

LA NATURALEZA, UNA BRILLANTE INGENIERA EN DESARROLLOS TECNOLÓGICOS INNOVATIVOS

Palabras clave: Biomimética, materiales, superficies.

Key words: Biomimetics, materials, surfaces.

La naturaleza nos brinda un sinfín de ideas para el desarrollo de nuevas tecnologías más sustentables y ecológicamente superiores. En el presente trabajo se describen, brevemente y con algunos ejemplos, los materiales biológicos y sus características como así también algunas de las superficies biológicas que poseen interesantes propiedades funcionales. Se concluye con un resumen de esta nueva ciencia denominada biomimética.

**Nature, a brilliant engineer in innovative technological developments
Abstract**

Nature provides us with endless ideas for the development of new, more sustainable and ecologically superior technologies. This paper briefly describes, with some examples, the biological materials and their characteristics, as well as some of the biological surfaces that have interesting functional properties. It concludes with a summary of this new science called biomimetics

■ INTRODUCCIÓN

Nadie duda que la naturaleza ha sido siempre una fuente de inspiración para las artes, desde las visuales hasta la literatura y la música. Sólo pensemos en los poemas de Juan Ramón Jiménez, en los cuadros de los impresionistas, o en la música del genio de Bonn, en su sinfonía Pastoral, cuando en su segundo movimiento aparece el canto del ruiseñor, la codorniz y el cuclillo en el decir melancólico del oboe, la flauta y el clarinete. Pero ahora bien sabemos que numerosos inventos también utilizaron la naturaleza como musa inspiradora, desde Otto Lilienthal quien fuera, tras sus estudios sobre el vuelo de las cigüeñas,

uno de los primeros en escribir un libro sobre biomimética “El vuelo de los pájaros como base de la aviación”, obra publicada en 1889 (Figuras 1 y 2), hasta George de Mestral, el ingeniero suizo inventor del velcro. Los desarrollos tecnológicos basados en los sistemas naturales reciben el nombre de biomimética. La idea consiste en trasladar una determinada propiedad funcional de un sistema biológico a un sistema artificial. Si tomáramos como ejemplo lo propuesto por Lilienthal, las aves serían el sistema biológico, el vuelo la propiedad funcional y el avión el sistema artificial. En resumen, la biomimética es el resultado tecnológico del acto de tomar prestado o robar ideas de la naturaleza.

■ Eduardo Alfredo Favret¹

¹Instituto de Suelos. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales (CIRN). Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CNIA). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Instituto de Tecnología “Prof. Jorge Sabato”, Universidad Nacional de General San Martín - Comisión Nacional de Energía Atómica (UNSAM-CNEA).

*E-mail: favret.eduardo@inta.gob.ar

La abundancia de estos diseños eficientes y multifuncionales se debe a los 3800 millones de años de evolución. Los ingeniosos mecanismos de la madre naturaleza llevaron a los científicos a desarrollar nuevos sistemas en diversos campos. Aunque las ideas de la biología se han utilizado para inspirar a los ingenieros durante más de 2000 años, los métodos utilizados con éxito para introducir conceptos biológicos en la tecnología han sido en general accidentales. Con nuestra mejor comprensión de la biología y de los mecanismos para la innovación, hemos llegado a una etapa en la que la transferencia sistemática de conceptos de la biología podría ser una forma consistente y productiva de

mejorar nuestra tecnología. El interés radica no solo en la abstracción de ideas útiles del mundo vivo, sino también en el proceso por el cual esto se hace.

Uno podría preguntarse cuánto cuesta diseñar, fabricar, mantener y finalmente reciclar, una estructura. Para estructuras y materiales de ingeniería, este es un costo en efectivo, y el más barato es el que gana la licitación. Para los organismos vivos el costo es la energía, y la competencia no es la del mercado comercial, sino el de la naturaleza, donde el más apto sobrevive y donde el fracaso equivale a la muerte.

Veamos con algunos ejemplos la importancia de estudiar la naturaleza para el desarrollo de nuevas tecnologías. Por un lado, sus materiales y por otro sus superficies.

■ LOS MATERIALES BIOLÓGICOS

La ciencia de los materiales biológicos es una nueva y creciente rama de la Ciencia e Ingeniería de Materiales [Meyers 2014]. Tiene tres componentes distintos pero interrelacionados

- Materiales biológicos naturales: materiales celulares y extracelulares, tejidos, órganos y organismos.
- Materiales sintéticos en aplicaciones biomédicas (biomateriales).
- Materiales y diseño bioinspirados (biomiméticos).

