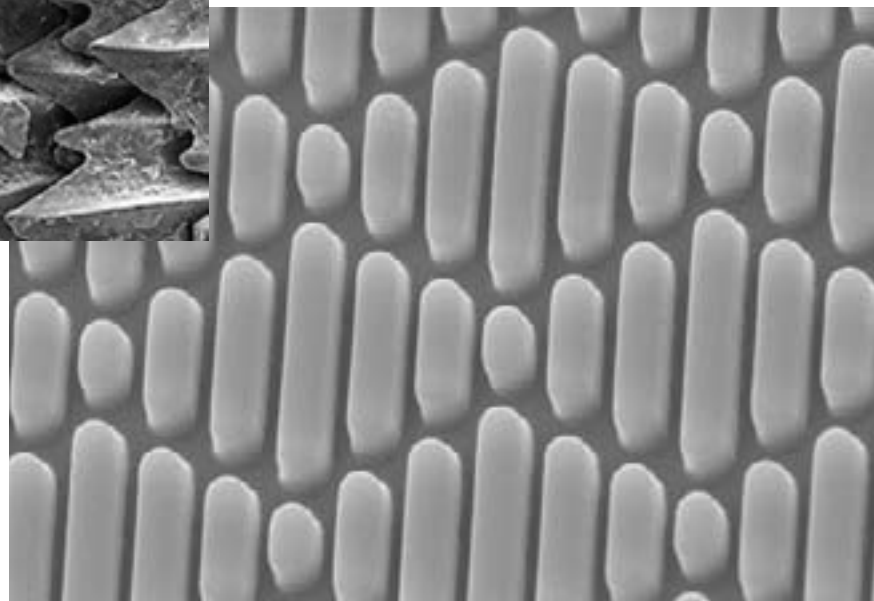
<http://www.asknature.org/product/gallery/3c21a56f0ba2ae549894a2bf79372bda#changeTab>

<http://www.maikelnai.es/2009/08/12/de-superbacterias-y-escamas-de-tiburon-biomimesis/>



1

- 1 Foto al microscopio electrónico de barrido de las escamas del tiburón de la Galápagos.
- 2 Modelo virtual que aplica la rugosidad de la superficie según la medición del patrón natural.



2

### **Espuma Cerámica.**

La técnica de fabricación de este material prevé la impregnación interna de polímeros con células abiertas mediante una lechada de cerámica, que en fase de cocción en horno deja únicamente el material cerámico. La espuma de cerámica es un material que se caracteriza por su baja densidad, alta resistencia a la temperatura, rigidez y una buena resistencia mecánica.

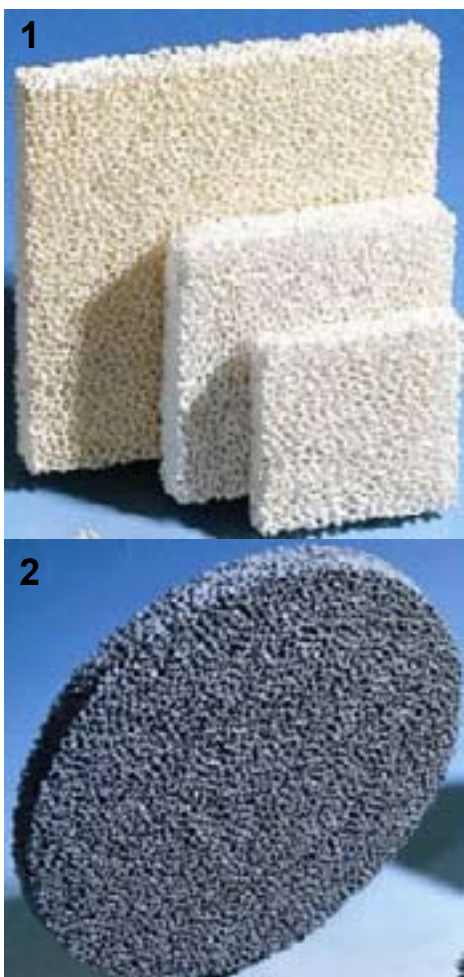
Actualmente se aplica en productos para la fundición y en particular para la producción de filtros, gracias a su conductividad térmica extremadamente baja a causa de su elevada porosidad. Aunque todavía este material se emplea en la fabricación de cerámicas avanzadas, en arquitectura se trabaja para la producción de nuevos productos alternativos que actúen como aislante térmico y/o acústico. Un ejemplo son los paneles sándwich LigaFill® formados por una capa de relleno de espuma de cerámica y placas de cerámica exteriores (dimensiones aprox. 180x180x10 mm). Hasta la fecha, el material no consta de una aplicación concreta, pero es posible crear estructuras variables para la construcción ligera que se puede utilizar en una alta gama temperaturas de hasta 1.400 °C.

Fuentes:

Nicolas Stattmann *"Ultra Light - Super Strong: A new generation of design materials"* Birkhauser -Verlag fur Architektur Edition, Basel - Boston - Berlin 2003.

<http://www.arrosi.net/antCatalogo.asp?cod=2093&nombre=2093&prt=1&nodo=2259&sesion=1>

<http://www.aislo.com/obtienen-una-espuma-ceramica-que-facilita-la-reduccion-del-consumo-energetico/>



**1 y 2** Filtros de espuma cerámica de la empresa Arrosi.  
**3** paneles sándwich LigaFill® dimensiones aprox. 180x180x10 mm



## **D. Modelos construidos y virtuales**

En este apartado se han seleccionado ejemplos de modelos construidos y virtuales donde se reproducen los mecanismos propios de la naturaleza. Entre los cuales recordamos las leyes y modos de agregación de las células como sistemas autorganizados, la multifuncionalidad y una visión estática o dinámica de los elementos.

El desarrollo de algunos de los prototipos propuestos está vinculado al uso de máquinas a control numérico para su realización, y por consiguiente al desarrollo de los modelos virtuales. Los dos procesos, físico y virtual, permiten utilizar diferentes métodos de investigación para el análisis de los modelos naturales, pero a su vez están estrechamente relacionados entre sí.

Además estos ejemplos muestran la existencia de una red de Networks relacionada, como otro aspecto que afecta el estado del arte. Estos muestran un amplio escenario que concierne sitios de investigación básica en los cuales encontramos inspiración, institutos de investigación que involucran escuelas de diferentes áreas científicas, o simples bases de datos sobre soluciones existentes o ideas a desarrollar.

El aspecto interesante de esta búsqueda es mostrar la gran variedad de personas y/o instituciones que no sólo están trabajando en soluciones inspiradas en la naturaleza, sino que también difunden sus principios fundamentales.

### **Network:**

- <http://wyss.harvard.edu>

El Wyss Institute aprovecha las estrategias de diseño de los sistemas vivos para el desarrollo de dispositivos médicos, métodos más eficientes para la producción, la conservación de energía y el desarrollo una arquitectura más sostenible. El instituto fue fundado por la Universidad de Harvard para el desarrollo de ingeniería inspirada en la biología y sus partners principales son: Harvard Medical School, Faculty of Arts and Sciences y School of Engineering and Applied Sciences.

- <http://www.adaptivebuildings.com>

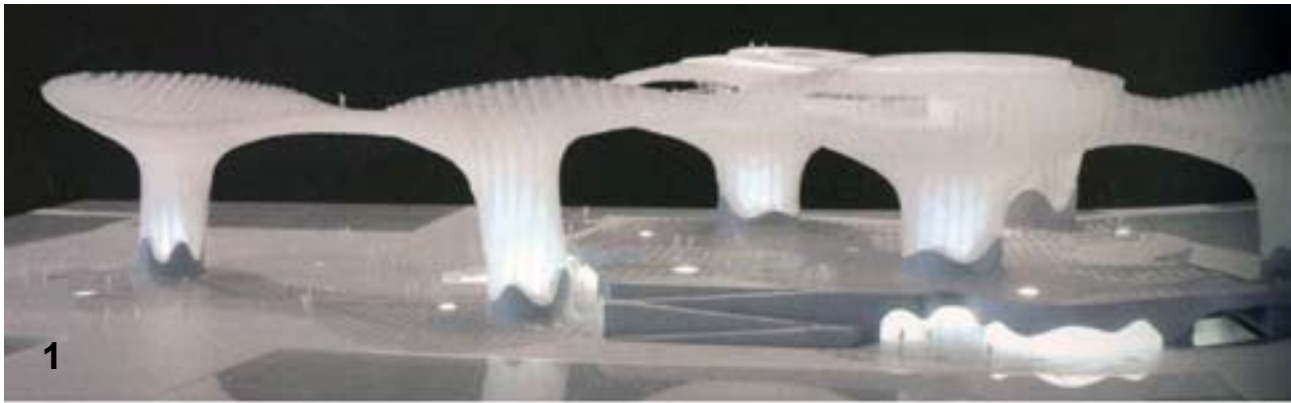
Fundada en 2008, la Adaptive Building Initiative (ABI) es una empresa conjunta entre la Buro Happold and Hoberman Associates dedicada a diseñar una nueva generación de edificios que optimizan su configuración en tiempo real, respondiendo a los cambios ambientales.

- <http://www.ocean-designresearch.net/>

Fundada en 1994 y registrada en Noruega como una organización sin fines de lucro en 2008, OCEAN es una red de investigación internacional e interdisciplinaria.

- <http://asknature.org/>

Es un proyecto del Biomimicry Institute, una organización sin fines de lucro, fundada en 2005 por Dayna Baumeister, Janine Benyus, y Bryony Schwan. Esta página de Internet es un database sobre soluciones que ya han llegado al mercado, o posibles ideas a desarrollar y es probablemente uno de los mayores portales de información relacionada al biomimetismo.

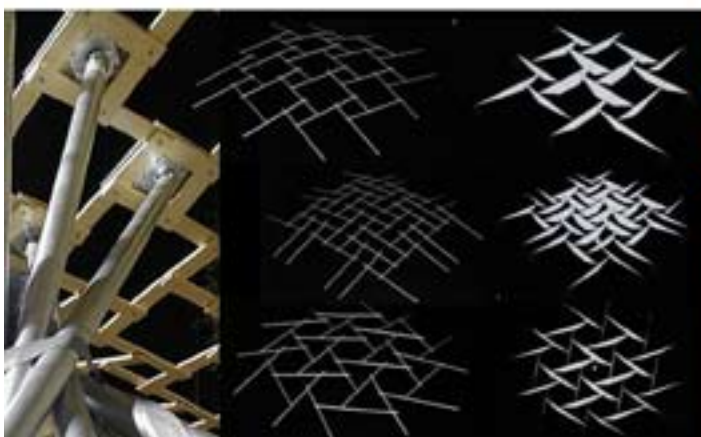
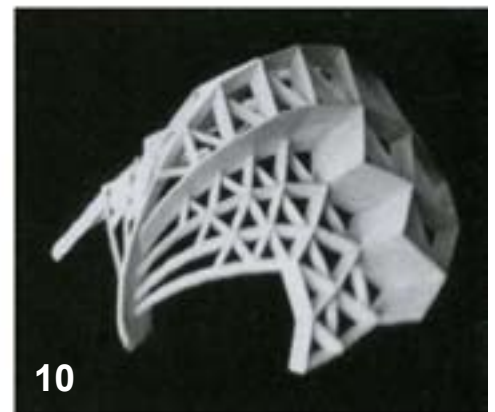


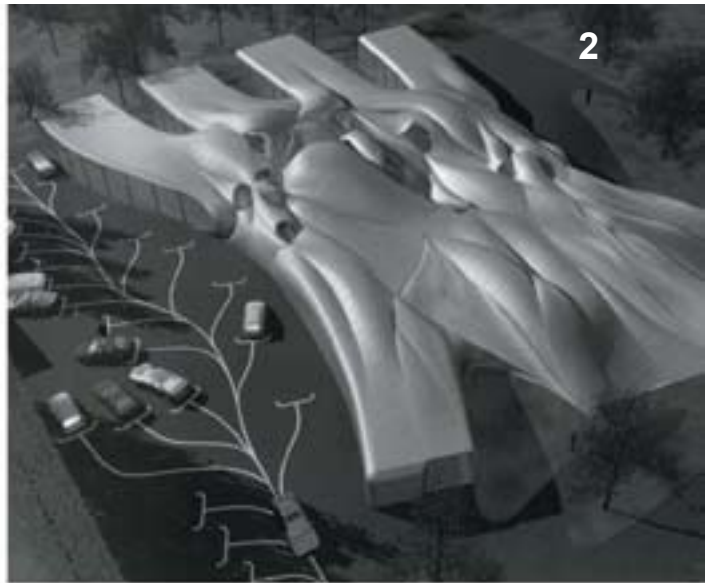
(1) Jürgen Mayer, "Metrol Parasol", Sevilla actualmente en construcción. La cubierta practicable de la plaza está compuesta por 6 enormes formas como hongos y en los tallos se sitúan las conexiones verticales. (2) Prototipo "Metapach" de una superficie polimórfica que muestra la variación de ajuste de los 7680 pernos de fijación del muro. Expuesto en Modulation Exhibition, Rice School of Architecture, Houston, noviembre 2004. (3) El proyecto "Flying ghangé", de K. Loser y M. Adam y expuesto en Innovation Habitat, Berlín 2007. (4) D. Coll, M. Hensel y D. Sunguroğlu Hensel, "Bylgaj Membrane Installation 2008", inspirado a una especie de camarones. (5) EcoLogic Studio, "AqvaGarden", instalación del Fuorisalone de Milano, abril 2007. (6) BKK Architects y Rory Hyde "Pavilions for New Architecture" expuesto en Monash University Museum of Art, Caulfield, Australia 2005. (7) "Membrane Morphologies '02", instalación en Architectural Association, Londres 2002. (8) Lambert Kamps, su tienda para festivales es estructura interactiva que se infla por medio de sensores cuando alguien se acerca, Holanda 2004. (9) Trabajos de estudiantes RITMI Architecture, "Contagious Life". (10) M. Rivera y L. Alberto, prototipo de estructura basada en la geometría fractal,



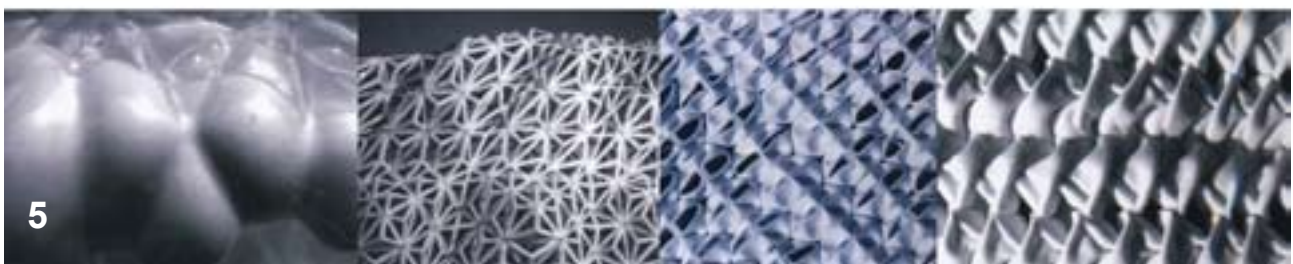


Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Lima, 2006. (11) Ejemplos de configuraciones de mallas espaciales a doble curvatura obtenida por la reiteración de elementos lineales. Desde la izquierda: Shigeru Ban, "Bamboo Roof", Rice University Art Gallery, Houston, Texas, USA, 2002; J. Sánchez, "Adaptable Leonardo", Universidad de Sevilla 2006; Workshop interuniversitario, Mendoza, Argentina 2007.

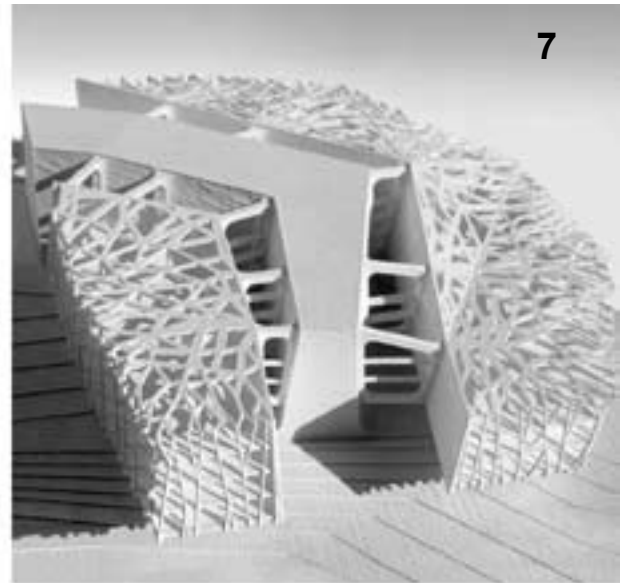
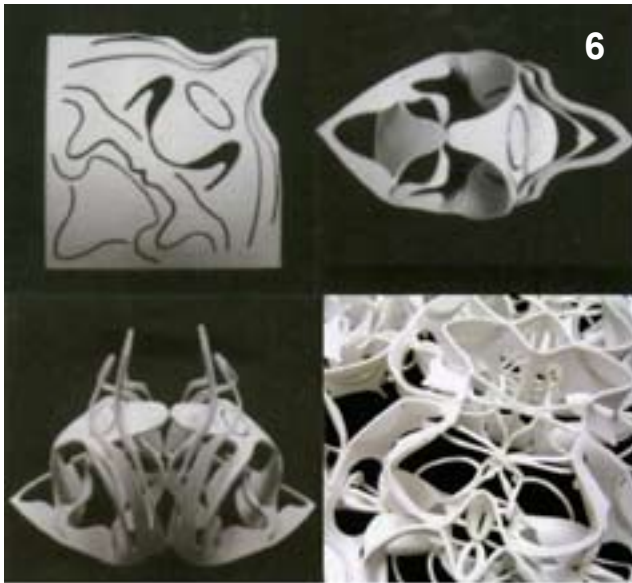




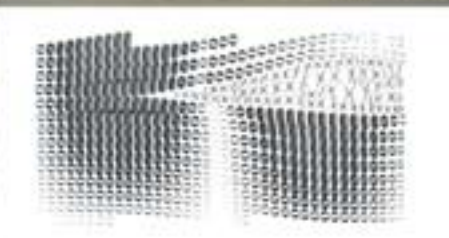
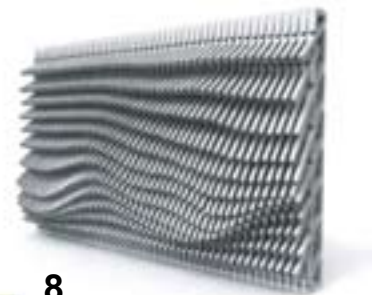
(1) NOX Architect, Ground Zero proyecto para las nuevas Twin Towers, New York 2002. (2) NOX Architect, "SoftOffice", Stratford 2000-05. (3) Lina Martinson, reproducción de un nido de pájaros por computadora, MA Dissertation Project 2004. (4) Estudio de la generación por computadora de formas polimorfitas a partir de un mismo elemento, Architectural Association, Londres 2004. (5) Biomorfismo, desarrollo de superficies complejas a partir de modelos virtuales (primeras







dos imágenes a la izquierda) y materialización por medio de máquinas a control numérico (las otras dos imágenes a la derecha), Máster de Arquitectura Biodigital, ESARQ, UIC, Barcelona 2009. (6) C. Guerrero, maqueta en tres dimensiones a partir de piezas de 4 pulgadas de largo cortadas con una laser-cutting machine, Máster de Arquitectura Biodigital, ESARQ, UIC, Barcelona 2009. (7) Michael Hensel y Achim Menges, “New Czech National Library”, concurso internacional, Praga 2006. (8) Dos diferentes máquinas a control numérico para el montaje de superficies complejas a partir de pequeños elementos y para la perforación de superficies con diseño variables.



## Fuentes:

Autores varios "Arquitecturas genéticas III: nuevas técnicas biológicas y digital", ESARQ Universidad Internacional de Catalunya, España 2009.

Kieran Long, "Jóvenes arquitectos. Nuevas voces de la arquitectura mundial.", Ed. Blumes S. L., Barcelona 2008.

Gramazio & Kohler, "Digital materiality in architecture", Ed. Lars Müller, Zurigo 2008.

Phyllis Richardson, "XS ecológico: grandes ideas para pequeños edificios", Ed. Gustavo Gili S.L., Barcelona 2007.

Michael Hensel, Achim Menges y Michael Weinstock, "AD 180: Techniques and Technologies in morphogenetic design", Ed. Wiley Academy, 2006.

Autores varios, "Adaptables '06", IASS (International Conference on Adaptability in Design and Construction), Eindhoven University of Technology, Holanda 2006.

Branko Kolarevic y Ali M. Malkawi, "Performative architecture - Beyond Instrumentality", Spon Press, New York 2005.

Michael Hensel, Achim Menges y Michael Weinstock, "AD 169: Emergence. Morphogenetic design strategies", Ed. Wiley Academy, 2004.

TensiNews "Flying Change" N° 2, Abril 2002.

<http://www.membranespaces.net/>

<http://www.ocean-designresearch.net>

<http://www.sial.rmit.edu.au/>

<http://www.shigerubanarchitects.com/>

<http://www.bassoimpatto.it/>

<http://www.ecologicstudio.com>

## 2. Ejemplo en la naturaleza.

En la observación de la naturaleza es importante el concepto de selección natural en relación a una percepción del tiempo más larga que la historia del hombre. Porque se interpreta y considera como el proceso de diseño que ha llevado a los organismos vivientes actuales. En este capítulo, además se desarrolla una clasificación de las estructuras presentes en la naturaleza para observar el amplio abanico y las diferentes soluciones que nos ofrece.

### 2.a Una percepción del tiempo.

Uno de los aspectos que lleva a considerar la naturaleza una fuente de estudio e investigación es la diferencia en el tiempo entre el desarrollo de los sistemas naturales respecto a los humanos. Se puede observar cómo organismos, animales y plantas se han desarrollado en un plazo de tiempo mucho más amplio que la cultura humana. Además las tecnologías de la naturaleza se encuentran en la superficie de la Tierra como nosotros, por lo que soporta las mismas limitaciones físicas y químicas, aunque la velocidad con que se modifica a sí misma es infinitamente lenta respecto a nuestros estándares culturales y temporales (Steven Vogel, 2000).

Si hacemos una estimación de la edad de la tierra de aproximadamente unos 5 billones de años y la evaluamos como si fuera un solo año, vemos que la presencia humana asciende a unos 5÷3 millones de años equivalentes a pocos menos de 2 horas. Mientras el desarrollo cultural resulta ser de solo 13 segundos, igual a 10.000 años atrás (Eugene Tsui, 1999).