Los materiales producidos por organismos tienen propiedades que normalmente superan las de los materiales análogos fabricados sintéticamente con composiciones de fase similares. Los materiales biológicos se ensamblan en ambientes acuosos

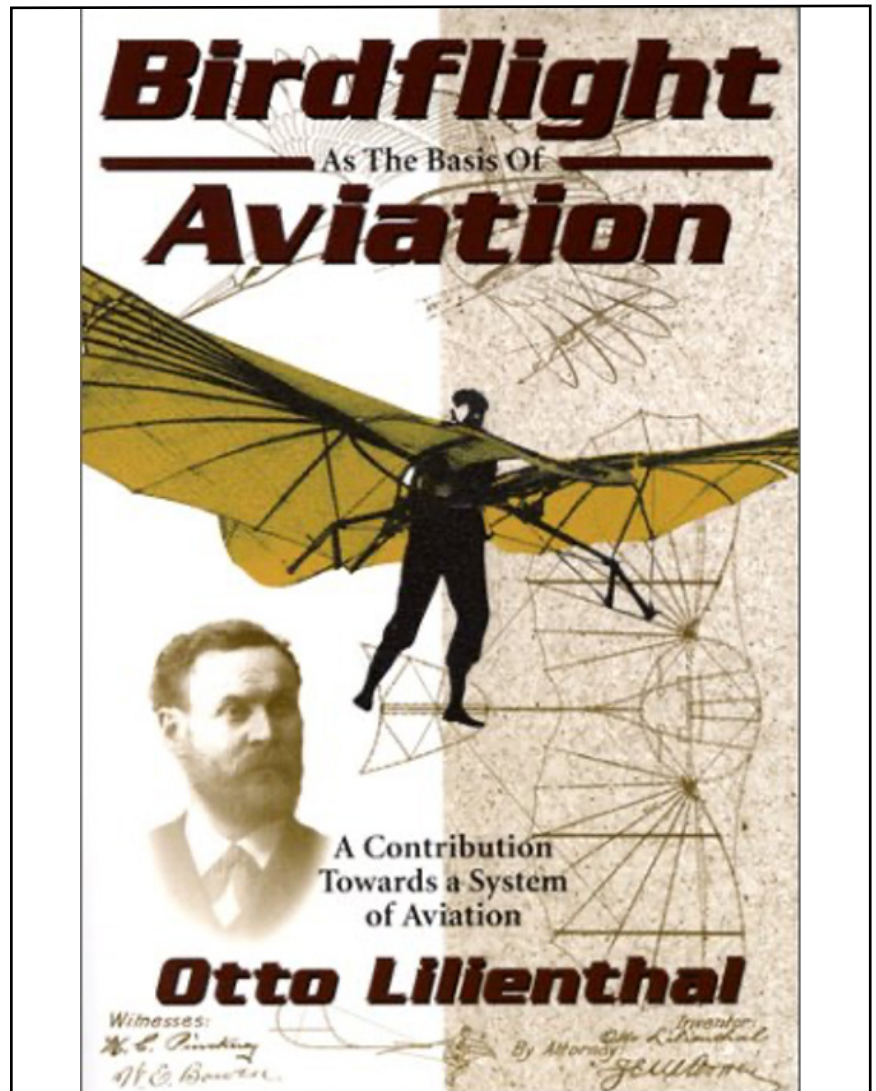


Figura 1: Edición actual en inglés del libro “El vuelo de las aves como base para la aviación”.



Figura 2: Lilienthal probando uno de sus prototipos. 16.08.1894. Imagen: Ottomar Anschütz.

en condiciones suaves, mediante el uso de biomacromoléculas. Las macromoléculas orgánicas recolectan y transportan materias primas y se autoensamblan y coensamblan de manera constante y uniforme en núcleos y sustratos ordenados de corto y largo alcance. Las estructuras resultantes están altamente organizadas desde escalas moleculares a nano, micro y macro, a menudo de manera jerárquica, con nanoarquitecturas intrincadas que finalmente forman una miríada de tejidos diferentes. Son a la vez "inteligentes", dinámicas, complejas, autocurativas y multifuncionales, características difíciles de lograr en sistemas puramente sintéticos. Por lo tanto, el uso de principios biológicos en la síntesis y ensamblaje de materiales, puede ser un camino para nuevos desarrollos nanotecnológicos.

Los materiales y estructuras biológicas tienen características únicas que los distinguen de sus contrapartes sintéticas. Estos se muestran en la figura esquemática [Arzt 2006], expandida a un heptaedro (Figura 3). Los siete componentes se presentan debajo:

- Las estructuras se ensamblan de abajo hacia arriba, en lugar de arriba hacia abajo. Esta es una necesidad del proceso de crecimiento. Esta característica se denomina "autoensamblaje".
- Muchos componentes sirven para más de un propósito; por ejemplo, la piel protege el organismo y regula la temperatura; El hueso es un componente estructural, así como una fábrica de glóbulos rojos. Por lo tanto, la estructura se denomina 'multifuncional'.
- Los materiales biológicos tienen la capacidad de autocura-

ción, pueden revertir los efectos de un daño determinado.

- Las propiedades dependen en gran medida del nivel del agua en la estructura. Hay algunas excepciones notables, como el esmalte, pero esta regla se aplica a la mayoría de los materiales y es de primordial importancia.
- Evolución, restricciones ambientales y la limitada disponibilidad de materiales dictan la morfología y propiedades. Los principales elementos disponibles son el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, calcio, fósforo, silicio y carbono. Además, los oligoelementos (por ejemplo, Fe) son cruciales para la determinación de la fase en algunos sistemas, por ejemplo, óxido de hierro en dientes radulares de quitón [Weaver 2010]. Los metales sintéticos más útiles (hierro, aluminio, cobre) están prácticamente ausentes y solo están presentes en cantidades mínimas y aplicaciones alta-

mente especializadas. El procesamiento de estos elementos requiere de alta temperatura no disponible en los organismos naturales.

- Excepto por unas pocas excepciones notables, la síntesis de materiales biológicos se lleva a cabo en un medio acuoso, a temperatura ambiente y presión de 1 atm.
- Las estructuras son jerárquicas, es decir, tienen diferentes niveles de escala que le confieren distintas propiedades.

Los principales componentes de los materiales biológicos se pueden dividir en dos grupos: materiales orgánicos y biominerales. Los materiales orgánicos que pueden ser comparados con los polímeros, proporcionan, en su mayor parte, una mayor capacidad de sufrir deformaciones, mientras que los minerales sostienen la carga. Los componentes orgánicos se pueden extender en tensión, mientras que la cerámica resiste principalmente la compresión.

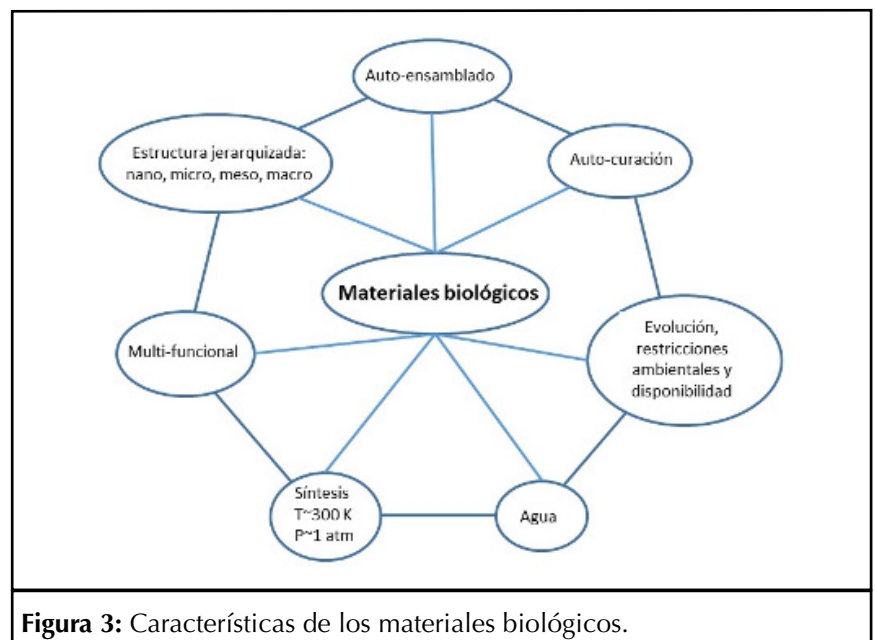


Figura 3: Características de los materiales biológicos.

sión (por ejemplo, esmalte dental). Pocos sistemas biológicos están sujetos a tensión uniaxial (las excepciones son ligamentos y tendones), pero la flexión es un modo común de carga. En flexión, uno la mitad de la sección transversal está sujeta a compresión y la otra mitad a tensión. Solo en raras ocasiones los minerales no están presentes en combinación con materiales orgánicos. Los componentes orgánicos, a su vez, tienen una amplia variedad de estructuras que confieren propiedades uniaxiales, biaxiales o triaxiales. Las unidades moleculares básicas de los componentes orgánicos son los aminoácidos organizados principalmente en polipéptidos y polisacáridos. Los polisacáridos son los componentes básicos de celulosa y quitina. Los polipéptidos forman proteínas. Estas son prominentes en los mamíferos y comprenden la mayoría de los materiales extracelulares. La proteína principal en los mamíferos es el colágeno, una molécula orgánica fibrilar.

Es importante volver a resaltar que los materiales biológicos se caracterizan por su naturaleza jerárquica. También los materiales sintéticos tienen jerárquica, pero en muchos casos solo tienen 2 o 3 niveles, mientras que los materiales biológicos pueden tener de 4 a 8 niveles, dependiendo de la complejidad de la estructura. Por ejemplo, el exoesqueleto del cangrejo cuenta con más de 5 niveles [Chen 2008]. Los materiales biológicos también tienen una diferencia importante con los sintéticos: su capacidad de autocuración, habilitada por las células existentes en el material. Así, el material puede recuperar sus propiedades originales. Hay una interacción compleja que toma lugar entre los diferentes niveles de jerarquía.

A su vez, los materiales biológicos exhiben una gama de propieda-

des funcionales, que han sido ampliamente analizadas en los últimos años. Cabe destacar las propiedades ópticas de la estrella quebradiza, un equinodermo, que cambia de color negro (durante el día) a blanco (de noche) [Aizenberg 2010]; la generación de corriente eléctrica en anguilas [Catania 2015]; o bien la detección del campo magnético terrestre por los cerebros de las aves que actúan como sistemas de orientación [Zapka 2009].

El estudio de materiales biológicos se está beneficiando de las modernas herramientas analíticas, de caracterización y computacionales y por el número cada vez mayor de investigadores que trabajan en este campo, a nivel mundial. Lo mismo para los llamados biomateriales en sinergia con los avances en la síntesis y procesamiento de materiales, y con la comprensión cada vez mejor de la interacción material-organismo. Pero el diseño bioinspirado plantea el mayor desafío tanto experimental como analíticamente. El desarrollo y la implementación de los conceptos aprendidos de la naturaleza pueden existir en dos niveles:

- Diseño, utilizando conceptos de la naturaleza, pero aplican-

do materiales y métodos de procesamiento convencionales.