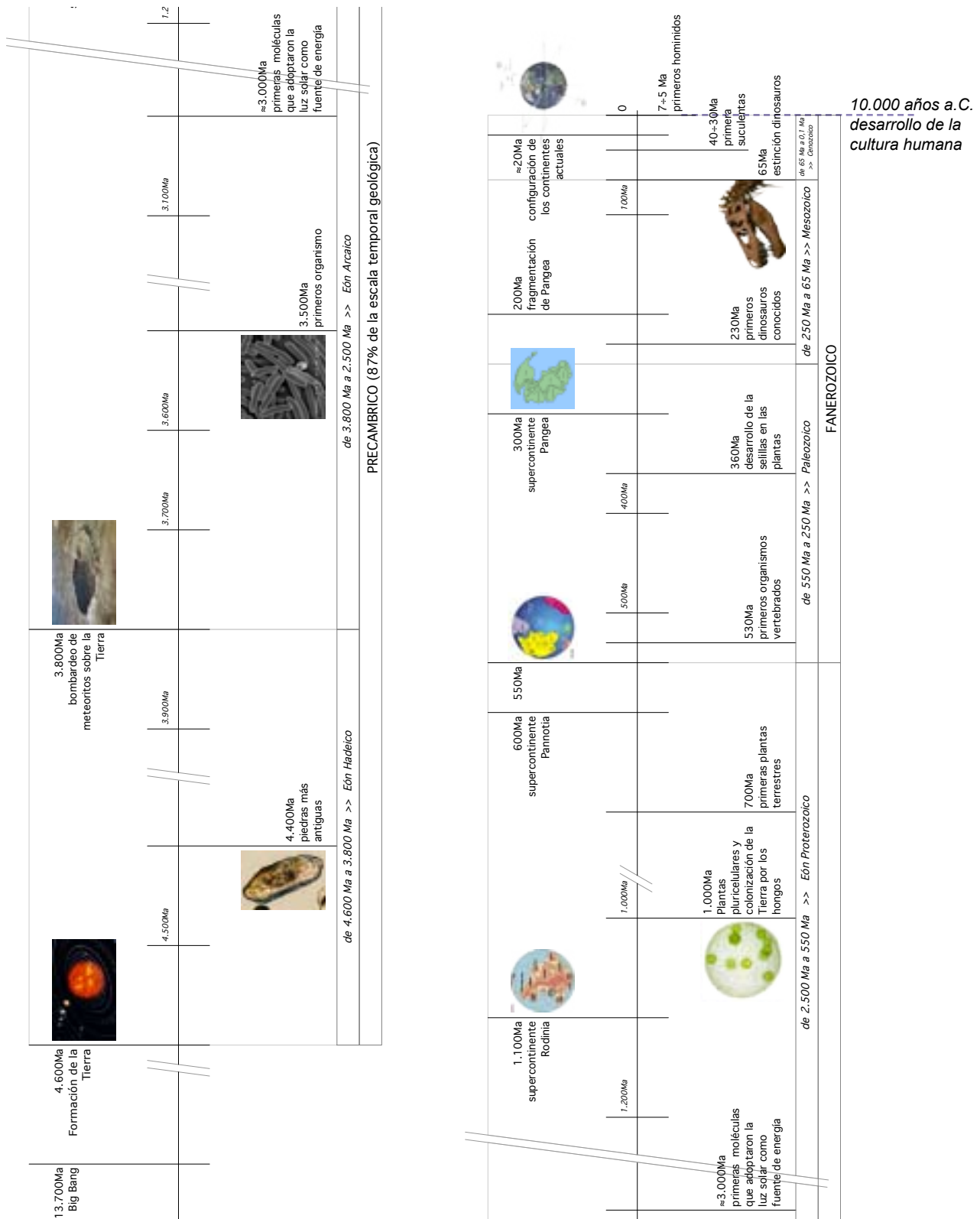
		<b>Tiempo en años</b>		<b>En un solo año</b>
Edad de la tierra	⇒	5 billones	=	1 año
Presencia del hombre en la tierra	⇒	Entre 5 y 3 millones	=	1hs 50 minutos
Desarrollo de la cultura humana	⇒	10.000	=	13 segundos

**Fig. 1** Relación temporal entre la edad de la Tierra y la presencia de la cultura humana.

Esta comparación muestra cómo el conocimiento humano es muy joven respecto a la evolución de la naturaleza. La naturaleza en sus millones de años de evolución con ensayos y errores ha logrado producir soluciones efectivas en respuesta a las modificaciones de su entorno.

Al mismo tiempo, vemos la velocidad de cambio y desarrollo de la especie humana incomparable respecto a otras. Con la misma técnica de prueba y error ha ido seleccionando y modificando sus sistemas, que, a diferencia, actúan modificando el hábitat en el cual vivimos para responder a viejas y nuevas necesidades.

Con esta diferencia de la percepción del tiempo observamos las soluciones que han adoptado otros seres vivos, para ver como lo hacen y si pueden dar alternativas válidas a la modificación de nuestro entorno. Vemos que el curso del tiempo en la naturaleza suele exceder mucho nuestra experiencia personal directa y que la misma actúa e inventa de un modo distinto al nuestro.



**Fig. 2** Línea del tiempo que evidencia la diferencia de la escala temporal entre la edad de la Tierra, la aparición de los organismos y el corto plazo que se ha desarrollado la tecnología humana.



## 2.b Selección natural y evolución.

Por selección natural hacemos referencia a los mecanismos evolutivos que modifican una o más características intrínsecas de un organismo. Las condiciones de un medio ambiente favorecen o dificultan su supervivencia, y los cambios que mejoran su adaptación pueden tener un éxito en la fase reproductiva. La selección actúa a diferentes escalas, tomando la base de los genes, considerados como la unidad básica del almacenamiento de información genética. Esta repercute en el genotipo, que es el contenido específico de un individuo y se encuentra en su ADN (ácido desoxirribonucleico), que a su vez es usado en el desarrollo y funcionamiento de los organismos vivos conocidos.

Por lo tanto, considerando los cambios evolutivos, existe una correlación entre la eficacia reproductiva de los portadores de un genotipo y la adaptación al medio que éste les otorga. Interpretando que las ventajas adaptativas son seleccionadas y se extienden en determinadas poblaciones. La selección natural pasa por consiguiente a diferentes niveles como la célula, el organismo, los grupos y las especies. Es un comportamiento adaptativo de desarrollo que se produce en largos periodos de tiempo y por eso se define como un proceso evolutivo.

La evolución natural ensaya pequeños cambios que quizás aportan ciertas ventajas y en términos más generales se puede considerar como un cambio continuo. Por lo cual lo que hoy observamos se puede considerar como un *equilibrio puntual* de un cierto organismo. Esto implica que, la mayoría de las veces, la selección natural sólo mantiene las formas perfectamente adecuadas a sus funciones. Una vez bien formado un organismo, es muy poco probable que alteraciones aleatorias lo mejoren (Steven Vogel, 2000).

Aparentemente sólo un fuerte cambio del medio en el cual vive un organismo puede determinar cambios evolutivos sustanciales pero siempre entendiéndolos en largos periodos. Como en el caso de la historia humana, los cambios evolutivos, aun siendo procesos continuos, no siguen una línea recta y se encuentran de forma intermitente en el tiempo. A un cambio que ocurre rápidamente, se alternan largos periodos donde no se encuentran modificaciones significativas.

Los cambios que afectan un organismo son mutaciones aleatorias seguidas de una selección natural que actúa a favor o en contra definiendo la adaptación del individuo, según las condiciones medio ambientales. Una mutación puede afectar un elemento dado mejorándolo o dándole nuevas o múltiples funciones. También los cambios pueden afectar a diferentes partes que contribuyen a desarrollar una determinada función. Por el contrario, en el mismo tiempo, una mutación puede ser neutra o perjudicial.

Como vemos se determina una compleja red de interacciones que ha conformado el organismo. Su diseño es un proceso de generación de variabilidad, que por selección ha resultado beneficioso.

### **Limitaciones en el cambio evolutivo**

Una de las limitaciones del proceso evolutivo depende de la relación entre la complejidad de un organismo (en términos morfológicos, funcionales, etc.) y la cantidad de información necesaria para su construcción y funcionamiento. Este es definido por el biólogo Steven Vogel como imperativo informal y pone en evidencia cómo la construcción de un organismo actúa sobre detalles muy pequeños (de la orden de micrón), pero la forma de un organismo debe establecerse mediante un conjunto de planes muy imprecisos.

*<<El plan para crear cualquier organismo presenta un problema que merece más atención. En esta época de bytes y ordenadores, la información se reconoce como algo cuantitativo y medible. La unidad básica, el bit, resuelve la incertidumbre de una elección entre dos alternativas igualmente posibles, como la información que se obtiene al mirar de qué lado ha caído una moneda. En esencia, la información almacenada. Para construir un ser humano o un animal similar, un huevo fertilizado dispone de unos 10<sup>10</sup> (un 1 seguido de 10 ceros) bits de información en su ADN. Esto puede parecer una enormidad hasta que se considera que cada uno de nosotros tiene una 10<sup>14</sup> células, un número como mínimo 10.000 veces mayor. Por tanto 10.000.000 bits no es un gran número. De los ordenadores hemos aprendido que la representación en dos dimensiones -los gráficos- emplean bastante más memoria que los textos. (...) Pero los organismos son tridimensionales, y detalles tan finos como una millonésima de un milímetro son importantes. La especificación de esta gran definición requeriría una cantidad realmente gigantesca de información, mucho millones de veces mayor que los 10<sup>10</sup> bits que hay en un huevo o una célula de esperma. Así pues, en general, la forma de un organismo debe establecerse mediante un conjunto de planes muy imprecisos. (...)*

*Probablemente, la construcción de grandes organismos mediante la adición de considerables cantidades de células se hizo necesaria por la escasez de información. La células pueden parecer diferentes, pero todas tienen muchos puntos en común; si se puede construir una de ellas, sólo se necesita un poco más de información (relativamente, por supuesto) para construir todas las demás. Por otra parte, en el desarrollo de cada individuo, un grupo de instrucciones puede ajustar más de una estructura. En los humanos, el tamaño de las manos es un excelente vaticinador del tamaño de los pies (...). Normalmente una sola alteración del material genético -una mutación- afecta a ambos lados del cuerpo de un animal. (...) Además de estos ahorros de información hay otros. El corazón y los intestinos están en el mismo sitio, pero, a cierto nivel de detalle, la situación de nuestros elementos corporales son imprevisibles. Los estudiantes de anatomía aprenden los nombres de los grandes vasos sanguíneos, pero, afortunadamente, los pequeños son anónimos, solo porque su disposición varía de una a otra persona.>>*

(Steven Vogel, «Anca y palancas. Mecánica natural y mecánica humana», Tusquets Editores, Barcelona, 2000)

## 2.c El tamaño.

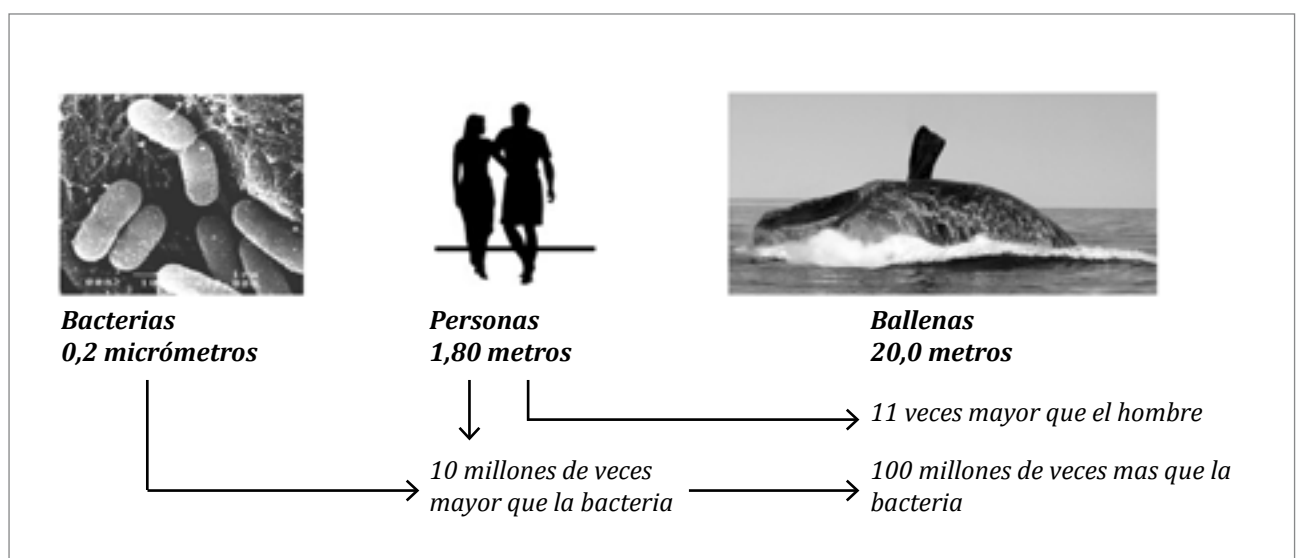
El proceso evolutivo se interpreta como un proceso de diseño de los seres vivos en un largo periodo de tiempo. Evaluando, además, que tanto los mecanismos naturales como la tecnología humana comparten el mismo planeta, por lo cual están sujetos a las mismas condiciones de presión, gravedad, temperatura, viento etc. Entonces se considera válida la hipótesis de tomar las soluciones presentes en la naturaleza como fuente de estudio para responder a nuestras necesidades, tanto en el ámbito del arquitectura como en otras áreas.

Sin embargo la influencia de los factores físicos depende en gran medida del tamaño del objeto y dentro de una escala de magnitudes los seres humanos son entre los más grandes. No sólo la mayoría de los organismos son más pequeños que nosotros, sino que, además, en la mayor parte de los grupos biológicos, la pequeñez es una condición ancestral, mientras que el gran tamaño supone mayor especialización. Los grandes fósiles son impresionantes, pero los pequeños tienen más probabilidades de llegar a alguna parte. La naturaleza empieza por lo pequeño. Básicamente, los organismos, más que estar divididos en células, están contruidos con células.

Vemos que un diseño eficaz en cosas pequeñas puede no funcionar en cosas grandes y viceversa. Esto fue observado por Galileo Galilei en la ley de los cuadrados y los cubos, en la cual se considera la relación que existe entre las magnitudes de la longitud, el área y el volumen. Evaluando la variación de escala de la longitud vemos que:

- el área aumenta según el cuadrado de la longitud;
- el volumen aumenta según el cubo de la longitud de la arista.

Esta regla propia del cubo es aplicable a cualquier objeto similar y pone en evidencia que cuando las cosas aumentan de tamaño, el volumen crece más drásticamente que el área. Por consiguiente, ser grande significa tener un gran interior respecto al exterior; y ser pequeño significa tener un gran exterior respecto al interior (Steven Vogel, 2000).



**Fig. 3** Esquema de la escala del tamaño según la longitud.

Esto, afecta el concepto de crecimiento, ya que los organismos tienen que crecer sin grandes interrupciones de sus funcionamientos. Por lo cual un adulto no puede ser y no será nunca una versión grande de un niño.

Además influye en la relación con el entorno y en particular cambian las dinámicas en las cuales actúan las fuerzas físicas que nos rodean. Los organismos pequeños tienen mayor predisposición a tomar una forma esférica u otras simples, porque son más sujetos que nosotros a fenómenos debidos a la tensión superficial. Mientras que en los animales terrestres grandes, de más volumen y por consiguiente de más peso, sienten más la fuerza de gravedad (D'Arcy W. Thompson, 1969).

### ***Aspectos morfológicos.***

Cada organismo hereda una determinada información genética. Esta contiene las combinaciones de mutaciones que se concederán favorables, según el proceso de la selección natural, por lo cual una especie ha perdurado en el tiempo.

En este contexto, el proceso de diseño tanto mecánico como funcional de un individuo respeta los conceptos de mínimo inventario y máxima diversidad en la naturaleza. Donde la variedad es el resultado de la mínima energía gastada en la interacción con las condiciones del contorno: temperatura, humedad, velocidad del viento y presión atmosférica. Por lo cual la naturaleza sigue el principio de conservación de los recursos, que también responde al principio de mínima energía a emplear.

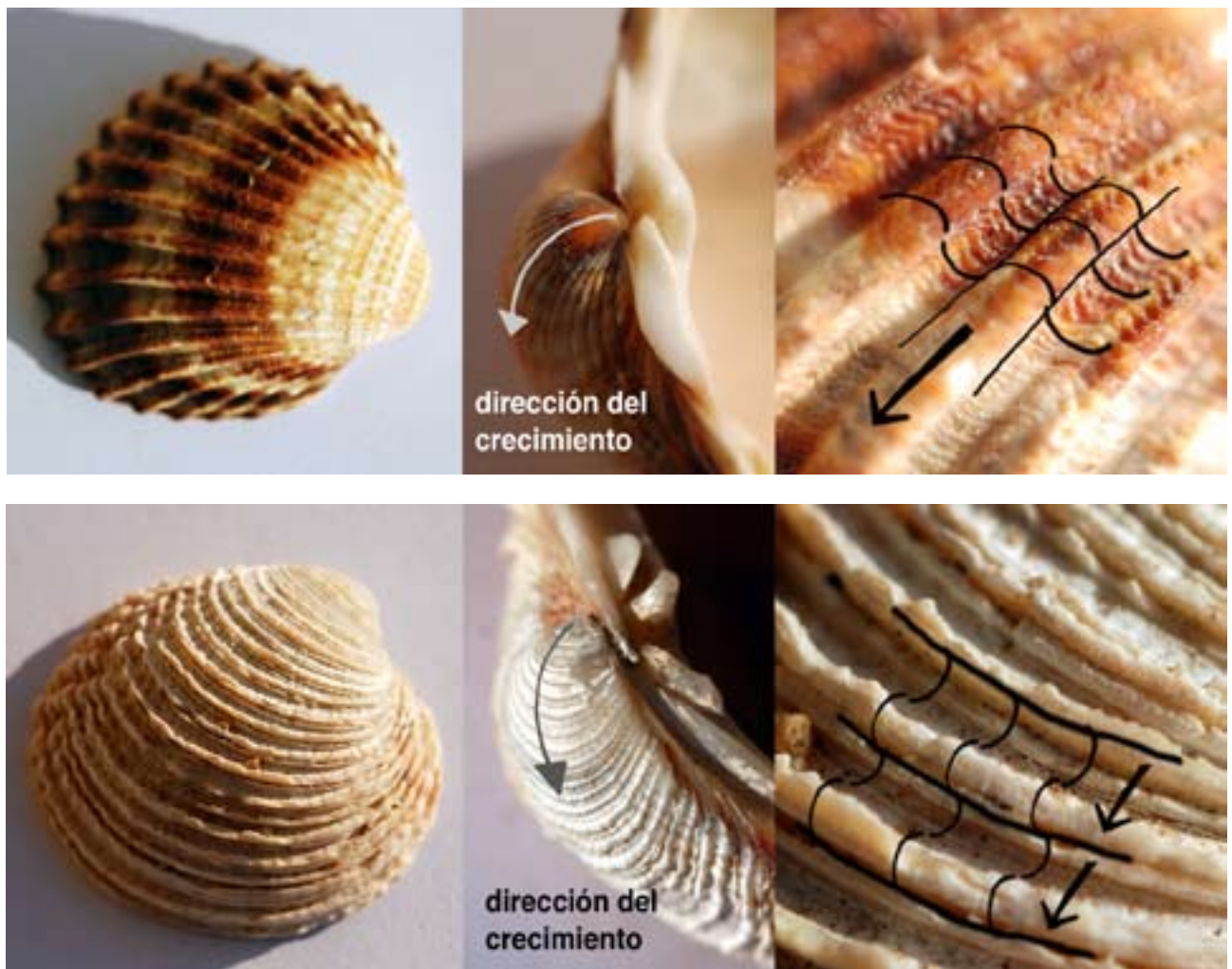
Análogamente el diseño de los sistemas naturales se interpreta también como el resultado de las fuerzas a las cuales un organismo o individuo está sujeto. Estas se representan por el factor que determina una forma dada y cualquiera estructura está determinada por la interacción de dos clases fundamentales de fuerzas:

1. las fuerzas intrínsecas que gobiernan los factores inherentes a cada partícula del sistema estructural, o sea las propiedades internas de un sistema que rigen sus posibles acuerdos y sus potenciales de rendimiento;
2. las fuerzas extrínsecas que representan las influencias externas sobre el individuo y en gran medida dependen del medio ambiente en el cual se encuentra el organismo.

Cualquier forma en la naturaleza está determinada por la interacción de estos dos grupos de fuerzas. Igualmente esta división no resulta siempre clara. En una determinada escala una fuerza se puede considerar intrínseca, pero en otro contexto más amplio la misma fuerza se puede considerar extrínseca.

Un ejemplo de cómo las fuerzas intrínsecas y extrínsecas determinan una configuración morfológica es visible comparando la estructura física de diferentes hombres según sus estilos de vida. Esto muestra como la estructura ósea o muscular de un deportista puede llegar a ser es diferente de un individuo que hace una vida más sedentaria. Por lo cual en la observación de los seres vivos, aun en la búsqueda de parámetros invariables, hay que evaluar la variabilidad de cada individuo respecto a otro de la misma especie y en función de las condiciones en las cuales se desarrollan.

(Peter Pearce «*Structure in nature: is as strategy for design*», The MIT Press Cambridge, Massachusetts, and London, England, 1978)



**Fig. 4** Ejemplos de la dirección del crecimiento de las conchas de mar mediante diferentes formas de acumulación de material, para garantizar el funcionamiento y comportamiento de la estructura respecto a la variación de tamaño.

#### 1. d Estructuras en la naturaleza.

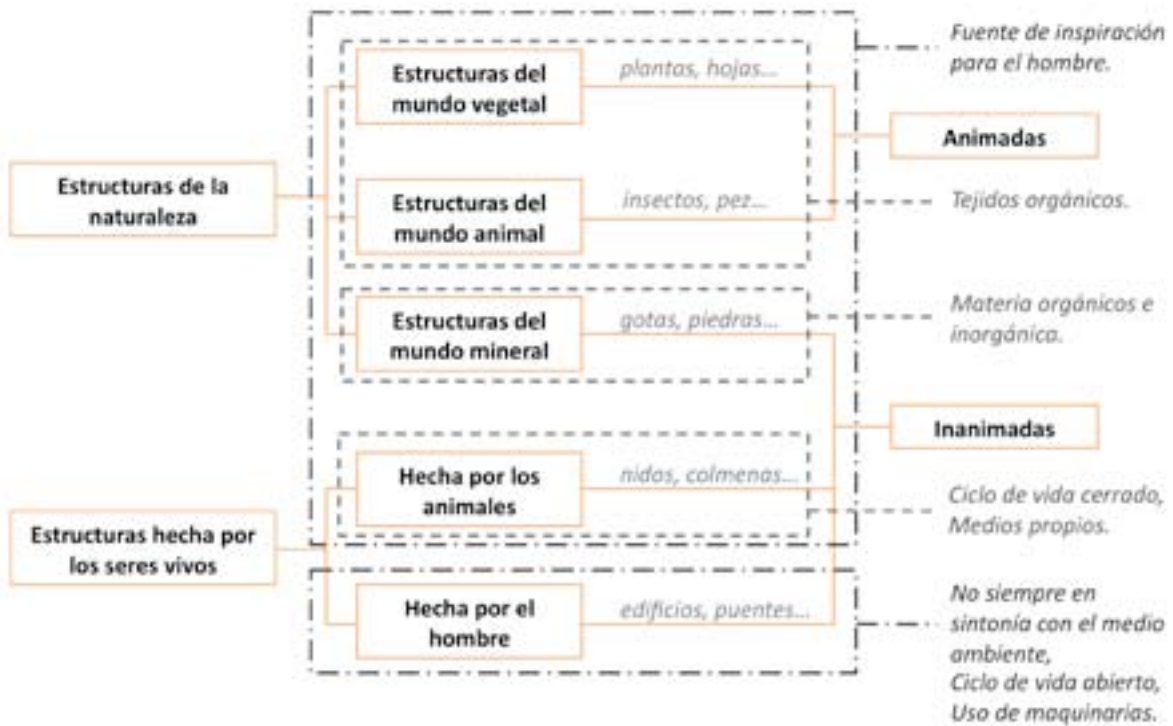
Las estructuras que encontramos en la Tierra se distinguen en dos grandes grupos: uno referente a las estructuras de la naturaleza, y otro referente a las estructuras hechas por los seres vivos. Este último a su vez es divisible en las estructuras hechas por el hombre en las cuales hay edificios, puentes, infraestructuras, etc. Y las que están hechas por los animales en las cuales hay los nidos, hormigueros, colmenas, etc. En ambos casos se produce una modificación del hábitat para responder a necesidades determinadas.

Las estructuras hechas por los animales utilizan los principios de economía en el uso de materiales locales asequibles, reciclaje, optimización de las formas o la adaptación al medio con el consecuente ahorro energético. Además son estructuras realizadas con medios





**Fig. 5** Clasificación de las estructuras presente en la naturaleza según pertenezca al mundo natural o están hecha por seres vivos y además se evidencia la diferencia el mundo animado e inanimado.