- Estructuras bioinspiradas de base molecular. En este enfoque, imitamos la naturaleza hasta el nivel molecular, utilizando un enfoque biológico de autoensamblaje e ingeniería molecular.

El primer enfoque es mucho más convencional y ha sido implementado con éxito en varias aplicaciones. No importa cual organismo elijamos; cada uno de ellos puede enseñarnos lecciones valiosas en nanotecnología, diseño de materiales, fabricación de materiales, y síntesis de materiales. A menudo sorprende descubrir las propiedades de "alta tecnología" de materiales producidos por la naturaleza. Analicemos, a continuación, el caso de la esponja de mar.

1.1 LA ESPONJA DE MAR DE AGUAS PROFUNDAS

En 1841 el biólogo inglés Richard Owen se maravilló con el intrincado esqueleto de una nueva especie de esponja marina encontrada cerca de Filipinas. Decía que se parecía a "una delicada cornucopia", tejida



Figura 4: *Euplectella aspergillum*. Imagen: NOAA Photo Library.

con "hilos rígidos, brillantes y elásticos, que se asemejan a los más finos cabellos de vidrio hilado". El esqueleto está hecho de vidrio, que el animal, *Euplectella aspergillum*, apodado "canasta de flores de Venus", crea utilizando ácido extraído del agua de mar (Figura 4).

Los científicos aún se maravillan con esta esponja 180 años después. Sus notables propiedades incluyen una sorprendente longevidad (se cree que algunas esponjas de vidrio viven muchos miles de años, lo que las ubica entre los animales más longevos) y la capacidad de canalizar la luz a través de sus hilos de sílice a la manera de la fibra óptica, cuyo rendimiento y propiedades son muy similares a las fibras ópticas sintéticas.

Durante las últimas dos décadas, un grupo de biólogos, científicos de materiales e ingenieros de la Universidad de Harvard se ha centrado en la característica de la canasta de flores de Venus que atrajo a Owen: el intrincado diseño de su esqueleto de vidrio (Figura 5), cuya arquitectura está controlada genéticamente, desde la escala nanométrica a la macroescala.

Su trabajo reciente revela que el esqueleto es, por razones desconocidas, excepcionalmente fuerte, casi tan indestructible como sea posible para este tipo de estructura. La fuerza del esqueleto se deriva de su peculiar patrón de celosía, que intrigó por primera vez a la científica de materiales y química de Harvard, Joanna Aizenberg, hace unos 20 años. Los investigadores quedaron fascinados por la arquitectura de este esqueleto, que parecía ser periódica, pero no simple. Señalaron que las vigas de vidrio que forman el esqueleto de la canasta de flores de Venus tienen mucho en común con los ensamblajes de vigas que se utilizan para estabilizar puentes y rascacielos. Durante más de un siglo, el diseño preferido de los ingenieros para las armaduras ha sido una celosía resistente que consiste en una rejilla cuadrada con diagonales en ambas direcciones para mayor soporte. El esqueleto de la canasta de flores de Venus, sin embargo, tiene pares de diagonales que corren en ambas direcciones en lugar de las diagonales únicas que se entrecruzan en una armadura típica. Estos pares están separados por lo que la cuadrícula se ve como un tablero de ajedrez, con diagonales que se cru-

zan cada dos cuadrados [Aizenberg 2005].

Los investigadores fabricaron y simularon por computadora una celosía basada en la esponja y la compararon con otras tres estructuras de celosía del mismo peso, incluido el patrón de armadura estándar. En simulaciones y experimentos, vieron que la red bioinspirada resistía la mayor tensión, primero de compresión en una dirección y luego de presiones opuestas en tres puntos en otra prueba, antes de romperse. En simulaciones posteriores, variaron el número de diagonales, así como su espaciado y grosor para encontrar la red que pudiera soportar la mayor compresión. El mejor modelo resultó ser el de la esponja. Con sus diagonales adicionales, la red de la esponja tiene más juntas que una armadura tradicional y menos distancia entre las juntas, lo que puede permitir que la estructura sostenga una mayor compresión antes de pandearse.

Los investigadores también están buscando una patente para el enrejado inspirado en una esponja que crearon. Agregar más fuerza a las estructuras arquitectónicas sin agregar más peso teóricamente podría permitir puentes más largos, una infraestructura más liviana que sea más fácil de transportar o incluso una ingeniería más optimizada en vehículos con destino al espacio. Según Pablo Zavattieri, profesor de ingeniería civil en la Universidad de Purdue, "el proceso de prueba y error durante millones de años de evolución saca lo mejor" de los materiales. Sin embargo, en el caso de la canasta de flores de Venus, el propósito evolutivo de su incompre-sibilidad no está claro.

Las esponjas a menudo viven a miles de metros de profundidad donde la presión del agua es extrema,

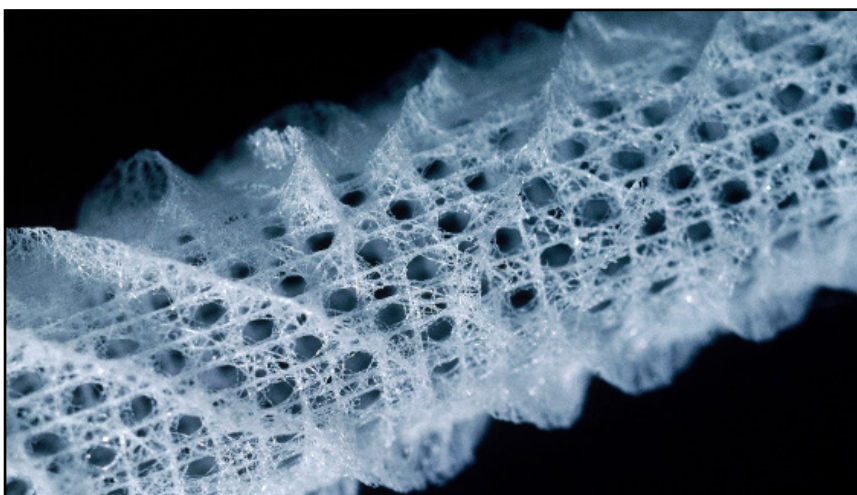


Figura 5: Esqueleto del *Euplectella aspergillum*. Imagen: Kenneth M. Highfill / Science Source.

pero esta presión proviene de todas las direcciones, presionando los lados opuestos de las vigas de vidrio por igual y anulándose. Sin embargo, la esponja necesita una estructura fuerte para levantarse y filtrar el plancton del agua. La fuerza bruta no es todo lo que ofrece la cesta de flores de Venus. Las paredes de celosía de su esqueleto son solo uno de varios niveles de complejidad en su estructura. Si uno se acercara podría ver cómo sus fibras pueden moverse ligeramente dentro de sus paredes reticulares, o cómo su disposición de proteínas y moléculas de sílice detiene las fracturas en su camino. También se está analizando la forma en que algunos de los hilos no están completamente unidos a los demás, lo que permite la flexibilidad del esqueleto, y cómo la estructura resistiría la torsión.

De hecho, uno puede enseñar un curso de mecánica y fibra óptica enteramente basado en el diseño del vidrio producido por la esponja de aguas profundas. Es también una gran lección de arquitectura bioinspirada, se puede pensar en esta estructura como una mansión iluminada construida para ser habitada. De hecho, un par de camarones viven dentro de esta casa de cristal, que es lo suficientemente fuerte como para resistir el impacto de las piedras.

■ LAS SUPERFICIES BIOLÓGICAS

Hay numerosos libros escritos y trabajos publicados sobre las superficies biológicas y cómo sus propiedades permiten distintas aplicaciones tecnológicas [Gorb 2009 1] [Gorb 2009 2] [Barthlott 1997] [Favret 2009]. Las propiedades funcionales de las superficies biológicas han ganado un interés creciente en las últimas décadas, especialmente con respecto a la humectación y la autolimpieza. Las epidermis de determinados artrópodos (Collembola)

y plantas (*Nelumbo nucifera*, entre otras), son superficies superhidrofóbicas y/o superoleofóbicas, que sirvieron como modelos para el diseño principal de superficies resistentes a altas temperaturas utilizadas en altos hornos para evitar que las toberas se derritan (Figuras 6 y 7) [Koch 2009] [Ragesh 2014] [Bhushan 2011] [Hensel 2016] [Konrad 2019].

Otra propiedad funcional sumamente interesante que tienen los organismos es su capacidad para adherirse a las superficies. Percebes [Berglin 2003] (Figura 8) y mejillones [Waite 1987] [Waite 2005] se adhieren de manera permanente a través complejos procesos que involucran la química. Numerosos animales, como insectos, lagartijas y ranas, han desarrollado dispositivos de sujeción reutilizables. Los micro dispositivos de adhesión en animales que resultan de gran interés para su estudio son los que se vinculan con tres mecanismos que actúan por separado o juntos: adhesión húmeda (capilaridad), adhe-

sión seca (van der Waals) y succión (a través de una presión interna reducida) [Barnes 2007]. Numerosas superficies biológicas tienen también la capacidad de ser anti-adherentes, como la piel de tiburón. Esta última llevó al desarrollo por parte de la empresa *Sharklet* de un material que es capaz de limitar el crecimiento bacteriano mediante un proceso conocido como mecanotransducción, el material genera estrés en los microorganismos de tal forma que las bacterias mueren en minutos sin darles tiempo a dividirse [Nihiser 2014]. Las propiedades ópticas también son muy estudiadas, por ejemplo, la iridiscencia de las mariposas, relacionado con la nanoestructura del ala (Figura 9), o el denominado “efecto ojo de polilla”, superficie anti-reflectante producto de los nanodomas distribuidos periódicamente en la superficie de los ojos de estos lepidópteros [Vukusic 2003] [Guanjun Tan 2017].

Veamos a continuación un ejemplo de superficie anti-adherente, dos



Figura 6: *Nelumbo nucifera*, hoja superhidrofóbica. Imagen: Eduardo Favret.