**Fig. 6** Algunas de las principales características de las estructuras presentes en la tierra en relación a la clasificación hecha en este estudio.

propios por lo cual las mayores diferencias son entre un ciclo de vida cerrado, y no abierto como en el caso de las estructuras hechas por el hombre. Además la falta del uso de maquinaria para la construcción pone en evidencia la consecuente ausencia del uso de petróleo y una importante reducción del consumo de agua.

Las estructuras de la naturaleza se dividen en inanimadas y animadas, y éstas últimas, a su vez, se dividen en las del mundo animal y las del mundo vegetal. Cada una presenta desarrollos estructurales diferentes. En particular las estructuras inanimadas o del mundo mineral, entre las cuales se encuentra el agua, las piedras o los copos de nieve, se caracterizan por ser materia orgánica e inorgánica, y según la escala de análisis varían las formas sobre las cuales actúan las fuerzas físicas, tanto externas como internas. Por ejemplo, es diferente observar el efecto de erosión del viento sobre una montaña o la estructura de las propiedades mecánicas de una formación rocosa.

Las estructuras animadas se caracterizan por estar formadas de tejidos vivos y orgánicos constituidos por un conjunto de células organizadas más o menos especializadas. Según el tamaño del organismo corresponderá un mayor o menor desarrollo de tejidos con funciones específicas y por consecuente variará la complejidad estructural correspondiente. La observación de un animal cambia al mirar su tejido óseo, el comportamiento mecánico del esqueleto y los tendones o su comportamiento general en el medio, como la aerodinámica para las aves o la fluidodinámica para los peces.

Se observa como la vida crea una tecnología adecuada para cada caso, con una gran diversidad de diseños, materiales, dispositivos e invenciones mecánicas dentro de una amplia escala de complejidad (Steven Vogel, 2000).

El análisis y observación de un organismo varía además con el medio de observación. En este estudio se ha utilizado una cámara fotográfica con objetivo macro 60 mm y un fuelle de ampliación óptica, medio suficiente para observar los tejidos vegetales pero, por ejemplo, no resultaría igualmente idóneo para el análisis de tejidos óseos. Por eso cada medio que se utiliza interactúa con la fase de observación.

En el proceso de hacer fotografías uno se acerca a un sujeto, en este caso prioritariamente del mundo vegetal, y la secuencia fotográfica lleva a la observación de diferentes elementos. Por ejemplo, si al fotografiar una flor nos encontramos con un brote aun no abierto, podemos mirar la planta para observar las diferentes fases de crecimiento de una flor. Eso nos lleva a cambiar la mirada hacia la planta vista ahora como un ser dinámico, sujeto a continuos cambios.

A continuación se propone una selección fotográfica de algunos ejemplos de estructuras naturales como flores, setas, telarañas, etc. Subrayando que la fascinación ejercida por un organismo o elemento presente en la naturaleza tiene que estar relacionada a su función y a las relaciones que tiene con las otras partes en una visión holística. Esto para que sus posibles reinterpretaciones, análisis y diseño sean correctamente fundamentadas.









## 2. El ejemplo de las plantas suculentas

En este capítulo se desarrolla la parte referente al mundo vegetal de las plantas. Iniciando por su clasificación hasta llegar a la familia de las cactáceas, propia de este estudio. En la parte final se verán con más atención las características estructurales y de crecimiento de las mismas, con particular atención a los cactus de forma cilíndrica.

### 2.a Taxonomía y evolución de las plantas.

El mundo de la naturaleza es obviamente muy vasto, por lo cual parece interesante ojear la gran variedad de «rutas» que podrían llamar nuestra atención y en el mismo tiempo dar un primer nivel de orden para saber dónde nos situamos respecto a la gran variedad de plantas existentes.

La clasificación de los seres vivos se desarrolla en diferentes niveles o escalones y ha ido cambiando a lo largo del tiempo. Es una taxonómica que se rige por una clasificación filogenética basada en las relaciones de proximidad evolutiva entre las distintas especies, reconstruyendo la historia evolutiva de los organismos y su diversificación desde el origen de la vida en la Tierra hasta la actualidad.

Se individúan ocho categorías taxonómicas según diferentes sistemas de clasificación, que sigue la estructura propia de un árbol genealógico.

*Dominios ⇒ Reino ⇒ División o Filo ⇒ Clase ⇒ Orden ⇒ Familia ⇒ Género ⇒ Especie*

Cada categoría va ramificándose en otras desde la primera de los 3 dominios hasta las especies. En el presente estudio se irá desarrollando un recorrido hacia las plantas suculentas dejando de lado las otras categorías, con el objetivo de individuar las dos especies que se han usado como fuente de observación en este estudio:

- *Echinopsis atacamensis* (nombre común: cardón),
- *Opuntia ficus-indica* (nombre común: tuna).

Ambas especies pertenecen a la familia de las cactáceas y su evolución en la división taxonómica de las plantas tiene un largo recorrido común.

A partir de la década de 1990, el análisis de ADN ha modificado la clasificación respecto a una investigación que permite acomunar las plantas respecto a las características genéticas de las mismas. Esto define la unión en grupos diferentes según clados, y se considera que la evolución cladística sucede lentamente, un paso a la vez. Además se supone que los cambios ocurren sólo una vez siguiendo el principio de parsimonia. De acuerdo a este principio se minimiza el número de cambios y la explicación más simple es la que tiene más probabilidades de tener razón. Por lo tanto, mediante la combinación del análisis morfológico y filogenético tenemos la oportunidad de obtener información sobre la evolución de las especies tanto de carácter divergente como convergente (A. Altesor y E. Ezcurrawz, 2003).





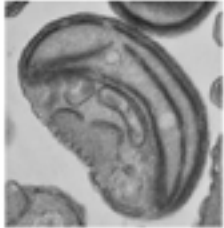


**Fig.1** Fotografía del cactus cardón (*Echinopsis atacamensis*) en su hábitat natural, se nota la forma arbolada de la planta y sus flores blancas de unos 10÷14 cm de largo y su abertura dura entre las 18 y 40 horas. Pueblo de Humahuaca, provincia de Jujuy, Argentina, Noviembre 2007.



### 2.a.1 Tres Dominios

El actual primer nivel de la clasificación fue propuesto en el 1990 por el microbiólogo estadounidense Carl Woese (nacido el 15 de julio de 1928). Sus estudios filogenéticos en 1977 lo llevaron al descubrimiento del nuevo dominio Archaea hoy aceptado, por lo cual elevó las categorías a tres respecto de la anterior división en dos dominios, basada en la características celulares de los organismos (eucariotas y procariotas).

Tres Dominios	Descripción	Foto	Tipo
Bacteria	Son microorganismos unicelulares con un tamaño de algunos micrómetros de largo, son de diversas formas como esferas, barras y hélices. Son procariotas, por lo tanto, a diferencia de las células eucariotas, no tienen núcleo ni orgánulos internos. Muchas bacterias disponen de flagelos o de otros sistemas de desplazamiento y son móviles.		Organismos procariotes
Archaea	Son un grupo de microorganismos unicelulares procariotas que carecen de núcleo celular o cualquier otro orgánulo dentro de las células. Se las clasifica como un dominio distinto por su historia evolutiva independiente y sus diferencias bioquímica respecto al resto de formas de vida.		
Eukarya o Eukaryota	Estos organismos constan de una o más células eucariotas, abarcando desde organismos unicelulares hasta los pluricelulares en los cuales las diferentes células se especializan para diferentes tareas y que, en general, no pueden sobrevivir de forma aislada.		Organismos eucariontes

**Tabla 2.1** Descripción de los Tres Dominios presentes en la naturaleza. Fuente de las fotos Wikipedia.

### 2.a.2 Reinos

Del dominio de los organismos eucariontes se pasa a las vastas subdivisiones en que se consideran distribuidos los seres vivos, los reinos. En la actualidad se encuentran divididos en cuatro categorías: Animalia (animales), Plantae (plantas), Fungi (setas) y Protistas. Las primeras tres agrupan organismos que se caracterizan por sus caracteres filogenéticos comunes, mientras en el último se encuentran todos aquellos organismos eucariontes que no pueden clasificarse dentro de alguno de los otros tres. Esta categoría es muy interesante porque abarca numerosos organismos estudiados y tomados en referencia en el ámbito de la arquitectura como la Radiolaria.

En el reino de las plantas se agrupan los organismo multicelulares con células vegetales de tipo eucariota y organizados de forma que las células posean al menos cierto grado de especialización funcional.

### Características principales:

- Son organismos autótrofos, o sea son capaces de elaborar su propia materia orgánica a partir de sustancias inorgánicas (aire, agua, tierra).
- Desarrollan la fotosíntesis, la particular reacción química que le permite obtener la energía para realizar todas sus actividades. Las plantas así definidas obtienen la energía de la luz del sol, que captan a través de la clorofila, presente en los *cloroplastos* de las *células vegetales* más o menos especializadas para esto. Con esa energía y mediante el proceso de fotosíntesis convierten el dióxido de carbono y el agua en azúcares.
- Son organismos de crecimiento indefinido ya que, a diferencia de los animales, continúan creciendo a lo largo de toda su vida.
- No tienen capacidad motora, exploran el medio ambiente que los rodea normalmente a través de órganos especializados como las raíces. Estas permiten absorber aguas y otros nutrientes esenciales utilizados para construir proteínas y otras moléculas que necesitan para subsistir.

En referencia al reino de las plantas, siguen abiertas opiniones diferentes respecto a la clasificación de otros organismos actualmente comprendidos entre los protistas. Una definición sintética de las plantas es que son organismos pluricelulares y autótrofos, pero hay una tendencia a querer ampliar el reino a los organismos unicelulares autótrofos. Por lo cual los límites resultan matizados como sucede en el caso de las algas verdes. Estas harían parte del reino de las plantas porque contienen clorofila como las plantas terrestres. Por la cercanía filogenética se consideran las antepasadas de unas plantas terrestres. La hipótesis es que las algas verdes salieron de las aguas dulces de los ríos hace 400 millones de años atrás y colonizaron la superficie de la tierra.



**Fig. 2** Foto de la vegetación en el sendero Barra de Ferro en L'Esquirol, provincia de Vic, mayo 2010.

### 2.a.3 División (phylum)

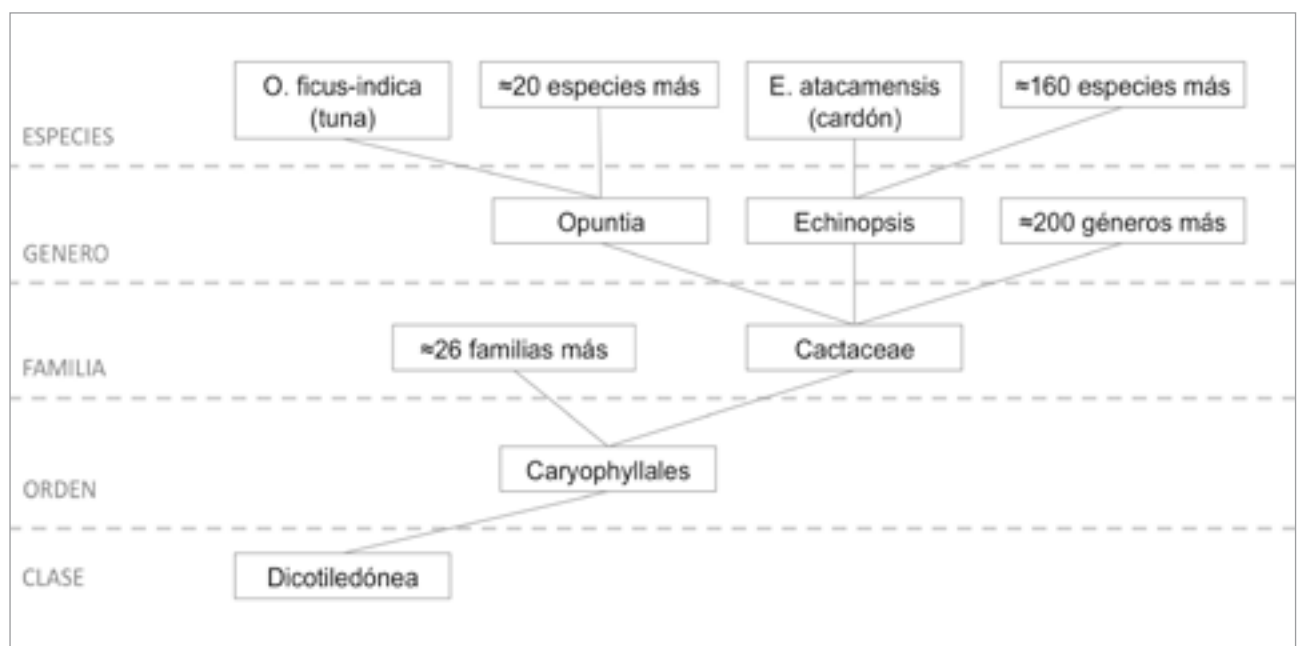
En esta categoría vemos que el reino de las plantas empieza a tener gran diversificación. Principalmente se pueden distinguir dos tipos: las plantas no vasculares y las vasculares, donde se reconocen las estructuras especializadas en raíces, tallos y hojas. De estas últimas la mayor diferencia se reconoce entre las que tienen o no flores, esto indica una diversificación respecto al sistema reproductivo de las plantas.

La cactáceas se individualizan en la división de las plantas Angiospermas o Magnoliophyta, según la tabla 2.2 adjunta, y que en la actualidad constituyen la categoría más amplia de las plantas terrestres.

### 2.a.4 Clase

Por la finalidad de este estudio se ha decidido utilizar el sistema de clasificación de Cronquist (1981 y 1988) con la división de las Angiospermas en dos grandes grupos: las Dicotiledóneas y Monocotiledóneas. Aunque con el nuevo sistema AGP II del 2003 (Angiosperm Phylogeny Group) del análisis filogenético se individualizan un número mayor de clases para las plantas terrestres. Las plantas suculentas, y en particular las cactáceas, se encuentran en la categoría de las Dicotiledóneas (o Magnoliopsida). Esta está formada por 5 grupos monofiléticos, el mayor de ellos llamado Eudicotyledoneae, al cual pertenecen también los cactus. Y que representa uno de los clados más grandes de las Angiospermae, conteniendo quizás unas 145.000 especies en más de 350 familias (casi el 70% de la diversidad de las angiospermas) con una enorme variabilidad en sus características morfológicas, anatómicas y bioquímicas.

De la clase de las Dicotiledóneas pasamos al orden Caryophyllales compuesto por 27 familias entre las cuales se encuentran las cactáceas, a su vez compuesta por más de 200 géneros de cactus con aproximadamente 1.500-1.800 especies distribuidas en toda la América del Norte y del Sur.



**Fig.3** Esquema de los clados desde la clase dicotiledónea hasta las especies de los cactus *Opuntia ficus-indica* (tuna) y *Echinopsis atacamensis* (cardón).















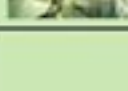
División	Foto	Descripción	Cuerpo vegetal	Tejido conductor	Reproducción y semillas
Charophyta		son dos divisiones de algas verdes y comprenden unas 10.000 especies	<b>Talofite:</b> cuerpo constituido por el tallo sin estructuras especializadas como raíces y hojas.	Ausente, son plantas no vasculares	<b>Criptógama:</b> son plantas sin flores y por extensión son aquellas cuyos aparatos de reproducción no eran visibles a simple vista. Y su propagación es por medio de esporas.
Chlorophyta		su mayoría acuáticos fotosintéticos y contiene tanto especies unicelulares como pluricelulares			
Anthocerotophyta		su nombre deriva de sus cápsulas alargadas, unas estructuras que sostienen las esporas. Hoy se conocen unas 100 especies.	<b>Bryophyta sensu lato:</b> fueron entre las primeras en colonizar los espacios terrestres y evolucionar hace 420 millones de años. Crecen en climas fríos o muy húmedos.	Plantas vasculares también dicha traqueófitas	
Bryophyta sensu stricto		Son los musgos y cuentan con unas 20.000 especies distribuidas por el planeta.			
Marchantiophyta o Hepaticophyta		Las hepáticas comprenden unas 7.000 especies en todo el mundo con predilección para las zonas húmedas.			
Lycopodiophyta o Lycophyta		Son privas de órganos reproductivos visibles, y se componen de unas 1.000 especies.			
Psilophyta o Psilotaceae		Con una estructura muy simplificada sin raíces, hojas reducidas, y tallo ramificado.			
Pteridophyta o Pterophyta		Helecho: son las plantas desarrolladas en la división de tallo, hojas y raíces.	<b>Embryophyta</b> o "plantas terrestres" son las descendientes de unas algas verdes, y se caracterizan por poseer unas adaptaciones para la vida fuera del agua, y por lo tanto, son las responsables de la colonización de la tierra por parte de las plantas. Este clado comprende a todas las plantas terrestres:	Gymnospermae: son plantas espermatofitas productoras de semillas. Su nombre es "semilla desnuda" ya que estas se encuentran vistas en las escamas de los conos.	
Ginkgophyta o Ginkgoaceae		Es la planta de semillas vivas más antiguas (era Mesozoica) y hoy existe una sola especie, originaria de China.			
Cycadophyta		Su origen se remonta a más de 230 millones de años, con unas 360 especies con 11 géneros y 3 familias.			
Pinophyta o Coniferophyta		Coníferas: son árboles o arbustos están divididas en 8 familia, cuenta con unas 600+650 especies.			
Gnetophyta		Con una protección de las semilla parecida a los frutos, comprende 3 familias, cada una con un solo género.			
Magnoliophyta		Es una división muy amplia a la cual pertenecen mas de 250.000 especies. Son en la actualidad las plantas más difundidas en todo el planeta.			Angiospermas: son plantas espermatofitas productoras de flores y semillas. El termino significa "semilla envasada" ya que se desarrollan al interior de los óvulos.

Tabla 2.2 División o phylum de las plantas y sus características comunes. Fuente de las fotos Wikipedia.



## 2.b La familia de las cactáceas.

Los cactus muestran notables adaptaciones morfológicas y fisiológicas a la sequía, por su adaptación a climas áridos. Además se encuentran expuestos a unas de las radiaciones solares más espectaculares del mundo y a una elevada excursión térmica diaria, por las condiciones climáticas de las zonas en las cuales crecen, como las de los desiertos.

Por lo cual la mayoría de los cactus están adaptados a vivir en ambientes secos en al menos cuatro formas:

1. por medio de la fotosíntesis realizada con sus tallos, en vez de las hojas;
2. por tener espinas que protegen el agua almacenada y que también cumplen la función de fotosíntesis;
3. mediante el almacenamiento de agua, cuando es disponible, en los tejidos más profundos de sus tallos como adaptación para evitar la pérdida de agua por transpiración y para acumularla durante los períodos favorables;
4. mediante el uso de una forma morfológica que conserva el agua de la fotosíntesis.

Además las cactáceas se caracterizan por tener una pared celular más espesa, respecto a otras especies, dadas las condiciones climáticas a las cuales se han adaptados y la necesidad de retener líquidos.



**Fig. 4** Croquis de la variedad de formas que pueden tener las plantas crasas.

Fuente: <http://www.cactuscenterclub.com/Articulos/Neotenia/Images/neotenia1.jpg>

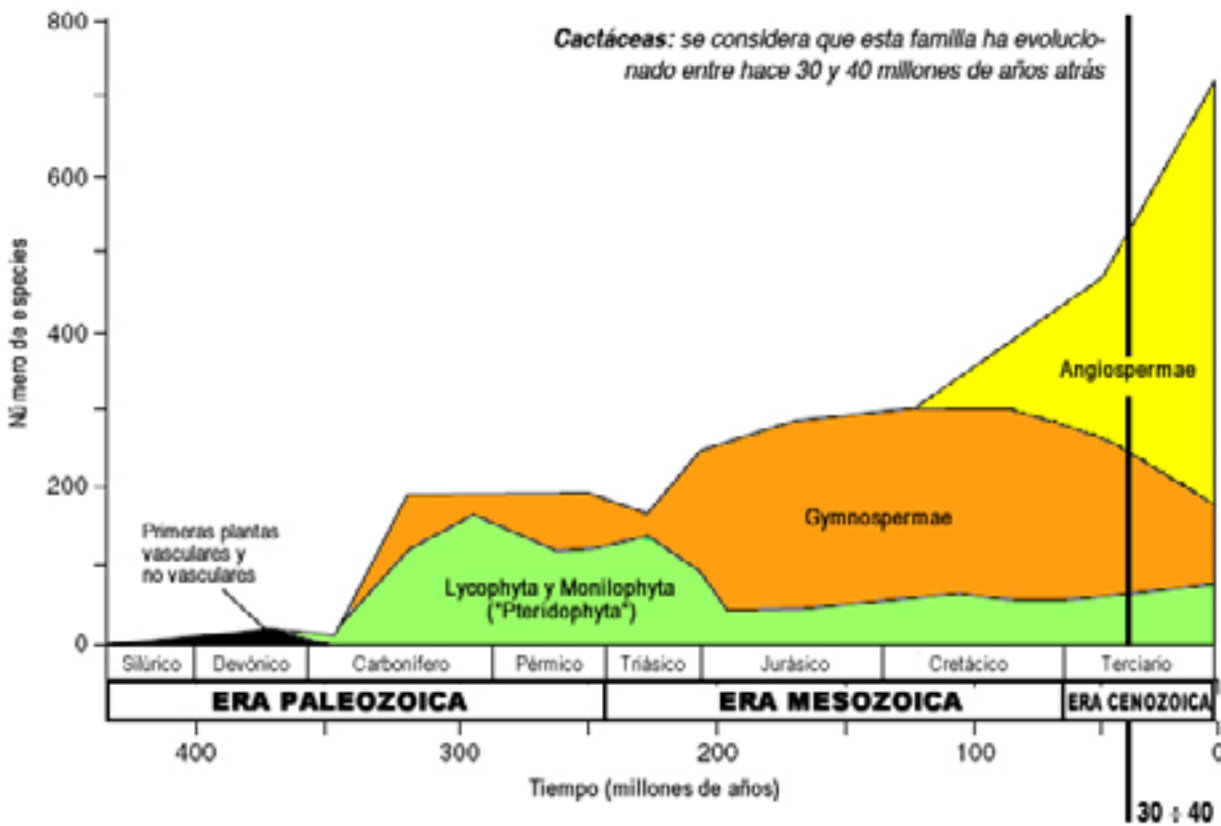
Otra característica notable es la gran variedad de formas y tamaños que pertenecen a la familia a lo largo de su extensión geográfica por todo el continente americano. Está representada por ejemplares arborescentes como el cardón, o arbustivas como la tuna, ambos con tallo suculento; pero también se encuentran individuos con tallo leñoso y hojas suculentas. Las plantas de tallo suculento pueden articularse en formas planas, cilíndricas, arboladas o globosas, tener o no espinas distribuidas uniformemente alrededor del tallo o costillas longitudinales.

**2.c Evolución de las cactáceas.**

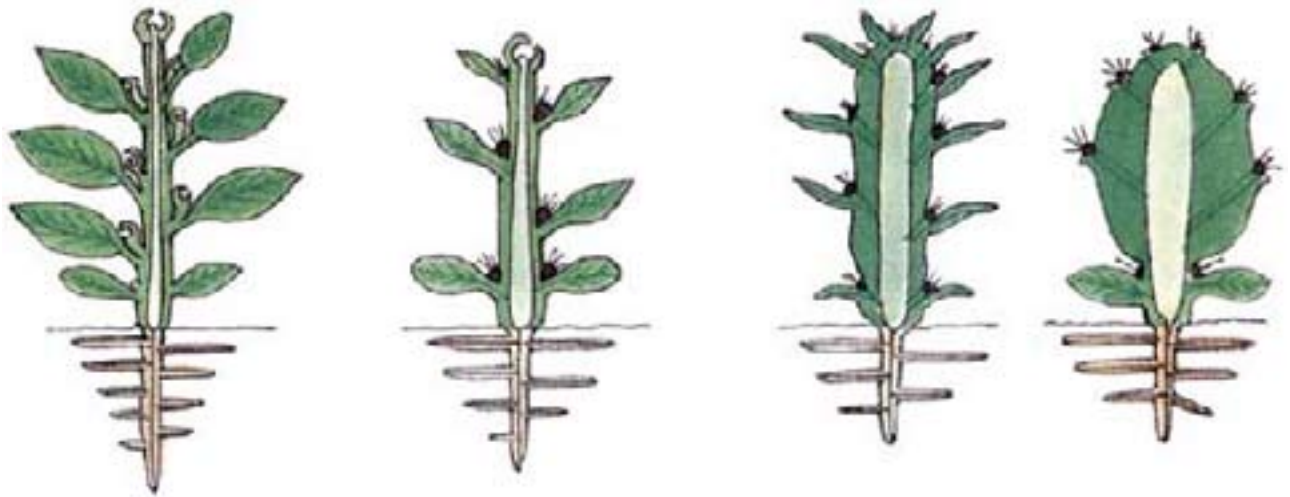
En los registros fósiles más antiguos, las primeras plantas vasculares datan de 400 millones de años atrás. Luego, al final del Devónico, en la era Paleozoica, predominan plantas como, por ejemplo, los helechos, división dominante hasta hace unos 300 millones de años, al final del Triásico. Las primeras plantas con semilla aparecieron en el Devónico tardío, y eso llevó a la flora del Mesozoico dominada por las plantas gimnospermas.

Los fósiles más antiguos de las angiospermas datan aproximadamente de hace unos 140 millones de años, al principio del Cretácico, de la era Mesozoica. El número de especies encontrado aumenta de forma llamativa con el tiempo geológico de la era Cenozoica, en comparación a las otras plantas no angiospermas. Se diversificaron rápidamente desde hace unos 100 millones de años, llegando a dominar el globo con la acepción de las regiones polares. Hace unos 65-75 millones de años, ya existía la mayor parte de las familias de angiospermas que conocemos hoy en día, e incluso algunos de los géneros actuales.

Desde que las primeras plantas acuáticas salieron a la superficie para adaptarse al aire, la evolución de las cactáceas, sobre la superficie de la tierra, data aproximadamente entre 30 y 40 millones de años atrás. Esta familia se considera autóctona de las Américas. Por lo cual nos situamos a cuando el continente americano estaba unido a los demás, pero se fue separando progresivamente por la deriva continental. Las especies endémicas del Nuevo Mundo debieron desarrollarse después de esta separación y esto podría explicar la inexistencia de cactus endémicos en África, que evolucionaron en América cuando los continentes ya se habían separado.



**Fig. 5 Registro fósil de los diferentes clados de las plantas vasculares.** Nótese la intensa radiación de las angiospermas en comparación con los helechos y gimnospermas. Dibujado y traducido a partir de Willis y McElwain (2002). Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Magnoliophyta>



**Fig. 6** Esquema de la evolución y su adaptación de las plantas a climas secos mediante la transformación de las hojas en espinas y del tallo leñoso en suculento.

Fuente: <http://www.cactuscenterclub.com/Articulos/Neotenia/Images/neotenia2.jpg>

Igualmente un caso en la evolución de los seres vivos es la convergencia o desarrollo paralelo. *«A menudo, la naturaleza hace lo mismo en varias especies diferentes. Esta convergencia incluye varios casos verdaderamente notables. Unas plantas carnosas, espinosas y sin hojas se desarrollaron en el desierto del Viejo Mundo dentro de una familia, la euforbiáceas (...); y otras plantas similares se desarrollaron en los desiertos americanos dentro de otra familia, la cactáceas. Los antepasados más recientes de las cactáceas y de las euforbiáceas no eran carnosas, espinosas, ni carecían de hojas: son realmente convergentes. (...) un buen diseño es un buen diseño, y no debe sorprendernos que diferentes especies sean empujadas en direcciones similares por la selección natural. La convergencia nos enseña mucho sobre los caracteres funcionalmente importantes, puesto que todo lo que converge debe establecer una diferencia en el éxito reproductor»* (Steven Vogel, 2000).

Observando la estructura de plantas vasculares no suculentas vemos que se pueden dividir en tres partes, cada una con una función específica:

- las raíces que permiten la fijación a tierra y la absorción del agua y las sales minerales presentes en el terreno;
- el tallo (o tronco) que sostiene la planta en su desarrollo vertical y permite el transporte de diversas sustancias entre las raíces y las hojas en el proceso de la fotosíntesis;
- la hoja, órgano especializado para la fotosíntesis y la transpiración, fundamental para el ascenso de la savia cruda en los vasos de la planta.

En el caso de las plantas crasas, esta separación no resulta ser tan clara. Las hojas se han reducido a espinas y el trabajo de fotosíntesis se desarrolla en el tallo. En éste se concentran la mayoría de las funciones vitales, como almacenar una gran cantidad de agua en las épocas favorables del año.

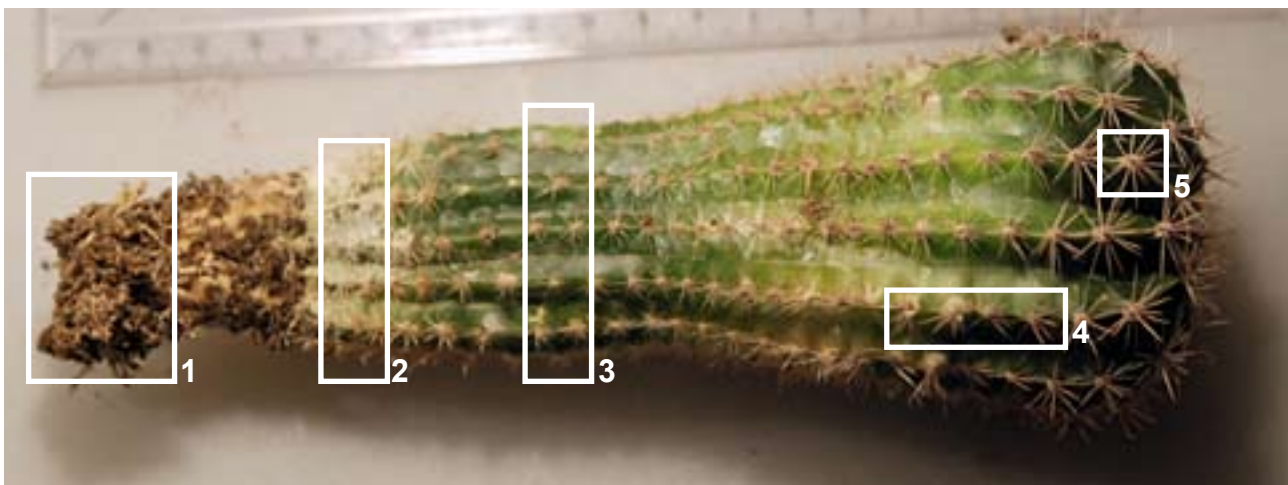
Con los cambios del hábitat, en el cual vivían unas plantas en principio no suculentas, modificaron sus caracteres morfológicos y fisiológicos que le han permitido adaptarse a climas áridos como puede ser el desierto o los altiplanos andinos.

## 2.d Caracteres morfológicos de los cactus con tallo suculento.

### 2.d.1 Tallo y areolas

La corteza y la médula proporcionan un gran volumen de materiales para almacenar alimentos y agua. Una gruesa cutícula cerosa cubre la epidermis y limita la pérdida de agua.

Los tallos pueden ser columnas simples, o pueden derivarse en brotes laterales ya cerca del nivel del suelo o lejos por encima de ellos. La superficie del tallo puede ser lisa, pero es más comúnmente cubierta con tubérculos, o más exactamente en filas continuas de tubérculos, formando las que se denominan costillas. Los tubérculos representan la sublimación de las ramas que en tiempos pasados tenía la planta. Cada tubérculo tiene una areola desde las cuales crecen las espinas, que son las hojas modificadas.



**Fig.7** Partes que componen la plantas y caracterizan su morfología exterior: 1. raíces - 2. transición de las raíces a tallo - 3. tallo suculento - 4. Secuencia de tubérculos que forma una costilla - 5. areolas y espinas. Foto abril 2010.

De las areolas crecen los nuevos brotes y eventualmente pueden diferenciarse en flores y frutos en función de la presencia o ausencia de adecuados estímulos ambientales. Las flores son distintivas por sus ovarios que se encuentran profundamente incrustados en el ápice del tallo modificado, por lo que la parte exterior de un ovario está cubierta por la areola del cactus.

Las areolas se encuentran sólo en los cactus y la eliminación de las espinas sólo causa daños superficiales a la planta. La distancia entre las areolas define la distancia entre los entrenudos de la planta desde los cuales salen los brotes. Todos los miembros de la familia cactácea producen dos tipos diferentes de tallos llamados «tallos largos» y «brotes cortos». Un tallo largo no es más que un tallo con largos entrenudos. Mientras los brotes cortos son tallos con entrenudos más cercanos. En los cactus, los brotes cortos se han reducido a sólo un punto en el tallo largo.

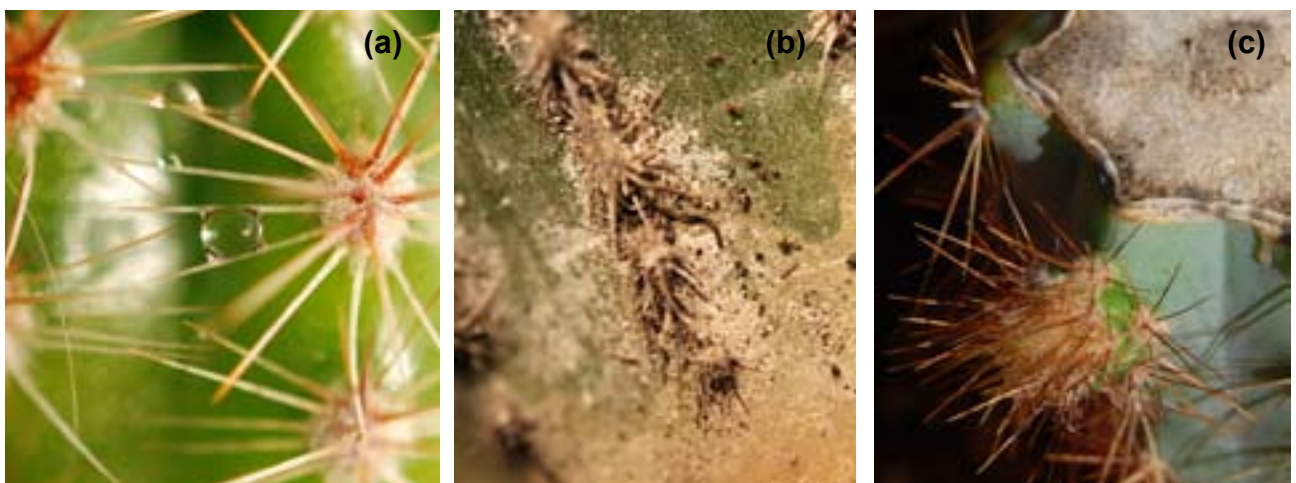
### 2.d.2 Las Espinas

Las Espinas son consideradas como hojas modificadas, y están siempre situadas en las areolas. En la mayoría de los casos se pueden distinguir dos formas de espinas: las espinas



centrales que se encuentran cerca del ápice de la areola, y las espinas radiales que crecen alrededor de la circunferencia de la areola.

Las espinas tienen importantes beneficios para los cactus. Las espinas centrales son generalmente largas, fuertes, rígidas, de colores brillantes y permiten disuadir a los herbívoros, que pronto aprenden a mantenerse alejados de las espinas de color brillante. Las espinas radiales son delgadas, flexibles y con frecuencia son blancas. Éstas reflejan la luz del sol lejos de la planta, reduciendo el daño debido a la radiación solar en exceso. Además todas las espinas proporcionan sombra a la planta. Otra función importante que cumplen las espinas se observa durante una ligera lluvia o con niebla, cuando el agua se acumula y se condensa en gotas en la punta de cada una. La dirección de las espinas dirige el agua hacia abajo y se deposita en la superficie del suelo, justo por encima de las raíces poco profundas.



**Fig.8** En las imágenes se observan: (a) la función de retener el agua por parte de las espinas; (b) transición desde las raíces con un tallo leñoso al tallo succulento; (c) la capacidad de cicatrización de la planta y de generar nuevos brotes que salen desde las areolas. Fotos febrero/junio 2010.

Los miembros de la subfamilia Opuntioideae, como la tuna, poseen espinas distintivas llamadas gloquidios, un especie de pelo o barba que crece de las areolas. Tienen sólo unos pocos milímetros de longitud, son delgados, frágiles y poseen púas finas, que sólo pueden verse con la ayuda de un microscopio. Como se desprenden fácilmente de la planta y se pegan a la piel por lo cual pueden ser muy dolorosas y difíciles de quitar.

### 2.d.3 El sistema de raíces

Por lo general, el sistema de raíces de cactus es muy poco profundo y muy extendido, lo que les permite aprovechar en horizontal el agua depositada en los estratos superficiales del terreno durante cortos períodos de lluvia. Además del sistema con poca profundidad, en los cactus columnares se encuentran ramificaciones de raíces primarias más largas que penetran en las capas más profundas del suelo. Estas raíces primarias ayudan a la planta a obtener más nutrientes y llegar a aguas más profundas.

### 2.d.4 Las costillas

Como se ha visto en apartados anteriores, por la necesidad de almacenar agua la selección natural a llevado las plantas succulentas a tener una gran masa de tejido (de parénquima)

no especializado sostenido mecánicamente por una limitada cantidad de haces vasculares organizados en una configuración biomécanica específica.

Si consideramos que en término medio los cactus están compuestos por un 90% de agua, observamos que esta plata vascular respecto a las otras usa poco tejido estructural leñoso para apoyar su estructura masiva. Esto resulta más contundente en las cactáceas con forma columnar o arbolada donde predomina el crecimiento en vertical.

En este sentido mirando la sección transversal de un cactus vemos que en muchos casos su forma es estrellada y las puntas corresponden a las costillas de la planta. El número de costillas puede variar según la especie y la edad del individuo; pueden ser más redondeadas o más puntiaguda. Pero, en cualquier caso, siendo un organismo vivo, vemos que en la naturaleza el pasaje de cóncavo a convexo es gradual, son ausentes ángulos puntiagudos y la superficie se percibe como continua.

Cualquiera sea el número de costillas, éstas serán proporcionales al tamaño de la planta y servirán para dar una mejora al soporte mecánico. En particular podemos observar un estudio del Center for Turbulence Research (CTR) del 2001 sobre el comportamiento al



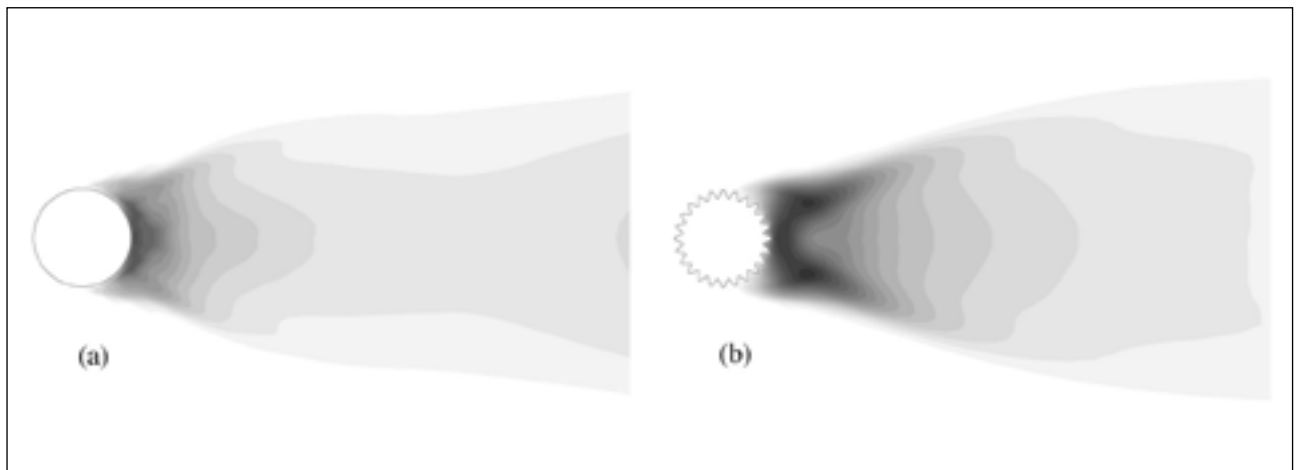
**Fig.9** A la izquierda se observa la planta en su crecimiento hacia arriba por medio de la producción de más tejidos las costillas van abriéndose desde el eje central hacia arriba como desenrollándose. A la derecha es visible el cambio morfológico a la base del tallo por el cambio del número de las costillas debido al aumento de tamaño de la planta. Foto abril 2010.

viento de cactus arbóreos expuestos a fuertes ráfagas por su contexto climático. Estas plantas del desierto tienen una forma cilíndrica, modificada en una superficie geométrica compleja. Debido a que la forma de un objeto influye en el flujo de aire circundante, se hace la hipótesis que la selección natural puede favorecer configuraciones morfológicas que reducen las fuerzas ejercidas por las ráfagas de viento en su hábitat. Por lo cual la morfología de las cavidades en V de altos cactus y de las espinas longitudinales puede funcionar para reducir las fuerzas del viento y afectar la fuerza de las fluctuaciones causadas por posibles vórtices.

Para que el viento sea un agente selectivo, se tiene que evaluar hábitats con altas velocidades del viento de tal forma que esta condición afecte al éxito reproductivo de la planta y, así,

actuar sobre el proceso evolutivo de la planta. Además se recuerda *«que el proceso evolutivo de mutaciones al azar seguida de una selección a favor o en contra de esas mutaciones es un mecanismo de formación continua sobre los organismos. Al ser productos de su entorno, los organismos están equipados con las adaptaciones que les permiten hacer frente a las presiones ambientales de su hábitat.»* (CTR 2001 «An experimental and computational investigation of flow past cacti»)

Según los resultados preliminares las cavidades en forma de V proporcionan un efecto de amortiguación de las fuerzas fluctuantes del viento permitiendo una reducción de la resistencia. Evaluando también que los cactus tienen raíces poco profundas por lo cual su fijación en el terreno es menor. Esto nos muestra como *«la selección natural actúa sobre las mutaciones de las estructuras existentes al azar (rasgos) encontrando resultados en mejores estructuras, estructuras nuevas y/o múltiples funcionalidades de las estructuras existentes. Por lo tanto, una función de un rasgo no excluye necesariamente otras funciones, y muchos rasgos pueden contribuir a una función común»* (CTR 2001 «An experimental and computational investigation of flow past cacti»). Sobretudo si consideramos que se encuentran varias hipótesis sobre la función de las costillas y las espinas del cactus, y el significado adaptativo de las funciones propuestas sigue abierto a diversas especulaciones.



**Fig. 10** Según unos resultados preliminares sobre el comportamiento a viento de cactus arbóreo las cavidades en forma de V entre las costillas proporcionan un efecto de amortiguación de las fuerzas fluctuante del viento permitiendo una reducción de la resistencia. La imágenes muestran el tiempo promedio de energía cinética turbulenta en dos modelos según sus relación entre la profundidad de la cavidad L y el radio interior R: (a)  $L/D=0$  y (b)  $L/D=0,105$ . Fuente: autores varios, "An experimental and computational investigation of flow past cacti", Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs 2001.

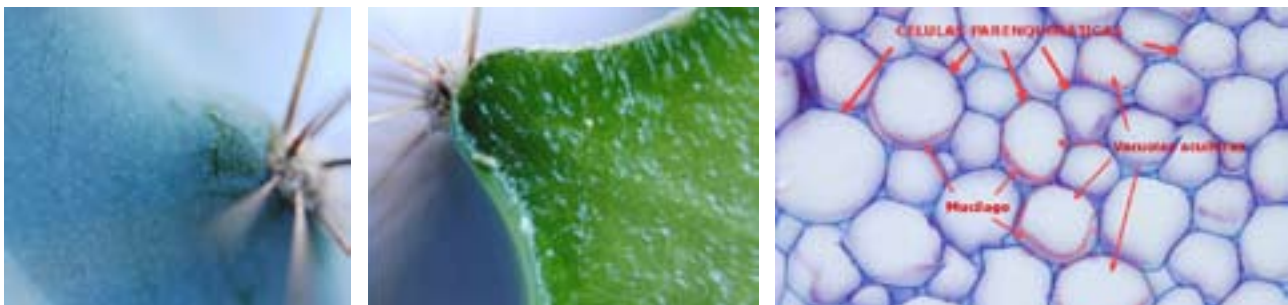
## 2.e Fisiología de los cactus con tallo suculento

En general las condiciones climáticas en las cuales viven los cactus se caracterizan por ser lugares:

- muy secos y calurosos, por lo cual la planta debe ser capaz de sobrevivir largos períodos sin agua siguiendo los principios de economía y eficiencia;
- con una radiación solar intensa y altas temperaturas que la planta necesita tolerar;
- con una elevada excursión térmica entre día y noche, por lo cual la planta debe soportar no sólo temperaturas elevadas, sino también bajas.

Por lo cual los cactus han desarrollado diversas funciones y capacidades que contribuyen a responder a estas condiciones:

- Son plantas de **crecimiento muy lento**, en consecuencia, sus necesidades de agua por unidad de tiempo es baja.
- Tienen **tejidos** epidérmicos e interiores formados con células cuya función es el almacenamiento de agua.
- Tienen un uso **eficiente del agua** respecto a la pérdida por transpiración en relación con la cantidad de dióxido de carbono que pueden recoger y fijar en compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis. La mayoría de las plantas desarrollan la fotosíntesis durante el día, cuando abren sus *estomas* para permitir la difusión del dióxido de carbono en la hoja. Inevitablemente, esto también permite que el agua saturada en el aire que rodea el tejido fotosintético se difunda hacia el exterior. En la noche, cuando la fotosíntesis se detiene, los estomas se cierran con el fin de detener la pérdida de agua. A diferencia de otras plantas, los cactus tienen un metabolismo fotosintético particular que se denomina **fotosíntesis CAM** (*Crassulacean Acid Metabolism*). Esto les permite la asimilación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y la transpiración durante la noche cuando la temperatura es más baja y la humedad más alta. Por lo tanto se reduce la pérdida de agua por transpiración y la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido es más elevada respecto a la cantidad de agua disponible. Eso determina una mayor eficiencia del uso del agua, o sea un menor coste en términos de agua necesaria para que la planta pueda cumplir sus funciones vitales.
- Son plantas capaces de sobrevivir después de una considerable pérdida de agua. Suelen perder el 60% de su agua antes de un estrés fisiológico significativo, mientras que la mayoría, en cambio, mueren con una pérdida del 20%.
- Tienen mecanismos para sellar rápidamente los tejidos heridos reduciendo la pérdida de agua. En ambientes áridos, los cactus no pueden invocar la lluvia o la humedad del aire o del suelo para compensar esta pérdida. Sin embargo, los cactus producen unas biomoléculas especiales y viscosas que cubren la herida con una capa impermeable que evita una mayor pérdida de agua. Existe también otro mecanismo de sellado mediante la producción de una capa de corcho resistente al agua alrededor del tejido herido.