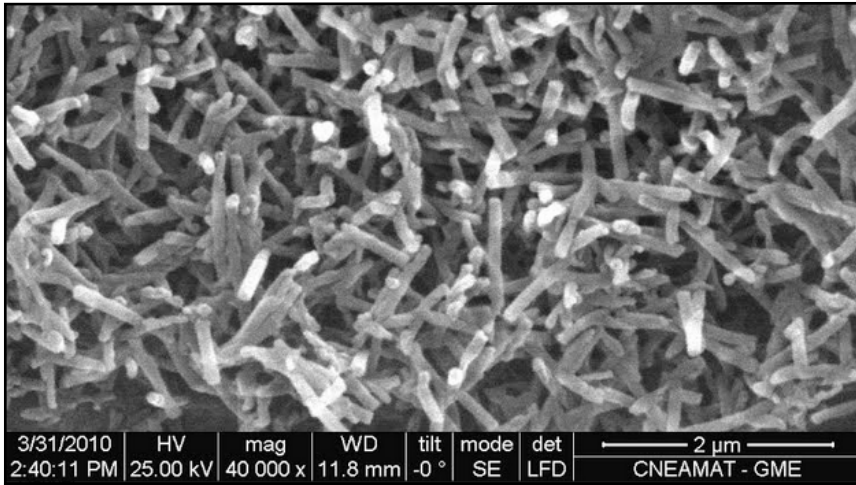


Figura 7: *Nelumbo nucifera*. Ceras epicuticulares de la hoja superhidrofóbica, observadas con microscopía electrónica de barrido. Imagen: Adriana Domínguez (CNEA).

de superficies antibacterianas y un ejemplo de superficies fotónicas.

2.1 SUPERFICIE ANTIADHERENTE PARA SU USO EN EL SUELO INSPIRADA EN EL COLEÓPTERO *DILOBODERUS ABDERUS*

Es sabido en el campo de la agronomía que durante la acción mecánica que implica la remoción o disgregación del suelo, la adhesión del mismo a las herramientas agrícolas juega un papel importante, afectando tanto la calidad del trabajo como la eficiencia del proceso, es decir un mayor consumo energético.



Figura 8: Percebe adherido en una colonia. Imagen: GNU Free Documentation License.

Ciertas tareas fundamentales como la siembra se realizan preferentemente con un alto contenido de agua en el suelo ya que es favorable para una rápida germinación y emergencia del cultivo. Sin embargo, bajo estas condiciones, la adherencia del suelo a las partes del tren de distribución de la sembradora, como cuchillas, cultivadores, pásas, escarificadoras, puede afectar la colocación correcta de la semilla en el surco, lo que reduce la eficiencia de la implantación. Muchas veces se debe parar la mano de obra por taponamiento de la sembradora, a pesar de que las condiciones del suelo permitan el tránsito de los equipos. La reducción de la adherencia del suelo a las piezas o herramientas de trabajo permitiría, en primer lugar,



Figura 9: Mariposa *Morpho* azul. Imagen: Derkarts.



Figura 10: *Diloboderus abderus*. Hembra. Imagen: Ted MacRae (Missouri University).

lograr la apertura y cierre de surcos que permitan una adecuada distribución y germinación de las semillas y, en segundo lugar, adelantar el inicio de las labores aumentando el tiempo disponible para realizar las tareas. Tener más tiempo significa aumentar la oportunidad de trabajar, lo que permitiría reducir la potencia requerida para realizar la misma cantidad de trabajo y reducir tanto los costos de operación como la aplicación de cargas superficiales que conducen a la densificación del suelo. Lo anterior también se aplica a los equipos para la adición de fertilizantes o pesticidas al suelo, mediante gradas de discos antes de la siembra del cultivo o mediante cultivadores de cultivos en hileras después de la emergencia del cultivo.

Se debe tener especial consideración con las labores de arado o labranza o subsolado realizadas con escarificadores, cinceles o subsoladores. Estas labores generan una profunda perturbación del suelo y por ello son las que demandan mayores niveles de potencia. En este caso, la adhesión del suelo a las herramientas de trabajo hace que la interacción entre ellas se produzca en una interfaz suelo-suelo. Reducir dicha adhesión significa sustituir el rozamiento suelo-suelo por rozamiento entre metal y suelo, lo que puede reducir el requerimiento energético de las labores.

Para superar la adhesión del suelo a las superficies sólidas de los componentes de la maquinaria agrícola, investigadores del INTA propusieron aplicar las características de la fauna edafológica para el diseño de dichas superficies. Los animales que habitan el suelo se mueven sin que el suelo se les adhiera, debido a sus formas geométricas, hidrofobicidad, sistemas micro-electro-osmóticos, lubricación y flexibilidad de la superficie cuticular. Las caracte-

terísticas fisicoquímicas, mecánicas y geométricas de estas especies pueden ser utilizadas para el diseño de materiales y estructuras de herramientas agrícolas. Se han escrito muchos artículos sobre este tema, proponiendo diferentes diseños, pero la mayoría de ellos muestran datos obtenidos en piscinas de suelo y no en el campo. Los investigadores enfocaron su trabajo a los escarabajos considerados excavadores. Uno de los escarabajos más comunes que se encuentran en la región pampeana de Argentina es el *Diloboderus abderus*, que excava túneles para depositar sus huevos. Se abordó el problema de la adhesión al suelo mediante la modificación de la topografía superficial del cuerpo involucrado en una herramienta agrícola, en este caso una púa para hacer un surco, tomando como base la microtopografía de la cutícula de la