**Fig.10** En las imágenes se observa a la izquierda la espesa epidermis de los cactus. En el centro los tejidos de las células parenquimales de almacenamiento de agua de color verde claro y en el borde las células fotosintéticas más oscuras. Fotos febrero 2010. A la derecha corte en microtomo de congelación del tejido parenquimático del cactus teñido con safranina / azul alción. Las células parenquimáticas que almacenan agua son grandes, de paredes delgadas y con una gran vacuola donde se acumula el agua. En el citoplasma o en la vacuola hay mucílagos, conjunto de sustancias que aumentan la capacidad de absorción y retención de agua. Fuentes: [http://webs.uvigo.es/mmegias/1-vegetal/v-imagenes-grandes/parenquima\\_acuifero\\_todo.php](http://webs.uvigo.es/mmegias/1-vegetal/v-imagenes-grandes/parenquima_acuifero_todo.php)



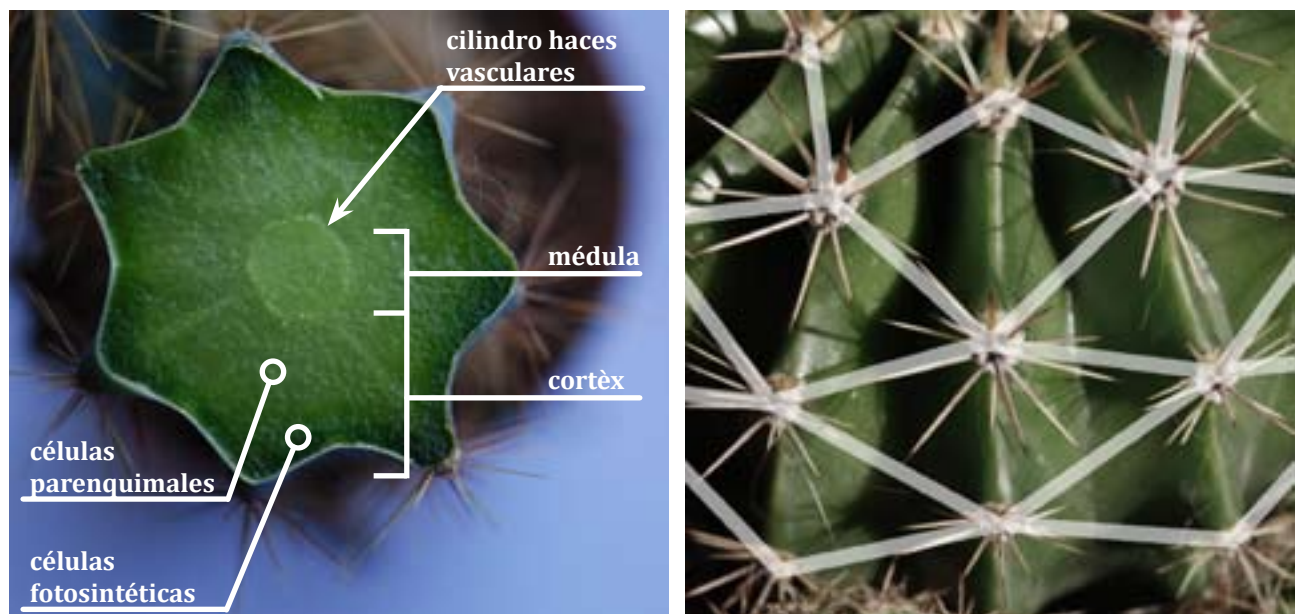
- Tienen mecanismos para reducir la exposición a la luz solar, entre los cuales son muy importantes las espinas radiales que dan sombra a la planta. Muchos cactus columnares tienen pelos blancos como la nieve que cubren todo su cuerpo. Además para reducir el recalentamiento muchas especies poseen un recubrimiento de cera de color claro para reflejar más la luz.
- Para la adaptación al frío, la planta puede recurrir a una savia glutinosa de color más oscuro o tener una menor cantidad de espinas para absorber más calor por radiación. Son las estrategias principales que permiten a especies como el cardón crecer a grandes altitudes y mantener su temperatura interior sin perder demasiado calor.

## 2.f Estructura y crecimiento de los cactus con tallos suculentos.

### 2.f.1 Variables morfológicas

Casi todas las plantas vasculares pueden ser concebidas como arreglos de elementos reiterativos madre básicos como unidades arquitectónicas. La expresión más simple de estas unidades básicas es el segmento formado por un tallo con sus entrenudos: un nodo, una hoja y la yema axilar.

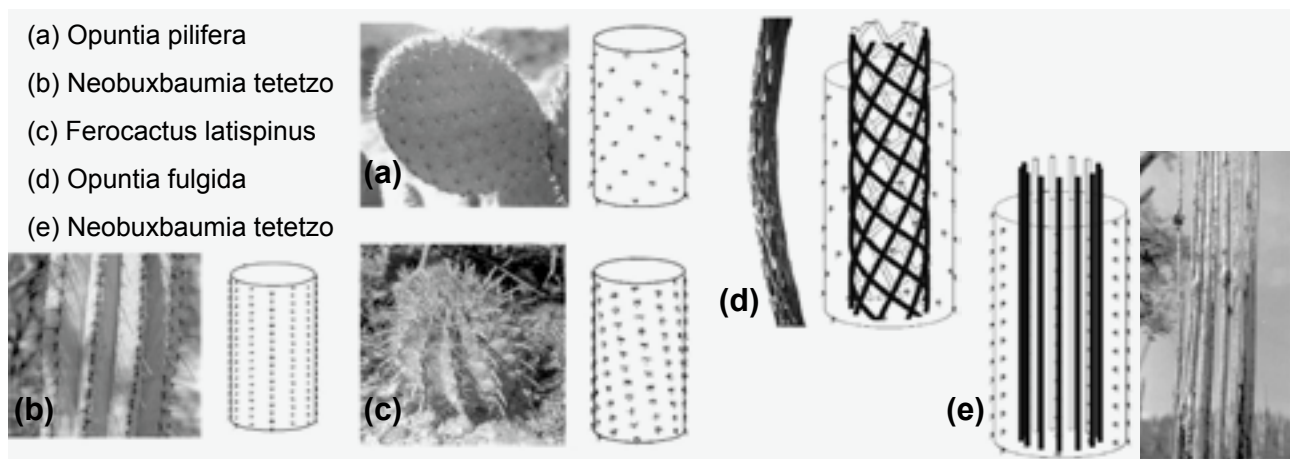
En la mayoría de las plantas dicotiledóneas los haces vasculares que se desarrollan a lo largo del tallo realizan la función básica de conectar las hojas al resto de la planta. Por lo tanto, los haces vasculares se unen a las hojas a lo largo del tallo, y su distribución está fuertemente ligada a la disposición externa de las hojas, como patrón filotaxis (A. Altesor y E. Ezcurrawz, 2003).



**Fig. 12** A la izquierda corte transversal del tallo de Echinopsis, mostrando los diferentes tejidos. En el centro hay el tejido fundamentalmente parenquimático central, o médula, rodeado de cordones de fascículos conductores de xilema y floema primarios. El córtex está constituido por una capa externa de células fotosintéticas y de una zona central de células parenquimales. A la derecha se evidencia la conexión entre las areolas que corresponde al entramado interior de los haces vasculares de la planta. Foto febrero/junio 2010.

Con una mirada hacia el crecimiento de la planta, vemos que los brotes primarios son los tejidos conductores organizados en haces vasculares rodeados por parénquima no especializada y con una epidermis fotosintética. Con un crecimiento secundario, mediante los tejidos meristemáticos, se forma un anillo continuo que produce tejidos leñosos (xilema) hacia el centro y tejidos conductores (folema) hacia el exterior. A medida que crece hacia el exterior, el floema se transforma en corteza no fotosintéticas que reemplaza a la epidermis fotosintética de la rama primaria. Entonces los haces vasculares desaparecen y las hojas se conectan a un tejido leñoso continuo.

En las plantas de tallo suculento como los cactus esta anatomía básica de los brotes primarios se mantiene también en las plantas adultas, y comúnmente mantienen el conjunto de los haces vasculares en la mayor parte de sus vidas. En los cactus, las hojas y la yemas se encuentran transformadas y reducidas a areolas y espinas por lo cual su distribución en el tallo está ligada a la distribución interna de los haces vasculares (A. Altesor y E. Ezcurrawz, 2003). Y cabe la hipótesis que la forma en la cual se disponen exteriormente las areolas puede reflejar la forma de los tejidos de soporte que se distribuyen al interior de la planta, como se muestra en la figura 13.



**Fig.13** La distribución de los haces vasculares está ligada a la de las areolas según diferentes configuraciones visibles en los ejemplos (a), (b) y (c). Además observando el esqueleto es posible confirmar esta hipótesis como muestran los ejemplos (d) y (e). Fuente: A. Altesor y E. Ezcurrawz, "Functional morphology and evolution of stem succulence in cacti", Journal of Arid Environments 2003.

### 2.f.2 Estructura del sistema vascular

Por su evolución hemos observado que las cactáceas se caracterizan por la pérdida de resistencia mecánica debido a la reducción de estructura leñosa a favor del tejido no especializado para el almacenamiento de agua y nutrientes como resultado de la elaboración de succulencia.

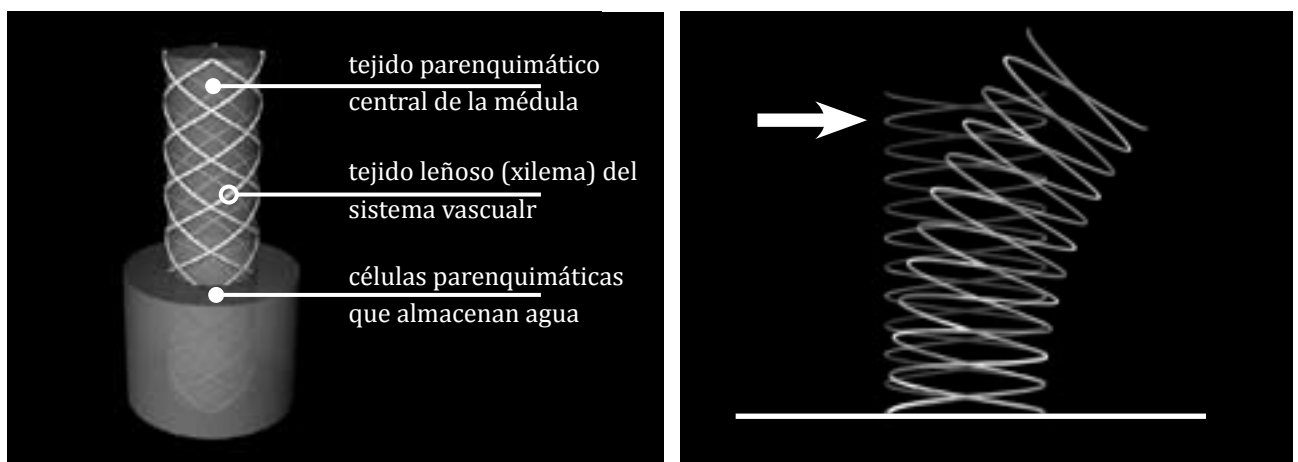
Además existe una relación directa entre la disposición de las areolas y la morfología de la estructura interna del cactus. Por lo cual en las cactáceas es posible identificar principalmente dos tipos de entramados estructurales que están relacionados con la distribución exterior de las areolas:

1. **estructura de vasos verticales** con las areolas puestas según una retícula ortogonal con el eje vertical más visible dada la morfología de las costillas (fig. 13 b y e).

**2. estructura con un patrón en espiral** con las areolas que se desplazan entre las costillas adyacentes siguiendo una retícula romboidal que puede variar su grado de inclinación (más o menos visibles). En este caso los haces vasculares se disponen en una diferente vía que forman un conjunto de hélices (fig. 13 a, c y d).

El primer tipo con haces vasculares organizados en dirección vertical parecen haber aparecido por selección natural como adaptación al tallo suculento. Pero esta morfología parece tener algunos costos ecológicos. La disposición longitudinal tiene que hacer frente a la limitación mecánica respecto al crecimiento en tamaño de las plantas, y con mucha frecuencia las cactáceas columnares más grandes se rompen o caen por su propio peso.

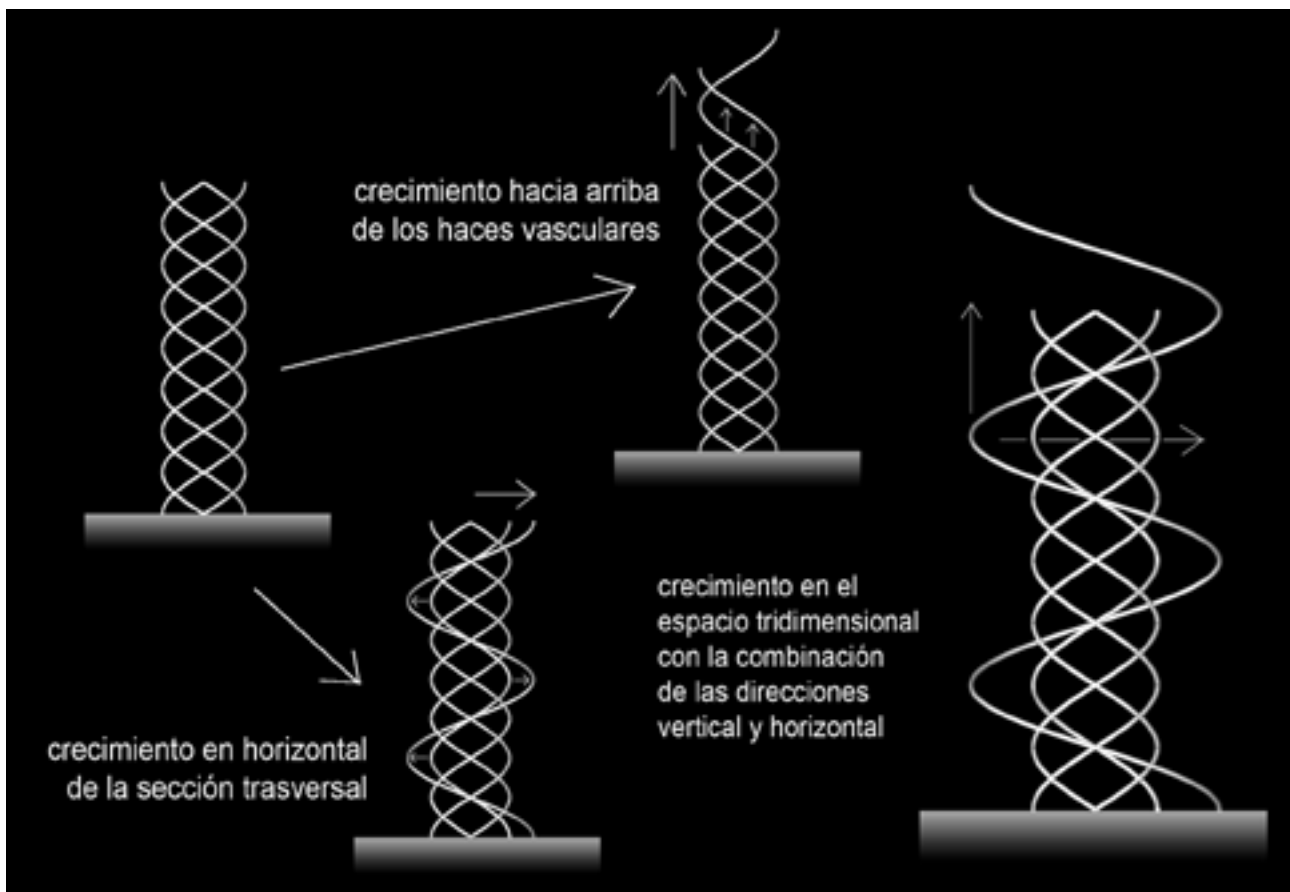
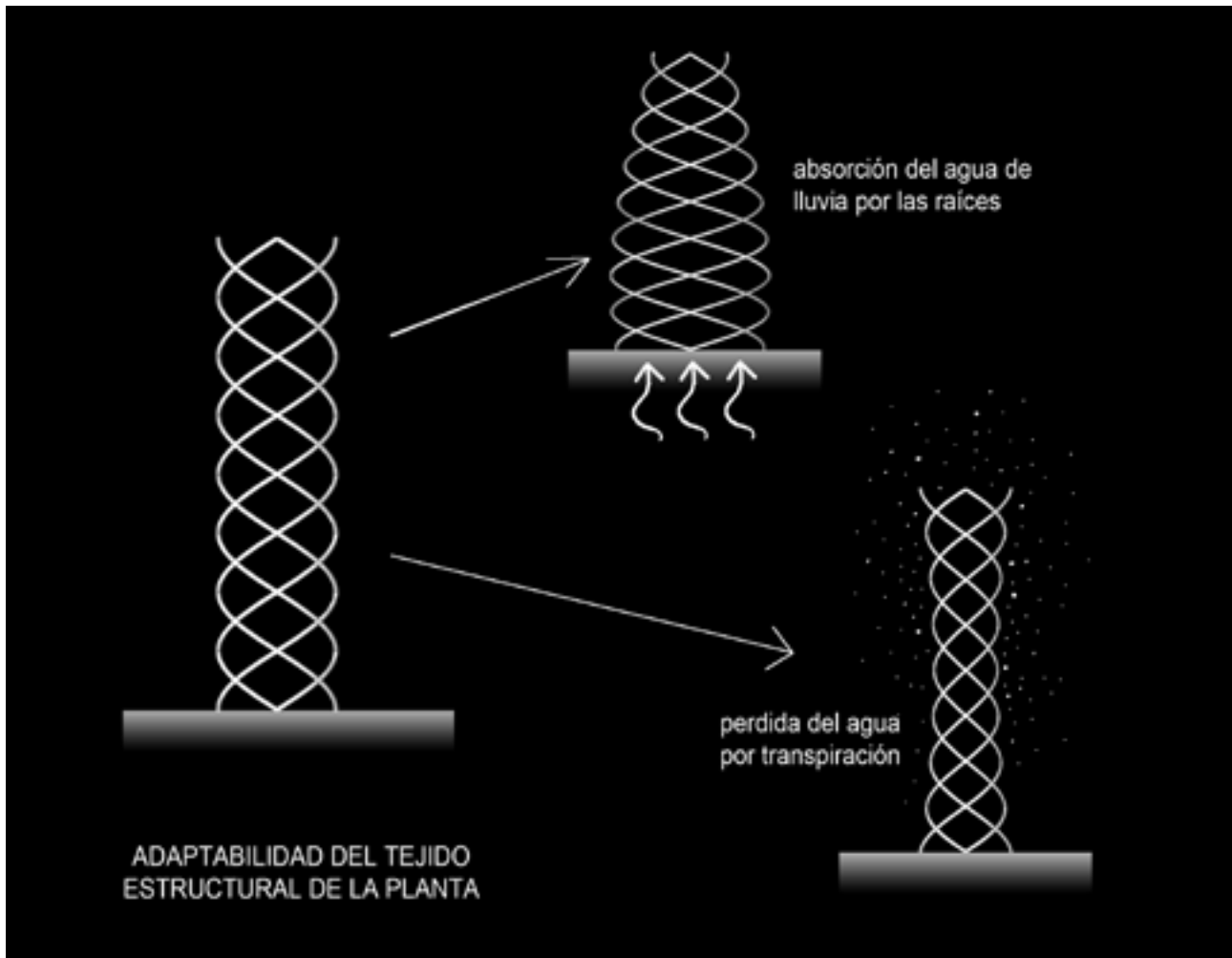
Los ejemplos de tejido de cactus seco a los cuales hace referencia este estudio son aquellos de patrón en espiral, como se verá en el próximo capítulo con los ejemplos del cardón y la tuna. El entramado formando un conjunto de hélices ofrece, respecto al vertical, por lo menos dos ventajas importantes para la sobrevivencia del individuo: el cambio de volumen para el almacenamiento del agua y ventajas para el crecimiento de la planta.



**Fig.14** A la izquierda modelo de la estructura con patrón en espiral representado por dos hélices simétricas. A la derecha deformación de las hélices a los esfuerzos horizontales como el viento. Dibujos realizados con el programa Cinema 4D, junio 2010.

### Cambio de volumen de la planta

Por un lado la configuración geométrica con el patrón en espiral permite el cambio de volumen de la planta para facilitar la acumulación de agua en los tejidos. Gracias a este sistema, algunos cactus pueden absorber (agua) hasta un 10% de su masa en sólo 4 días después de una lluvia. Además la estructura es de hecho un tejido vivo, por lo cual es un material que soporta los esfuerzos y que puede también extenderse. Es un material que está en la frontera entre los flexibles y rígidos. Entre los animales, un comportamiento similar se encuentra en el cartílago que desde un punto de vista funcional *«actúa como un material que mantiene la forma de órganos, como oídos, nariz, disco intervertebral, etc. ... y realizando esta función el cartílago tiene que ser capaz, hasta cierto punto, de resistir a la compresión y las fuerzas de flexión (...). Sin embargo, el módulo y la extensibilidad reales del cartílago caen dentro del rango que tienen los materiales flexibles»* (S.A. Wainweight, 1980).





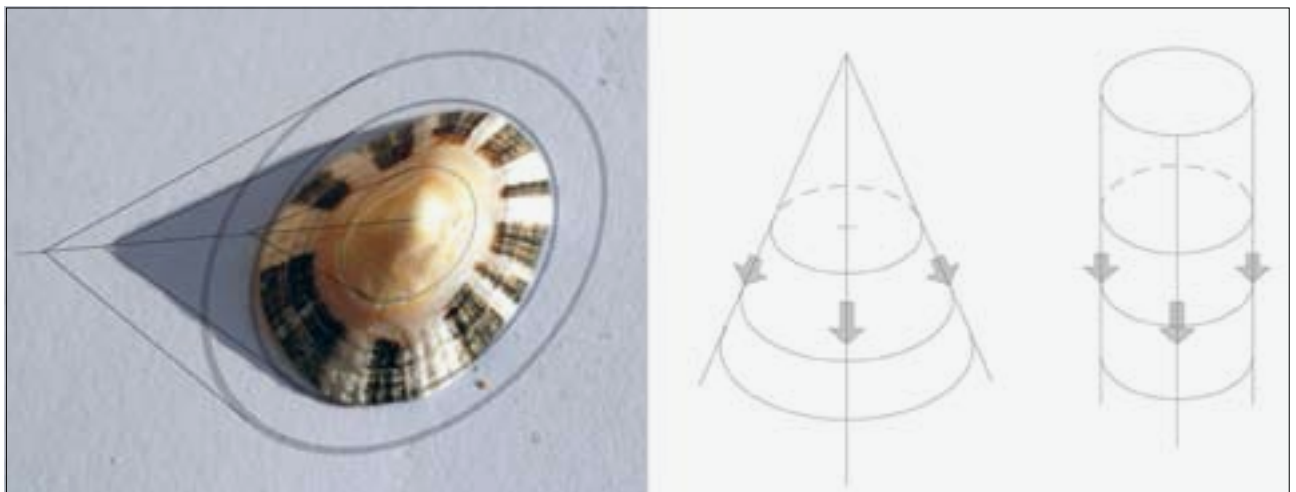
En resumen, la red de estructura de las cactáceas puede extenderse permitiendo a la planta adaptarse (extenderse o encogerse) según las necesidades vitales de la misma.

### Crecimiento de la planta

Otra ventaja de la estructura vascular con patrón helicoidal concierne el crecimiento en el tamaño de la planta. Todos los organismos tienen que crecer desde un tamaño inicial pequeño hasta otro tamaño final mayor, asegurando continuamente las mismas funciones.

*«La necesidad de crecer sin pérdida de funcionalidad puede imponer importantes limitaciones geométricas. (...) La concha de los moluscos no crece, por lo que sólo puede ampliarse añadiendo material a sus bordes o a sus superficies internas. Para muchas formas, estas adiciones incrementales conducirían rápidamente a estrafalarios cambios de proporciones» (Steven Vogel, 2000).*

La conchas de los moluscos tienen básicamente forma de conos, tanto la sencilla, como la arrollada del caracol o las dobles de la almeja. El crecimiento permite alargar el cono respecto a una generatriz vertical sin modificar las características propias de la forma. Si a diferencia se considera un cilindro, como el caso de los cactus columnares, que crece alargándose, la forma llegaría a ser más estilizada y por consiguiente más vulnerable a la rotura. Una solución podría ser el engrosamiento de las paredes como compensación, pero en este caso se reduciría el volumen interior disponible. Por lo cual la estructura reticulada en espiral del cactus permite a la planta crecer tanto en la dirección vertical como en la horizontal, aumentando así su sección transversal y, de esta forma, se reducen las limitaciones mecánicas debidas al aumento del tamaño.



**Fig.16** Arriba en la página a lado, dibujo sobre adaptamento del tejido hélicoal al almacenamiento del agua o a la pérdida por transpiración en los periodos desfavorables. Abajo esquemas del crecimiento de la planta tanto en horizontal como en vertical de los haces vasculares reduciendo las limitaciones mecánicas de la forma cilíndrica que quedaría más estilizada y por consiguiente más vulnerable a la rotura. Dibujos realizado con el programa Cinema 4D, junio 2010.

**Fig.17** Arriba en esta página, crecimiento de una concha de mar según la forma cónica que puede crecer y aumentar de tamaño sin perder las características mecánicas de la forma. Foto y esquemas junio 2010.



## 2. Reproducción de la estructura del cactus: los modelos

En este capítulo se propone el desarrollo de unos modelos inspirados en el tejido del cactus seco. Estos se han realizado como maquetas en diferentes tamaños y como modelos virtuales aprovechando de esta manera las diferentes técnicas de investigación. Se aclara previamente que los modelos han sido construidos sin la definición de un uso o una función específica, sino simplemente con el objetivo de reproponer el tejido leñoso de la planta. Eso porque el estudio apunta a liberar la forma de la función y se caracteriza por la voluntad de investigar un método de análisis de los sistemas naturales y no el objetivo último del objeto arquitectónico.

### 4.a Marco de investigación.

En este estudio se ha tomado como referente natural el cactus seco. Esto significa «simplificar» el análisis de su estructura a la hora de reproducirla. Por el hecho que se reducen los factores que actúan sobre el tejido estructural de la planta y que han llevado a la configuración de su forma.

En el ejemplo de la planta seca las funciones vitales de las plantas son ausentes y lo que se observa son los sedimentos de tejido resistente en una configuración estática, ya que no puede crecer más en el tiempo.

Las plantas de la familia de las cactáceas (como en general las plantas suculentas), por su adaptación a climas áridos, han modificado sus características fisiológicas para permitir el almacenamiento del agua y garantizar así su supervivencia. En el tallo se concentran la mayoría de las funciones vitales como el proceso de la fotosíntesis y el almacenaje del agua. Por lo cual en su tejido se almacena una gran cantidad de líquido que ejerce una presión entre las paredes celulares. Una vez que la planta pierde sus funciones vitales es posible ver como la tensión superficial va conformando las relaciones de equilibrio entre los tejidos. Por eso observar la planta ya seca permite modificar el medio de observación circunstancial que no es más el agua, sino el aire.

Además el cactus, como las plantas en general, es un organismo de crecimiento indefinido ya que, a diferencia de los animales, continúa creciendo a lo largo de toda su vida. En este desarrollo hacia arriba, crecen los diferentes tejidos cada uno más o menos especializado según su función. Y en éstos se va depositando y/o acumulando sedimentos de material resistente.

Es en particular cuando se observa el cactus seco vemos el tejido leñoso que compone la estructura resistente de la planta. Por lo cual observar la madera de cactus seco significa observar los sedimentos de material una vez que la planta ha perdido el líquido almacenado en su interior, y que, de las células que la componían ha quedado la estructura resistente.

Por estas características fisiológicas y junto al tamaño que la planta puede llegar a alcanzar, es posible analizar la estructura vascular del cactus, estudiando su morfología y comportamiento para aplicarlo a modelos arquitectónicos.



**Fig.1** Fotografía del cactus cardón seco (*Echinopsis atacamensis*) en su hábitat natural. En el primer plano de la foto se observa como de la planta, al terminar su ciclo de vida, queda visible la estructura resistente. Provincia de Jujuy, Argentina, Mayo 2005.



## 4.b La madera de cactus seco

En este estudio se ha tomado como organismo de la naturaleza las planta suculentas y en particular dos especies de cactus, el cardón y la tuna. Para respetar una metodología de análisis propia del biomimetismo, en el capítulo anterior se ha desarrollado un estudio de las cactáceas observando las funciones vitales de la planta, en lo posible en su contexto natural.

Una vez que el cactus ha perdido sus funciones vitales se puede observar su estructura vascular gracias a la acumulación del tejido leñoso (xilema). En la planta ya no es contenida el agua, no hay epidermis y han desaparecido las espinas u otros tejidos. Sin duda para observar la madera de cactus seca la planta debe haber llegado a su madurez y a un cierto tamaño.

Para la finalidad de este estudio es observan dos diferencias morfológicas principales entre las cactáceas y las otras plantas debido a cambios evolutivos en el tiempo.

*1. La transformación de las hojas en espina.* En términos generales en la mayoría de las plantas los haces vasculares que desarrollan a lo largo del tallo realizan la función básica de conectar las hojas al resto de la planta. Por lo tanto, los haces vasculares se unen a las hojas a lo largo del tallo, y su distribución está fuertemente ligada a la disposición externa de las hojas. Y aun con sus diferencias, también en los cactus sigue esta relación entre el desarrollo de los haces vasculares interiores y la distribución de las areolas y espinas exteriores.

*2. La modificación del tallo en suculento.* Por la adaptación a climas áridos, la planta ha transformado su tallo para cumplir múltiples funciones (almacenar agua, permitir la fotosíntesis, etc.), y su tejido leñoso se encuentra en cantidad reducida respecto a otras especies vegetales. Por lo cual las cactáceas se caracterizan por la pérdida de resistencia mecánica debido la reducción de estructura leñosa a favor de tejido no especializado para el almacenamiento de agua y nutrientes como resultado de la elaboración de la suculencia.

Estas características morfológicas y fisiológicas se observan en los ejemplos de madera de cactus utilizada en este estudio: cardón (*Echinopsis atacamensis*) y tuna (*Oputina ficus-indica*).

Para los modelos tanto físicos como virtuales que se proponen más adelante el cactus de referencia ha sido el cardón tanto en la complejidad de las fibras analizadas como en la propuesta de la forma cilíndrica. Aunque en la madera de la tuna es mayormente visible el entramado de la estructura ondulada que ha llevado a la definición de los modelos.

#### 4.b.1 El cardón (*Echinopsis atacamensis*)

Esta especie de cactáceas es autóctona de las zonas andinas de Bolivia y Argentina, y llega a crecer a una altitud de 3.000 metros sobre el nivel del mar. Su crecimiento es muy lento y es probable que los cardones de tamaño mayor a los 10 metros alcancen una edad de varios cientos de años. En particular, según el estudio sobre «Crecimiento exponencial y supervivencia del cardón» (Stephan Halloy, 2008), se observa que a los 180 años de edad la planta alcanza los 10 m. A un crecimiento inicial lento, hay una aceleración en la fase media de su vida, seguida por una nueva reducción acercándose a una asíntota a medida que el organismo envejece.

Este cactus forma «bosques» de poblaciones relativamente densas con plantas que llegan hasta unos 12 metros de altura. Es una planta perenne carnosa, con un tallo columnar cuyo diámetro en edad adulta mide alrededor de 40÷50 cm. Es una especie de crecimiento arbóreo, con pocos brazos laterales, en ocasiones inexistentes según la zona geográfica y posee entre 20 y 30 costillas. En épocas secas como el invierno, la planta se contrae (por la reducción de agua almacenada en su interior) y puede reducir su altura de entre 0.5 a 2 cm, el diámetro también se contrae sustancialmente facilitado por la estructura de las costillas que se pliegan como acordeón. (H.Friedrich & G.D.Rowley, «*Echinopsis atacamensis*» Fichas Especies – Banco Base de Semillas – INIA, 1974)

Observado la planta seca vemos el cilindro formado por el tejido leñoso de sus haces vasculares, que a diferencia de un árbol queda vacío en su interior. Este forma una serie de olas por la estratificación de xilema y su discontinuidad nos recuerda las conexiones de la estructura interior a las areolas y espinas de la planta hacia el exterior. La forma cilíndrica está por supuesto vinculada a la forma de candelabro de la planta.



**Fig.2** Planta de cardón que ha perdido sus funciones vitales y muestra el proceso de secado de los tejidos.

1. tejido leñoso que compone la estructura resistente de la planta.

2. epidermis de la planta sin los tejidos de conexión con los haces vasculares interiores.

3. Areolas y espinas

Fuente: <http://www.flickr.com/photos/liacedro/2320166507/>

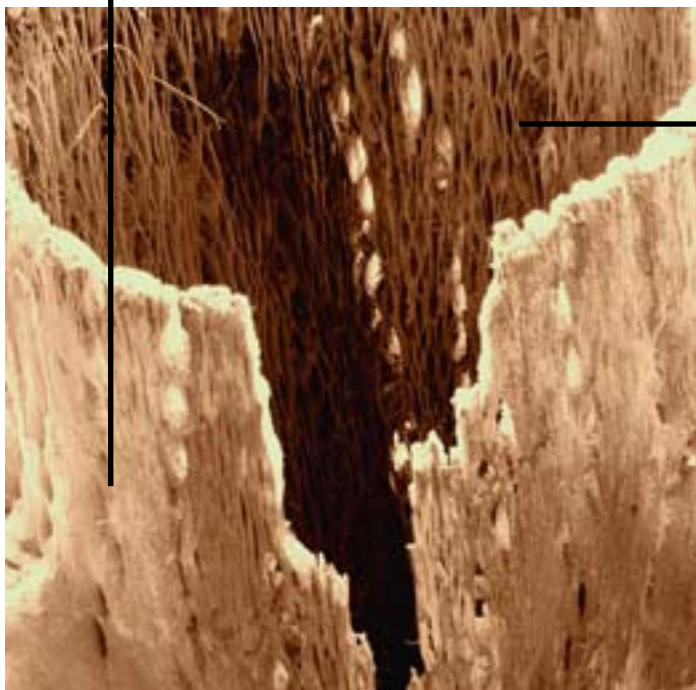
**Fig.3** La madera de cactus seco tiene una forma cilíndrica hueca, tanto en la cara exterior del cilindro como en la interior es visibles una estructura discontinua conformada por la sobreposición de las fibras leñosas.

La diferente configuración entre la dos caras (exterior e interior) está relacionada a la forma cilíndrica de la madera de cactus, debido a que las presiones entre las fibras es mayor en el diámetro exterior que en el interior.

En la cara exterior las fibras son más juntas entre ellas y son muy marcados los huecos de las conexiones con las areolas de la planta. Estas se disponen a lo largo de la línea vertical que constituía la costilla. Además las líneas adyacentes nos muestran como se van desfasando los vacíos de las areolas, respecto a imaginarios ejes horizontales, configurando un entramado romboidal.



*Cubierta realizada en madera de cactus, provincia de Jujuy Argentina, Mayo 2005.*



La cara interior muestra un tejido más abierto. Es visible el canto de las fibras que se desarrollan en la dirección del crecimiento y el entramado más abierto como a formar una series de olas adyacentes. Por supuesto no es posible conocer la verdadera secuencia de crecimiento de los tejidos pero es visibles el resultado de las presiones internas ejercidas entre las células de las cuales queda la materia resistente.

Fuente: <http://www.flickr.com/photos/13313698@N06/2276457980/>



#### 4.b.2 La tuna (*Oputina ficus-indica*)

Es una planta originaria de México, donde es conocida y usada desde tiempos prehispánicos. Fue introducida en Europa por los conquistadores y se ha naturalizado fácilmente en las regiones mediterráneas.

Es una planta arbustiva que alcanza entre 3 y 5 metros de altura. Tiene un elevado contenido de agua de aproximadamente el 90% del peso de la planta. Esta se divide en segmentos o cladodios que son los tallos de la planta. Tienen una forma plana y ovalada con una longitud de 30 ÷ 40 cm, na anchura de 15÷25 cm y un espesor de 1,5÷3 cm. Los tallos son capaces de ramificarse, cumplen la función de la fotosíntesis y almacena el agua en épocas favorables.

La estructura leñosa respeta la forma plana y ovalada (no más cilíndrica) de sus tallos. En su espesor se observa la sobreposición de diferentes capas que respeta la forma plana. La acumulación de los tejidos leñosos sigue un movimiento ondulado a partir de la base hacia el ápice. En este caso la conexión a lo que eran las areolas y espinas es menos visible mostrando un tejido más articulado. Y es interesante subrayar la analogía que esta estructura tiene con las hojas de las plantas no suculentas.



**Fig.4** Panorama con plantas de tunas (*oputina ficus-indica*) con su forma arbustiva y su tallo compuesto por elementos ovalados y planos en Bisacquino provincia de Palermo, Italia. Fuente: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fico\\_d%27india2.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fico_d%27india2.jpg)



**Fig.5** Fotos del tallo de la tuna seco, Abril/Mayo 2010.

Sobreposición de las fibras de madera en diferentes capas que determinan el espesor del tallo seco.



### 4.c Los modelos

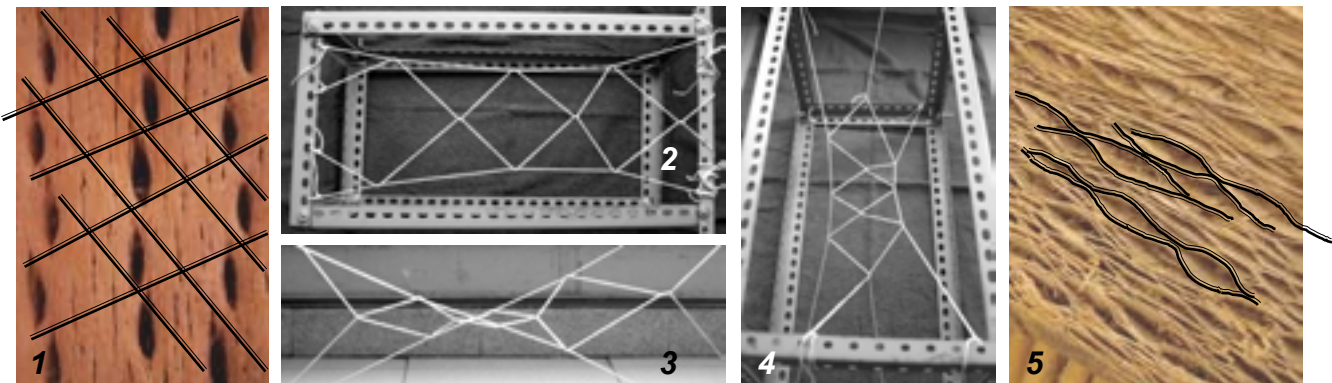
Para este estudio se han desarrollado diferentes modelos. Una parte de ellos se ha realizado en papel como principal material de las maquetas. Y otra parte de los modelos han sido desarrollados utilizando el programa de modelación tridimensional Cinema 4D.

Todos ellos han sido divididos en 5 fases de trabajo en orden temporal según su realización. Además los criterios de clasificación dependen: de los medios utilizados (físicos o virtuales), de los cambios o la introducción de diferentes elementos en el sistema.

#### ***1 Fase: primera interpretación (febrero/abril 2010)***

En una primera fase de observación de la madera del cardón se ha tomado como referencia el entramado romboidal de la cara exterior del cilindro (fig. 1), según lo descrito anteriormente. Esta ha determinado unos de los primeros modelos físicos realizados con cables de nylon entrelazados entre sí.

Se han realizado dos maquetas con un tejido romboidal que sigue una primera aproximación



al tejido del cactus. En un caso (fig. 2) el entramado de cables se desarrolla en el plano horizontal, y en el otro (fig. 3 y 4), en el espacio tridimensional donde los cables empiezan a un nivel de altura diferente al nivel de llegada. En ambos casos los cables no se atan entre sí y las relaciones de equilibrio son determinadas por el factor de rocío. Si bien las dos maquetas siguen los mismos principios (equilibrio entre los cables por rocío) las configuraciones espaciales y sus comportamientos son entre sí diferentes.

Trabajar con cables implica tener un elemento vinculado a los esfuerzos de tracción





aplicados, que parece más propio de un análisis sobre la planta viva y no seca. Por eso, observando nuevamente la estructura del cactus pero con mayor atención hacia la cara interior del cilindro (fig. 5), se ha evaluado un cambio de interpretación pasando de los cables de nylon a la franja de papel que simulan las fibras del tejido del cactus con un canto significativo respecto a las dimensiones generales del modelo.

Por lo cual se ha realizado un modelo (fig. 6 y 7) en franja de papel iguales de 1 cm de espesor y 30 cm de largo. Estas han sido unidas con grapas metálicas (fig. 8) en una secuencia alternada para respetar el retículo romboidal de la planta. Se nota cómo sólo aplicando unos esfuerzos externos en los bordes de la malla, ésta queda abierta (fig. 9) como una red, mientras que las franjas por sí solas quedarían cerca la una con la otra.



*Diferentes ejemplos de tejido romboidal realizado con franjas de diferentes materiales que siguen un movimiento sinusoidal. Dependiendo del material utilizado y de la relación entre la extensión del tejido respecto a su canto es posible obtener diferentes configuraciones espaciales.*

*Arriba izquierda: Pierre Huyghe y R&Sie, obra de arte Tierra Incógnita, Centre Pompidou, Paris 2006. Publicado en "Jóvenes arquitectos", autor K. Long, Ed. Blume, Barcelona 2008.*

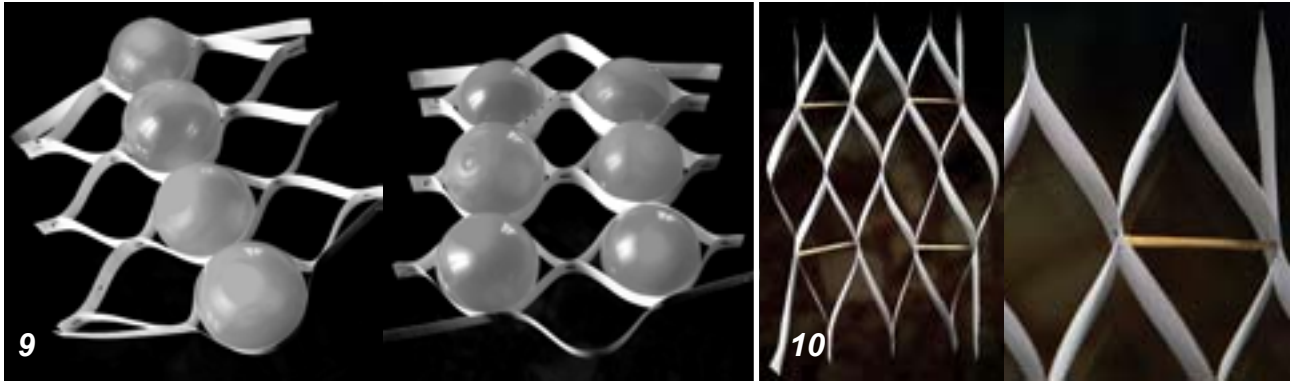
*Arriba derecha: Pabellón de madera realizado por los estudiantes Wing Yi Hui y Lap Ming Wong de la Escuela de Arquitectura de Oslo. Fuente: <http://www.archdaily.com/68446/wood-pavilion-wing-yi-hui-lap-ming-wong/>*

*Abajo: Sleep Suit de Forrest Jessee es un tejido de espuma concebido como un saco de dormir para breves descansos. Publicado en [www.pleatfarm.com](http://www.pleatfarm.com) el 16.11.2009*



## II Fase: intuitiva (abril/mayo 2010)

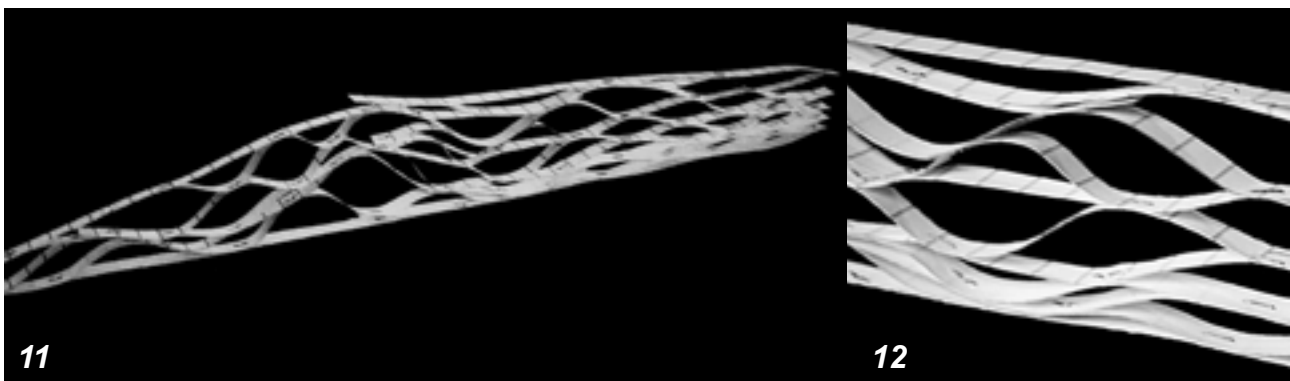
Como se ha empezado a ver en la fase I, el entramado de franja de papel no tiene una capacidad intrínseca para asumir una determinada configuración. Es necesario aplicar unos esfuerzos externos para que la malla quede abierta. Por lo tanto se han introducido diferentes elementos capaces de trabajar a compresión. En un caso han sido colocados entre las franjas unos globos inflados dispuestos en diferentes situaciones (fig. 9), mientras en otro se utilizaron unos fósforos a reproducir unos puntales de madera (fig. 10). Se observa que no es necesario ocupar todos los vacíos, si el entramado no recibe esfuerzos externos.



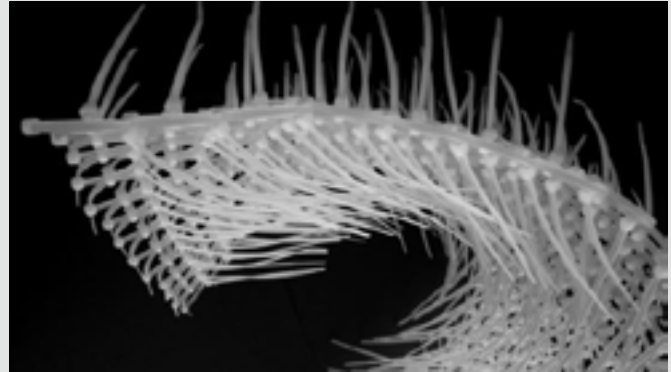
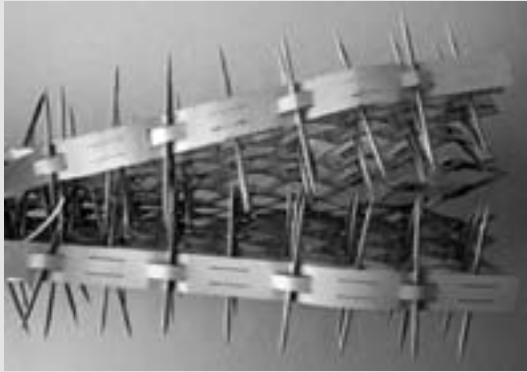
Recordando las imágenes de la madera de cactus vemos que en ella no hay otros elementos u otros materiales que actúan sobre los tejidos. En principio, introducir los globos recuerda a las presiones que ejercen los líquidos presentes al interior de la planta viva. Pero la planta seca ya está en una configuración de equilibrio, por eso el experimento sucesivo ha dejado afuera la introducción de elementos externos.

En la figura 11 se observa un modelo donde las franjas de papel son, respecto a los modelos anteriores, más largas, y su canto es de 0,5 cm, por lo cual en proporción a las dimensiones generales resulta menos vinculante a posibles deformaciones. Las franjas de papel han sido unidas entre sí según largos variables y con un grapado irregular. La configuración final que se obtiene es una malla donde las franjas siguen un recorrido sinusoidal irregular. Estas quedan abiertas sin la inserción de otros elementos por el equilibrio de los esfuerzos internos debidos a la irregularidad aplicada en el largo de las franjas y la situación de las uniones (fig. 12).

En las fases de trabajo sucesivas se ha ido implementando la relación de equilibrio entre franjas de largos diferentes.