hembra del escarabajo *Diloboderus abderus* (Figura 10). La cutícula de la cabeza y tórax del insecto muestran cavidades semicirculares de un cierto diámetro y separadas una cierta distancia, con una distribución no homogénea (Figura 11). A partir de estas observaciones se generó un patrón topográfico de cavidades de 2 mm de diámetro, separadas una distancia de 10 mm, siguiendo una distribución hexagonal (Figura 12). Los datos experimentales fueron adquiridos en pruebas de campo. Los resultados mostraron que la "púa biomimética" reduce la fuerza de tracción en un 5% en comparación con una púa lisa (control), lo que significa una reducción del consumo de combustible. Esto tiene un profundo impacto ecológico y económico como resultado del ahorro de combustible y tiempo de trabajo [Favret 2017] [Tesouro 2018].

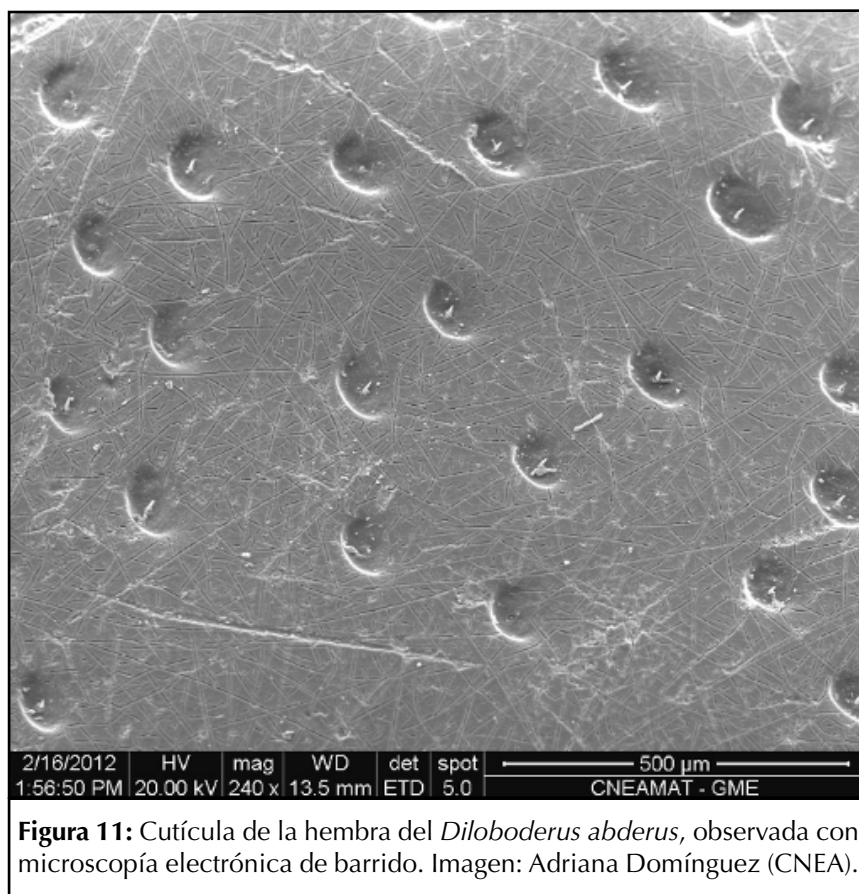


Figura 11: Cutícula de la hembra del *Diloboderus abderus*, observada con microscopía electrónica de barrido. Imagen: Adriana Domínguez (CNEA).

2.2 SUPERFICIES ANTIBACTERIANAS

En las instalaciones de pasteurización industrial, por ejemplo, el ensuciamiento es un problema recurrente. El calentamiento de la leche y sus derivados conduce a la formación de depósitos en las paredes de acero inoxidable de las instalaciones. Este ensuciamiento impide la correcta ejecución del proceso al introducir una resistencia adicional a la transferencia de calor y amenaza la seguridad alimentaria al aumentar el riesgo de contaminación microbiana. Se requieren costosos procedimientos de limpieza en el lugar. La disposición regular de los depósitos, representan costos financieros y ambientales considerables. Por lo tanto, limitar el ensuciamiento por escoria parece ser un gran desafío.

2.2.1 SLIPS INSPIRADAS EN LA PLANTA CARNÍVORA *NEPENTHES*

Superficies biomiméticas denominadas **SLIPS** (*Slippery-Liquid-Infused Porous Surfaces*) atrajeron el interés de los científicos, por sus características antiadherentes. Este tipo de superficies aparecen como posibles soluciones al problema que plantea el ensuciamiento por escoria.