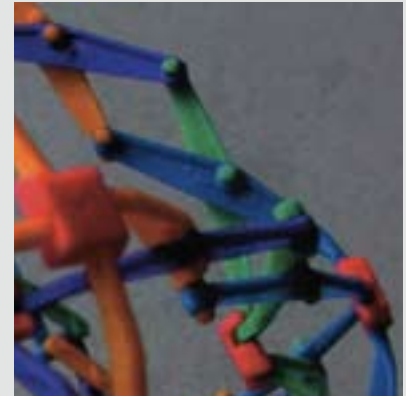
*Diferentes ejemplo de estructuras que utilizan un entramado romboidal o sinusoidal. Sus entramados varían de orientación en el espacio obteniendo superficies a doble curvatura.*

*Arriba izquierda: Neri Oxman, Material Exploration, trabajo de investigación en el MIT media Lab, Massachusetts Institute of Technology. <http://www.materialecology.com/>*

*Arriba derecha: Investigación de The Spatial Information Architecture Laboratory (SIAL) RTMI University, Australia. <http://www.sial.rmit.edu.au>*

*Abajo izquierda: S. Felipe y J. Truco, HybGrid: generación de formas para estructuras adaptable, MA Dissertation Project, Emergent Technologies and Design. Publicado en "AD 169: Emergence. Morphogenetic design strategies", Mayo/Junio 2004.*

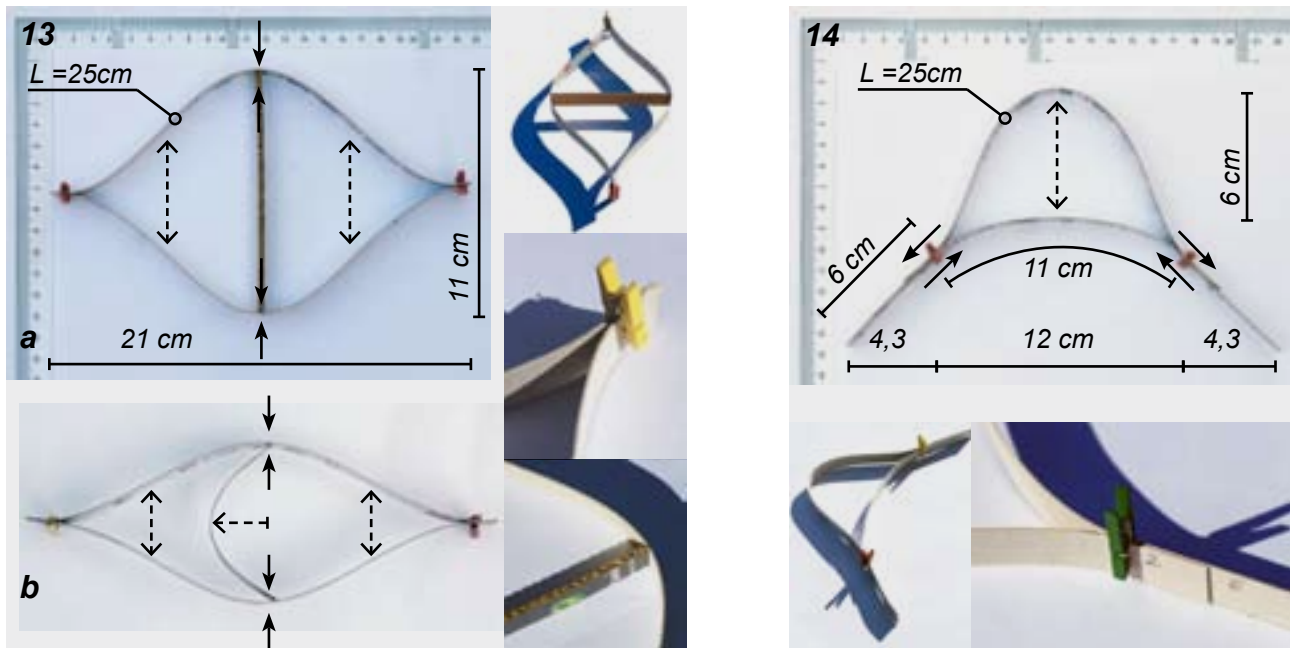
*Abajo derecha: Detalle de la estructura desplegable del juego Hoberman Sphere.*



### **III Fase: definición de los elementos base (abril/mayo 2010)**

Como se ha observado anteriormente, dos franjas quedan abiertas si se le inserta entre ellas un tercer elemento o si las dos tienen entre sí un largo diferente respecto a los puntos de unión. En esta fase se ha formalizado esta relación observando el comportamiento de elementos base que reiterados en el plano generan las malla enteras formalizadas en la fase IV.

En la fig. 13 se observan unas imágenes donde las dos franjas (25 cm de largo por 1,5 cm de canto) están abiertas por un elemento a compresión que determina las relaciones de equilibrio. Utilizando dos tipos de cartones diferentes se observan las diferentes relaciones de equilibrio (fig. 13 a y b).

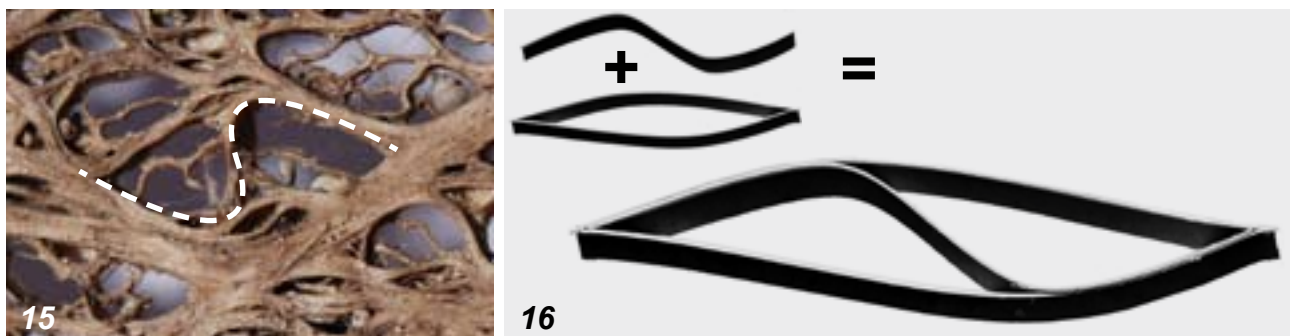


En la fig. 14 se observa la prueba de relación entre dos franjas (de las mismas dimensiones y material que las anteriores) de las cuales varían los puntos de uniones: la inferior es a 6 cm del los extremos y en la superior a 2 cm. Por lo cual hay una diferencia de longitud de 10 cm que permite que las franjas se distancien en el punto máximo de 6 cm.

El tejido de la planta tiene un crecimiento continuo, por eso la hipótesis del elemento a compresión entremedio no parecía adecuada respecto a los objetivos. Por lo cual el paso siguiente fue mirar nuevamente el tejido del cactus y en particular la tuna. Observando con más atención las fibras, son visibles las múltiples ondulaciones de las mismas en un orden aparentemente caótico. Y en una visión propia del pensamiento humano que busca la aplicación de una regla común, se ha observado el caso de una tercera fibra (en realidad compuesta por múltiples estratificaciones) entre dos que quedan abiertas en un movimiento sinusoidal (fig. 15).

Por lo cual en los experimentos a las dos franjas de papel se ha incorporado una tercera más larga para simular las fibras del tejido del cactus (fig. 16). De esta forma se han definidos los elementos principales que reiterados en el plano componen una superficie en el espacio.

Es importante aclarar una diferencia entre la solución escogida para los próximos experimentos y el comportamiento de la planta viva. En términos mecánicos, la tercera franja actúa como un resorte entre las otras dos, por lo cual tiene una función específica diferente que le permite al tejido quedar abierto. Mientras en el contexto de la planta viva,



la configuración de la separación de las fibras no es causada por otras. La forma ondulada está determinada por fuerzas intrínsecas (presiones de los líquidos internos) y extrínsecas (viento, movimientos del terreno, lluvia, ect.) que definen las relaciones de equilibrios internos.

Por esto el elemento que se configura por dos franjas iguales unidas en los extremos más una tercera de mayor largo entre las otras es interpretable como una fusión entre la observación de la planta seca (como memoria de la viva) y la técnica propia del hombre como el resorte.

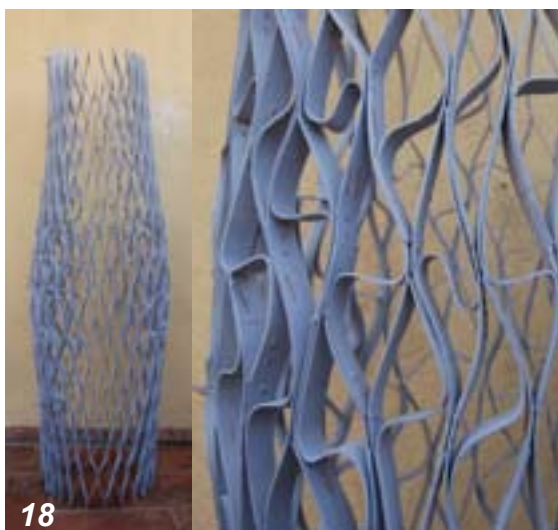


#### ***IV Fase: reiteración en el plano y forma cilíndrica (mayo/junio 2010)***

Definido el conjunto de elementos bases se han realizado unas mallas reiterándolos en el plano. Como se observa en la secuencia de la figura 17 la malla ha sido realizada en franja de cartón de 110 cm de largo y 1 cm de canto unida entre sí por grapas como en los primeros experimentos en papel. Y al introducir el elemento activo del resorte (la tercera franja) la malla va abriéndose.

Con el entramado así obtenido se ha generado un cilindro para reproducir la misma forma columnar del cardón (fig. 18). Se observa que según la situación de los resortes entre la franjas la forma cilíndrica se deforma en doble curvatura hacia el interior (fig. 19) o el exterior del eje vertical (fig. 18).

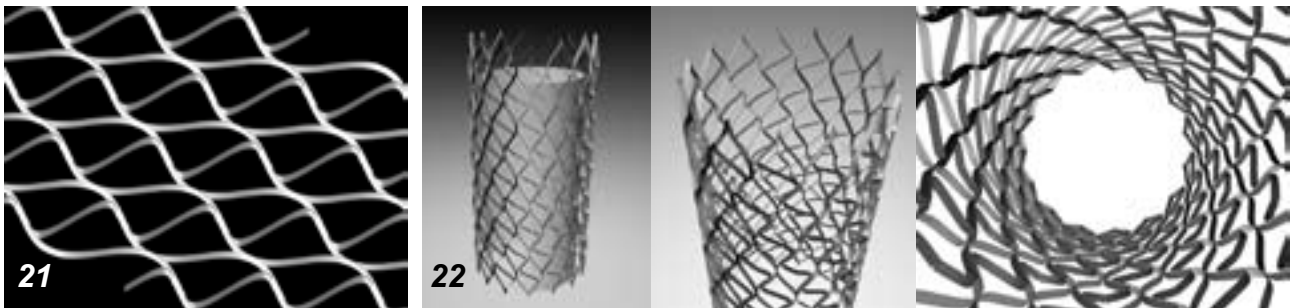
Otro experimento de comprobación ha sido sobre la construcción del cilindro con un entramado de franjas sinusoidales sin el tercer elemento. Y la figura 20 muestra que para generar la forma hay que introducir elementos externos, en este caso unos globos, de manera similar a la fase II con la malla en el plano.



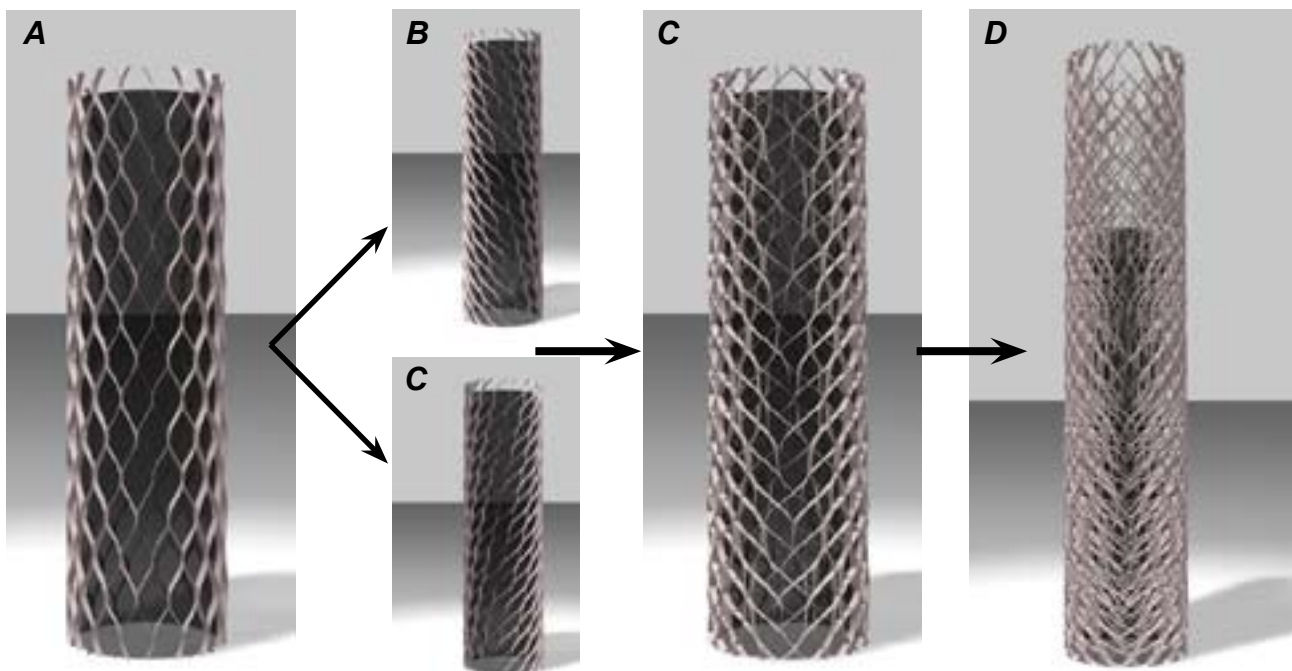


### V Fase: modelos virtuales (junio/julio 2010)

En esta fase se proponen los modelos virtuales realizados por computadora. En una primera aproximación se ha probado reproducir directamente el tejido de las maquetas realizadas anteriormente. Por lo cual como en la fase III se han representados los elementos base por medio de tres líneas sinusoidales: dos iguales espejadas entre sí y una tercera entre las otras con una ondulación diferente (fig. 21). Una vez dibujada esta unidad base por medio de su reiteración en el espacio por traslación se ha obtenido una configuración plana de la malla (fig. 21). Mientras por medio de la reiteración por traslación en vertical y por rotación en el plano xy respecto al eje z se ha obtenido la forma cilíndrica como se observa en la secuencia de imágenes de la figura 22.



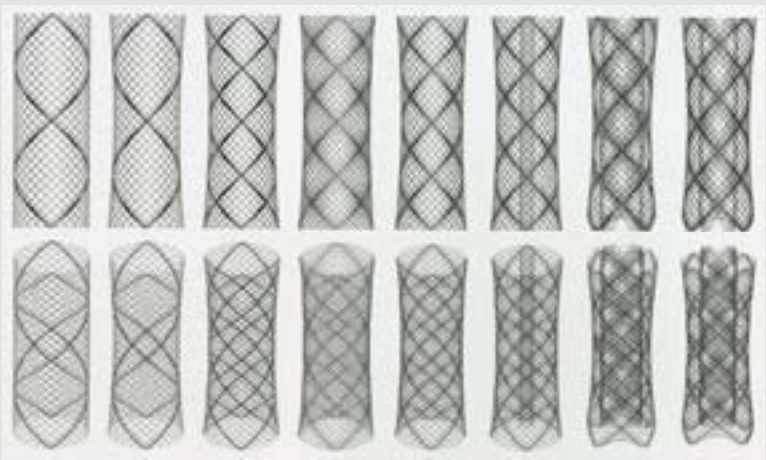
El medio de representación utilizado y los pasajes gráficos realizados no han ofrecido una solución respecto al objetivo de reproponer los modelos físicos de las fases anteriores. Eso se genera por la discontinuidad que tienen las fibras representadas en el modelo virtual respecto a las franjas de papel o cartón de las maquetas físicas. Por lo tanto se ha procedido a la representación de un nuevo modelo virtual en forma autónoma a los experimentos anteriores, que apunta a reproponer el tejido del cactus con fibras que siguen trayectos sinusoidales irregulares.



**Fig.23** Fases de construcción del modelo.



En la representación del modelo se individualúan diferentes fases de construcción según lo explicitado en la figura 23. En el dibujo (A) se observan las fibras con un trayecto sinusoidal regular e iguales entre sí en una configuración cilíndrica (fig. 24). Esta es análoga a la figura 20 de la fase anterior, teniendo en consideración la diferencia existente entre modelo físico y virtual. Sucesivamente se ha aplicado sobre la malla una rotación respecto al eje vertical (fig. 23 B y C) ya que como en el caso del cactus del cardón el crecimiento de las fibras sigue un patrón helicoidal y no vertical. En el dibujo (B) se ha aplicado una rotación horaria (fig. 25) mientras en el (C) es antihoraria. En el cactus los tejidos del sistema vascular son iguales entre sí y no hay una dirección de rotación privilegiada respecto a otra. Por lo cual como es visible en el dibujo (D) se fusionan las dos mallas rotadas en una sola (fig. 26). Además para respetar la aleatoriedad del crecimiento y de la forma como mecanismo propio de los



*Diferentes ejemplo de modelos virtuales que utilizan curvas sinusoidal con diferentes orientaciones en el espacio para sus entramados.*

*Arriba izquierda: A. Balducci, A. Cocho y Daode Li, Arquitecturas desechables de emergencia, A Coruña 2008. <http://urblog.org/index.php/Plaza/2009/01/12/p586#more586>*

*Arriba derecha: Emergence and Design Group, estudios sobre la versatilidad entre redundancia y diferenciación. Publicado en "AD 169: Emergence. Morphogenetic design strategies", Mayo/Junio 2004.*

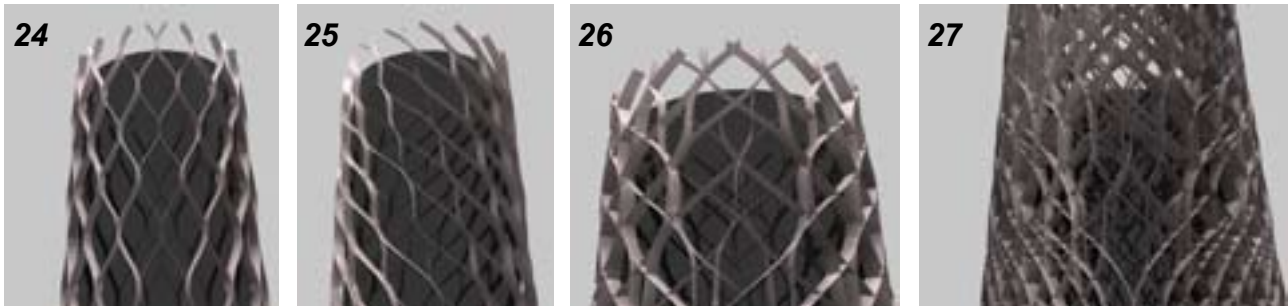
*Abajo izquierda: "Library for the information Age", Karachi, Pakistan 2003. Publicado en "Catalytic Formations. Architecture and Digital Design", Ali Rahim, Ed. Taylor & Francis, Londres 2006*

*Abajo derecha: "Residential Housing Tower", Dubai 2004. Publicado en "Catalytic Formations. Architecture and Digital Design", Ali Rahim, Ed. Taylor & Francis, Londres 2006*



seres vivos (y no sólo del cactus) se han aplicado una series de deformaciones aleatorias en las tres direcciones. De esta manera se define el último tejido representado (E) donde varían el espesor de las fibras, su largo, la amplitud de las sinusoides y las dinámicas de rotación (fig. 27).

El entramado así configurado está por supuesto alejado de un modelo físico construible de forma manual como las maquetas anteriores. Pero, como dicho anteriormente, el objetivo era experimentar un proceso de análisis y representación autónomo.

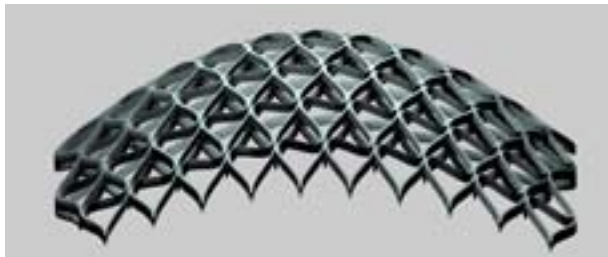
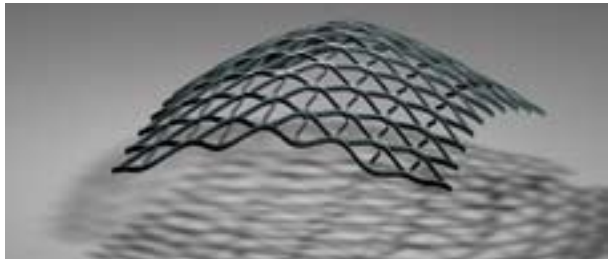
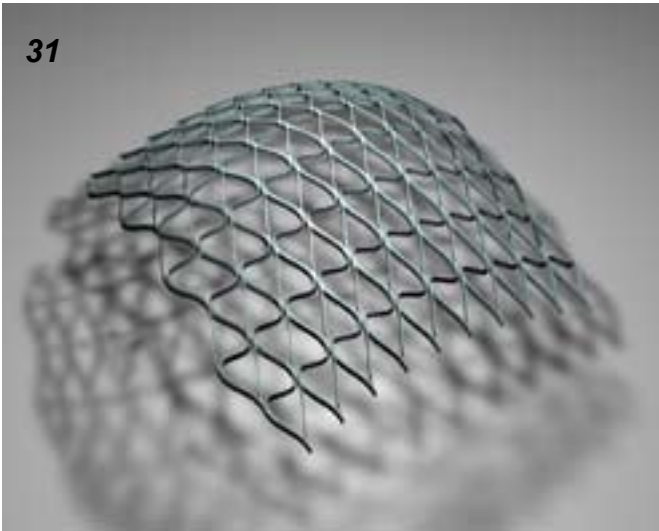
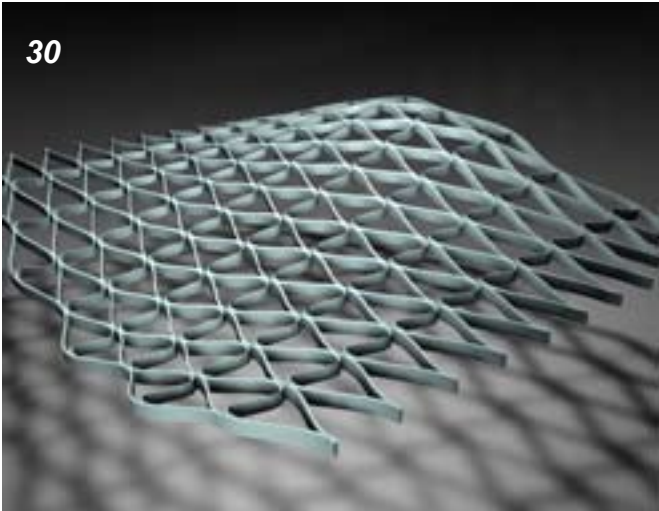


### ***VI Fase: modelos físicos y virtuales (mayo/julio 2010)***

Como última fase se proponen diferentes imágenes donde se han experimentado otras configuraciones espaciales del tejido. Se reproponen el modelo físicos, visto anteriormente (fig. 18), en la forma de una silla de montar (fig. 28) u otro realizado con franjas de palmera recicladas de un sombrero, de formas irregulares y diferentes entre ellas (fig. 29). Mientras en las figuras 29 y 30 se ofrecen diferentes variantes de los modelos virtuales.







#### **4.d Relación entre el cactus y los modelos: posibles escenarios**

Los experimentos realizados han tenido el objetivo de generar modelos físicos y virtuales para interpretar el tejido del cactus seco. Se han realizado sin una perspectiva de aplicación directa ni del uso de un material de construcción específico.

El desarrollo de los modelos ha ido en paralelo con el estudio de la planta interactuando con las características fisiológicas de la misma. Y en ciertos aspectos se observa la fascinación que ejerce un área científica diferente y los puntos de contacto que se encuentran.

También en paralelo con los experimentos se ha desarrollado la búsqueda de ejemplos en el ámbito de la arquitectura. Y hay que notar como la observación de la naturaleza tiene un fuerte valor si se la analiza respecto a las capacidades de crecimiento que tienen los seres vivos. Eso puede interpretarse en arquitectura respecto a múltiples miradas. En términos abstractos se podría hacer referencia a la polifuncionalidad de un espacio, como cuando un organismo tiene que garantizar sus funciones vitales en todas las fases de vida, en una visión idealizada de la posibilidad de hacer crecer o decrecer un edificio en el tiempo según las necesidades urbanas. Y en términos prácticos se hace referencia a una respuesta dinámica según determinados intervalos de tiempo o la mejora en fase de montaje para una reducción del impacto ambiental en la construcción.

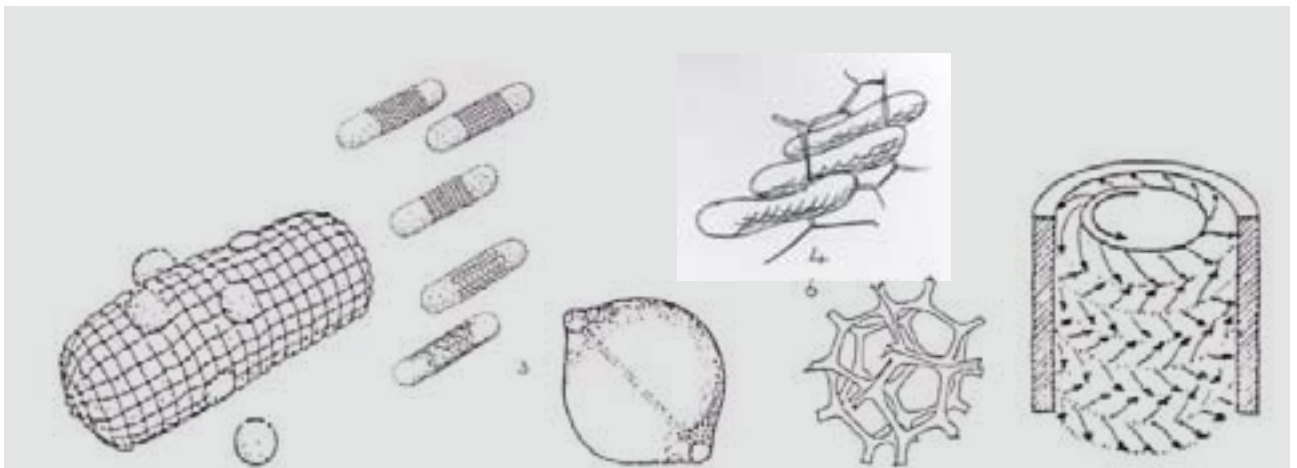
En los modelos la definición de posibles materiales está directamente relacionada con la escala de aplicación de los mismos. En la causística de los ejemplos del primer capítulo se observa que la aplicación del biomimetismo pasa de una escala muy pequeña como la aplicación de patrones naturales a la textura o rugosidad de las superficies, a otra de mayor dimensión como la construcción de estructuras de grandes luces.

En cualquier caso, tanto en las perspectivas de la definición del tipo de materiales como de las posibles aplicaciones, la observación del cactus seco aparece como una simplificación necesaria en el ámbito de este trabajo. Pero en términos más generales los desarrollos futuros de los experimentos deberían orientarse a la planta viva, con todas sus dinámicas implicadas.

El cactus seco es una configuración estática como resultado de las fuerzas intrínsecas y extrínsecas que han actuado sobre el tejido cuando el organismo estaba vivo. Por lo cual se considera una observación parcial de la planta, como en el caso de ver el esqueleto humano sin su relación estructural con los tendones. En las estructuras naturales animadas se distinguen como base de las formas vivas las neumáticas. Las relaciones de los esfuerzos de presión internos determinados por gases o por líquidos, como en el caso del agua almacenada en los tejidos del cactus, son una condición base para el desarrollo de la vida. En la estructura del cactus vivo se individualizan diferentes capas, como límites entre espacios cerrados, que no permiten mezclar el agua almacenada. Y en el mismo tiempo se observan los flujos helicoidales de líquidos que vienen transportados al interior de la planta como se refleja en la configuración de los haces vasculares.

Por lo cual los desarrollos futuros de los modelos deberían orientarse a involucrar las relaciones de equilibrios como: la estructura en tensegrity de las células en referencia a la introducción de elementos a tracción y comprimidos; la relación de presión entre las células respecto a la inserción de fibras y membranas; las dinámicas de transporte de los líquidos en referencia a configuraciones espaciales tridimensionales.



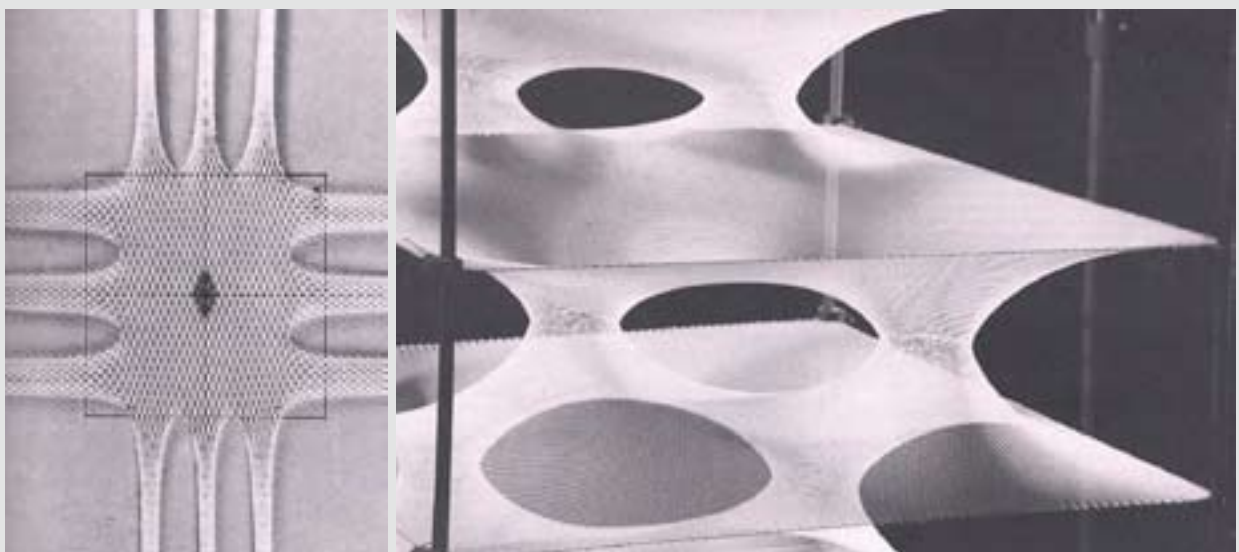
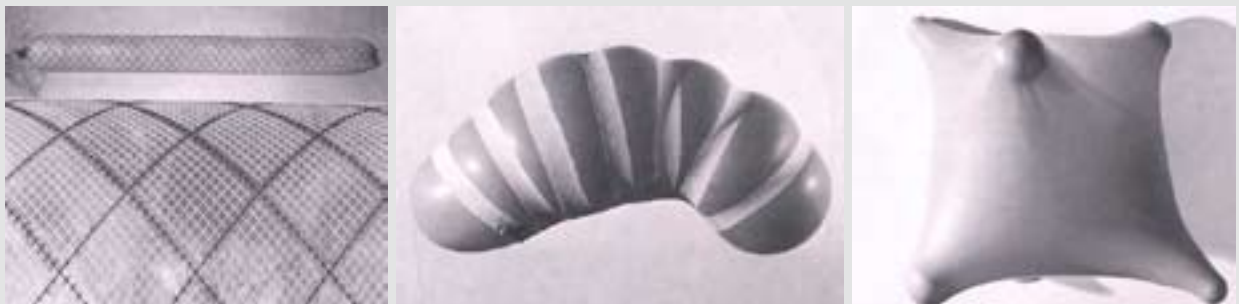


*Croquis del arquitecto Frei Otto como trabajo de clasificación de las dinámicas naturales: relación entre las fibras y mallas o puntales respecto a estructuras neumáticas; desarrollo en el espacio tridimensional de estructuras resistentes y células; flujos helicoidales según los vórtices de Taylor.*

*Abajo diferentes experimentos desarrollados por el grupo de investigación de la Universidad de Stuttgart sobre estructuras neumáticas y la deformación de mallas en el espacio.*

*IL 23 "Structures. Form-Force-Mass" Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1992.*

*IL 25 "Experiments. Form-Force-Mass" Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1990.*





## Conclusiones

El trabajo se ha desarrollado recorriendo más o menos en paralelo por un lado la ruta de la observación del elemento natural seleccionado (el tejido del cactus seco) y por otra parte la búsqueda de ejemplos en arquitectura a lo largo del siglo XX hasta hoy.

En la fase de observación del cactus, la interpretación formal de la madera seca ha llevado a una reproducción manual por medio de franja de papel. El comportamiento mecánico de estas últimas muestra un tejido que se abre gracias a la introducción de un elemento capaz de trabajar a compresión mientras las franjas son puestas en tracción. Por lo cual la generación de los modelos físicos ha ido hacia la investigación de un elemento interior como factor de cambio morfológico en el tejido. En particular las pruebas han llegado a la introducción reiterativa de una tercera franja de papel con una diferente ondulación que le permite al tejido quedar abierto.

Con la interrelación entre las pruebas manuales y el estudio del comportamiento de la planta viva (en lo posible en su hábitat natural) se ha observado cómo las maquetas quedan aun en una fase de interpretación estática del modelo natural sin responder a comportamientos dinámicos propios de la naturaleza. Resulta difícil, sino imposible, observar el crecimiento interior del tejido de la planta para poder responder a un sistema de agregación y organización celular específico sin quedar en interpretaciones más generales como la dirección principal de la forma de la célula o del crecimiento de la planta entera.

El complejo entramado de la madera de cactus nos muestra la estratificación de material en el sistema vascular de la planta. Por medio de la mayor o menor cantidad de sedimentos se interpreta la historia del tejido a lo largo de la vida de la planta. Pero en su desarrollo hacia arriba no será posible interpretar si en el entramado se ha ido acumulando material, por ejemplo, antes hacia la derecha que a la izquierda o viceversa. O sea reconstruir la historia de los esfuerzos de presión interior que han determinado una configuración respecto a otra.

En la interpretación y reproducción del modelo con la tercera fibra central se ha introducido un elemento que trabaja como un resorte. Este, realizado en papel, resulta en una fase de estudio ya que está estrechamente vinculado a la definición del material. Por otro es definible como punto de encuentro entre la reproducción del elemento natural y el carácter de la tecnología humana. En el contexto real de la planta, la relación de equilibrio entre las fibras está determinada por las presiones de los líquidos internos que definen la configuración del sistema, y no una fibra u otra que abre el tejido. Con la observación del tejido seco del cactus hace falta introducir un elemento «activo» que modifica el comportamiento general del sistema, como actitud más propia de la tecnología humana.

Con la instrumentación actual, además del modelo material se han desarrollado modelos tridimensionales por medio del programa Cinema 4D. En los primeros dibujos se ha repropuesto la hipótesis de la maqueta con las tres fibras mediante la reiteración en el espacio de un elemento base (dos fibras alargadas por la tercera en el centro). Pero la simple reproducción como dibujo de la maqueta encuentra limitaciones en la continuidad

del material y en la variabilidad propia de la construcción manual respecto a la digital. Por eso en una segunda fase se ha utilizado el modelo digital como instrumento independiente, para evaluar las posibles configuraciones espaciales del tejido propuesto, desvinculándolo de la forma cilíndrica de la planta.

Un tejido representado ha sido el modelo de dos fibras abiertas que siguen un curso sinusoidal que a su vez han sido reiteradas en el espacio con parámetros de deformaciones aleatorias para reproponer el modelo de la planta sin el elemento «activo» del resorte. El objetivo fue buscar una configuración casual del sistema similar a las dinámicas de las presiones internas de la planta. Un segundo tejido ha sido el modelo de las tres fibras. Se ha definido un elemento base compuesto por tres fibras abiertas en dirección longitudinal que forman dos espacios donde se han colocados en cada uno la fibra interna como representación del elemento «activo». El patrón base, así dibujado, ha sido reiterado en el plano para poder observar las posibles configuraciones espaciales de la malla.

Tanto en el desarrollo de las maquetas como en las simulaciones digitales se observan dos modelos que permiten interpretar las variables propias de la estructura vascular del cactus y las geometrías que generan. Ambas soluciones ofrecen salidas en paralelo con posibles interpretaciones de uso: desde una cubierta a doble curvatura o protecciones solares de fachada, hasta la posibilidad de mallas tubulares complejas para edificios en altura.

Seguramente la definición de una aplicación específica queda estrechamente vinculada a la definición de uno o más materiales (metal, madera, plásticos, hormigón, etc.). Tanto en lo que concierne a las fibras para su comportamiento mecánico, como para el sistema de fijación entre las mismas y a otros elementos arquitectónicos. Sin olvidar que según el tipo de material y la aplicación se debe involucrar en el desarrollo futuro de la idea también las características y las fases del montaje en la construcción.

Como se ha visto a lo largo del trabajo, se considera válida la hipótesis de tomar las soluciones presentes en la naturaleza porque corresponden a un proceso de diseño debido a la selección natural en largos periodos de tiempo. Además, compartir el mismo planeta aunque a diferentes escalas, hace que tanto los mecanismos naturales como la tecnología humana estén sujetas a las mismas condiciones (presión, gravedad, temperatura, viento, etc.). Por lo cual las soluciones presentes en la naturaleza han sido estudiadas y se siguen investigando para responder a las necesidades humanas y no sólo en el ámbito de la arquitectura.

La multiplicidad de interpretaciones y puntos de partidas (productos, prototipos y modelos) hace que resulten válidos numerosos ejemplos de la naturaleza, algunos estudiados desde hace tiempo y otros más recientes. El campo de trabajo resulta heterogéneo y se encuentran aplicaciones tanto a nivel de sistemas (o mecanismos) como de conceptos de las dinámicas naturales en productos ya presentes en el mercado, prototipos y modelos virtuales arquitectónicos. En cualquier caso no se encuentran aun soluciones que responden totalmente a una visión de una arquitectura integrada en el medio natural y con un impacto cero a lo largo de su ciclo de vida. Sobre todo si se involucra también la fase de extracción del material, su manipulación y producción. Es seguramente una imagen utópica de nuestro tiempo que, como en otras fases históricas de la cultura humana, nos fascina ofreciendo estímulos y nuevas interpretaciones.



## Bibliografía

### ARQUITECTURA Y BIOMIMESIS

#### Libros

Autores varios “*Arquitecturas genéticas III: nuevas técnicas biológicas y digital*”, ESARQ Universidad Internacional de Catalunya, España 2009.

El Corquis 147, “*Toyo Ito 2005-2009*”, Madrid 2009.

Juan María Songel “*Frei Otto. Conversación con Juan María Songel*”, Ed. Gustavo Gili, Barcelona 2008.

Michael Hensel, Achim Menges y Michael Weinstock, “*AD 180: Techniques and Technologies in morphogenetic design*”, Ed. Wiley Academy, 2006.

Matilda McQuaid, “*Extreme textiles. Designing for high performance.*”, Princeton Architectural Press, New York 2005.

Branko Kolarevic y Ali M. Malkawi, “*Performative architecture - Beyond Instrumentality*”, Spon Press, New York 2005.

Miguel Seguí Buenaventura, Emilio Pérez Piñero y Félix Candela, “*Félix Candela y Emilio Pérez Piñero : un diálogo imaginal : proyecto para el concurso del Velódromo de Anoeta*”, Ed. Rueda, Madrid 2004.

Michael Hensel, Achim Menges y Michael Weinstock, “*AD 169: Emergence. Morphogenetic design strategies*”, Ed. Wiley Academy, 2004.

M. W. Collins, M. A. Atherton y J. A. Bryant, “*Nature and Design*”, WIT Press, Reino Unido 2005.

M. W. Collins y C. A. Brebbia, “*Design and nature II: comparing design in nature with science and engineering*” WIT Press, Reino Unido 2004.

Autores varios “*Genetic Architectures / Arquitectura Genética*”, ESARQ Universidad Internacional de Catalunya, Ed. Lumen, España 2003.

Hugh Aldersey-Williams 2003, “*Zoomorphic: new animal architecture*”, Ed. Laurence King, London.

Steven Vogel, “*Anca y palanca. Mecánica natural y mecánica humana*”, Ed. Tusquets, Barcelona 2000.

Eugene Tsui, “*Evolutionary architecture : nature as a basis for design*”, Ed. John Wiley, New York 1999.

Shigeru Ban, Frei Otto, Hideki Yoshimatsu y Kiyoshi Komatsu, “*Shigeru Ban: projects in process to Japanes Pavillion, Expo 2000 Hannover*”, Ed. TOTO Shuppan, Tokyo 1999.

Michael Weinstock, “*TS: artefacts and instruments: material forms and formulation of thoughts*”, Ed. Architectural Association, London 1998.

Richard Rogers y Philip Gumuchdjian, “*Città per un Piccolo planeta*”, Ed. KAPPA, Roma 1997.

Mario Salvadori y Robert Heller, “*Le strutture in architettura*”, Ed. ETAS s.r.l., Milano 1992 (tercera edición).

Nicholas Grimshaw, Rowan Moore y Kenneth Powell, “*Structure, space and skin : the work of Nicholas Grimshaw & partners*”, Ed. Phaidon, London 1993.

José Fernández Huerta, “*Trabajos manuales*”, Ed. CEAC S.A., Barcelona 1992

Autores varios, edición a cargo de Luis Fernández-Galiano, “*Arquitectura, técnica y naturaleza. en*

*el caso de la modernidad*", Un curso de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Madrid 1984.

Philip Stedman, "*Arquitectura y Naturaleza. La analogía biológica en el diseño*" Blumes Ediciones, Madrid 1982.

S. A. Wainwright, W. D. Biggs, J. D. Currey y J. M. Gosline "*Diseño mecánico en organismos*". Blume, Madrid 1980

Peter Pearce, "*Structure in nature: is as strategy for design*", The MIT Press Cambridge, Massachusetts and London, Reino Unido 1978.

Conrad Rolando, "*Frei Otto: Estructuras*", Ed. Gustavo Gili, Barcelona 1973.

Heinz Hosdorf y Carlos Benito Hernández, "*Modelos reducidos*" Ed. IETcc, Madrid 1972.

D'Arcy W. Thompson, "*Crecita e Forma. La geometría della natura*", Ed. Boringhieri, Torino 1969.

## Revistas

Jordi Alemany, "El futuro está en la naturaleza", Revista EcoHabitar no 22. Verano 2009.

Edgar Stach, "Synthesis of form, structures and material", Revista TensiNews N° 3, Marzo 2203

Frei Otto "*Experiments. Form-Force-Mass*" Institut für leichte Flächentragwerke, IL 25, Stuttgart 1990.

Frei Otto, "*Structures. Form-Force-Mass*" Institut für leichte Flächentragwerke, IL 23 Stuttgart 1992.

Frei Otto y Klaus Bach "*Form. Form-Force-Mass*" Institut für leichte Flächentragwerke, IL 23 Stuttgart 1988.

Ludwig Glaeser, "*The work of Frei Otto and his teams 1955-1976*", Institut für leichte Flächentragwerke IL 17, Stuttgart, 1977.

## PDF (Febrero/ Agosto 2010)

A. Pérez García y F. Gómez Martínez "Natural structures: strategies for geometric and morphological optimization" Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, ETS de Arquitectura, Universidad Politécnica de Valencia. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, España. [http://dspace.upv.es/xmlui/bitstream/handle/10251/6955/PAP\\_PEREZ\\_893.pdf?sequence=1](http://dspace.upv.es/xmlui/bitstream/handle/10251/6955/PAP_PEREZ_893.pdf?sequence=1)

Josep Ignasi Llorens Durán, "Zoomorfismo y bio-arquitectura. Entre la analogía formal y la aplicación de los principios de la naturaleza", Departament de Construccions Arquitectòniques I, Universitat Politècnica de Catalunya. Conference report: II Jornadas de investigación en construcción: Actas de las Jornadas. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja 2008, España. <http://hdl.handle.net/2117/2156>

Antonio Juárez 2007, "El arte de construir con agujeros" Orbis Tertius Revista de pensamiento y análisis de la Fundación SEK, Número 1, Mayo de 2007.

Jorge Riechmann, "Biomímesis: el camino hacia la sustentabilidad", 2006 [http://www.losverdesdeandalucia.org/documentos/EL\\_CAMINO\\_HACIA\\_LA\\_SUSTENTABILIDAD.pdf](http://www.losverdesdeandalucia.org/documentos/EL_CAMINO_HACIA_LA_SUSTENTABILIDAD.pdf)

Jorge Riechmann, "Biomímesis", revista El Ecologista, no 36, verano 2003. <http://www.ecologistasalcalah.org/docs/curso/Biomimesis.pdf>

## PLANTAS Y CACTUS

R. Kirkpatrick, A. Moore, B. Knoll, V. Garcia, A. Larsen, A. Murdock y M. Park "*Cladistics of the*

*Cacti*", Department of Integrative Biology, University of California-Berkeley 2009

Stephan Halloy, "Crecimiento exponencial y supervivencia del cardón (*Echinopsis atacamensis* subsp. *pasacana*) en su límite altitudinal (Tucumán, Argentina)", *Ecología en Bolivia*, Vol. 43, Abril 2008.

Janice Glimn-Lacy y Peter B. Kaufman, "Botany illustrated: introduction to plants, major groups, flowering plant families.", Ed. Springer, EE. UU. 2006.

A. Altesor y E. Ezcurrawz, "*Functional morphology and evolution of stem succulence in cacti*", *Journal of Arid Environments*, 2003.

S. Talley, G. Iaccarino, G. Mungal y N. Mansour, "*An experimental and computational investigation of flow past cacti*", Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs 2001.

Banco Base de Semillas INIA, "*Fichas Especies: Echinopsis atacamensis*", Chile 1974

### **Paginas Web (Febrero/ Agosto 2010)**

#### **Arquitectura y Biomimetismo:**

Biomimicry Institute: <http://biomimicryinstitute.org/>

Wyss Institute (for Biologically Inspired Engineering): <http://wyss.harvard.edu/>

BIONIS (The Biomimetics Network for Industrial Sustainability): <http://www.reading.ac.uk/bionis/>

Emergent Technologie & Design: <http://emtech.aaschool.ac.uk/>

International Association for Shell and Spatial Structures: <http://www.iass-structures.org/>

TensiNet association: <http://www.tensinet.com/>

Institut INSPIRE (Initiative pour la Promotion d'une Industrie Réconciliée avec l'Ecologie et la société): <http://www.inspire-institut.org>

Inhabitat (designa will save the world): <http://www.inhabitat.com>

Arup: [http://www.arup.com/About\\_us.aspx](http://www.arup.com/About_us.aspx)

Airlight Ltd. Suiza: <http://www.airlight.biz/>

#### **Plantas y cactus:**

A.M.I.N.T. (Associazione Micologica Italiana Naturalistica Telematica): <http://www.funghiitaliani.it/botanica/morfologia.html>

Colección de cactaceas Universidad Autónoma de Madrid (UAM): <http://investigacion.izt.uam.mx/ccacta/Menu1.htm>

<http://suculentofilo.blogspot.com/>

Atlas de Histología Vegetal y Animal: <http://webs.uvigo.es/mmegias/inicio.html>

Dalhousie Collection of Cacti & other succulents: <http://cactus.biology.dal.ca/>

EcoLibrary: <http://ecolibrary.org/>

#### **Otros:**

Real Academia Española: <http://www.rae.es/rae.html>

Wikipedia, enciclopedia de contenido libre (idiomas principales consultados: español, inglés e italiano): <http://www.wikipedia.org/>