Nuestra comprensión de cómo manipular y controlar líquidos en la tecnología ha sido transformada por las superficies funcionales desarrolladas por los organismos vivos para interactuar con su entorno. Hojas de loto repelentes al agua, alares recolectores de agua de los escarabajos del desierto, y la piel de gecko que elimina el agua son algunos de los muchos organismos que han inspirado soluciones a los desafíos en las tecnologías de manipulación de líquidos. El requisito de superficies repelentes de líquidos se infiltra en las industrias de la arquitectura, a los dispositivos médicos, y productos para el hogar.

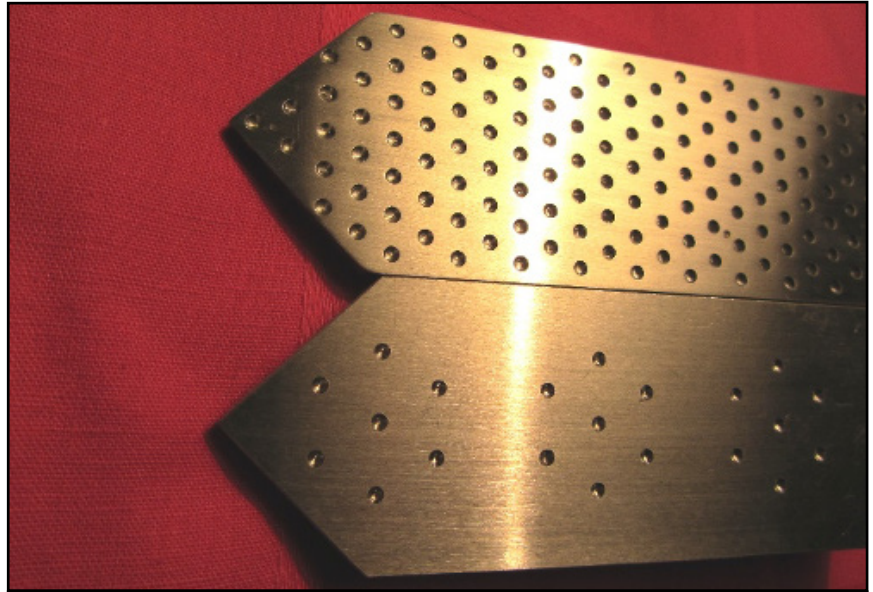


Figura 12: Púas escarificadoras biomiméticas. Imagen: Eduardo Favret.



Figura 13: Planta carnívora *Nepenthes*. Imagen: Wikimedia (Public Domain).

Las superficies lubricadas en un contexto tecnológico se denominan superficies porosas resbaladizas con infusión de líquido (SLIPS). Se bloquean en el agua y crean una superficie autolimpiable sobre el metal, plástico y textiles para repeler contaminantes. Curiosamente, la tecnología SLIPS está inspirada en la superficie resbaladiza de una planta carnívora de jarra (*Nepenthes*) (Figura 13). Esta planta produce trampas de caída, derivado de hojas, para atraer, capturar, conservar, matar y digerir presas animales (generalmente insectos) para permitirle sobrevivir en ambientes pobres en nutrientes. Algunas de estas discretas cazadoras consiguen atrapar a sus presas atrayéndolas con colores vivos y cerrándose sobre ellas por sorpresa. Otras, sin embargo, prefieren limitarse a esperar mientras los insectos resbalan hacia su interior, sin posibilidad de escapar. Una característica clave de atrapamiento es el peristoma, que tiene pendiente, crestas macroscópicas, a su vez formada por crestas microscópicas. Cuando está mojado, el peristoma se vuelve muy resbaladizo, lo que hace que los insectos se deslicen, en la trampa, donde se descomponen dentro de un charco de jugos digestivos, liberando nutrientes para la planta.

Un equipo de científicos de la Universidad de Harvard ha desarrollado un material que impide el desarrollo de colonias bacterianas, y lo ha hecho imitando a la *Nepenthes*.

Lo consigue gracias a una sustancia que recubre su superficie y que impide que los insectos se puedan agarrar a ella, deslizándose hacia el estómago de la planta sin poder hacer nada para evitarlo. Los investigadores, con el doctor Tak-Sing Wong a la cabeza, han logrado replicar este mecanismo. Trabajaron ensamblando estructuras a micro y

nanoescala, y llenaron los espacios entre ellas con un gel lubricante que repele tanto sólido como líquido, incluyendo biofilm bacteriano. Con esa sustancia pueden recubrir superficies sólidas y engañar a las bacterias de forma que no encuentren un punto al que adherirse y proliferar. Según explica la Dra. Joanna Aizenberg, coautora del descubrimiento, se han intentado impedir que se forme el biofilm de muchas formas, con coberturas químicas o antibióticos, por ejemplo. Pero en el mejor de los casos era una solución a corto plazo. El tratamiento de las superficies se gastaba, o terminaba cubierta de polvo, o las propias bacterias depositaban otra capa sobre la que se suponía que tenía que prevenir su aparición. Al final, el biofilm se las apañaba para establecerse y crecer en prácticamente cualquier superficie sólida que se pudiese idear.

De forma que le dieron al asunto un nuevo enfoque buscando inspiración en la naturaleza. Así desarrollaron **SLIPS** (que no por casualidad forma la palabra *resbalón* en inglés). Aplicado sobre una superficie, repele no solo las bacterias sino también líquidos tanto de base acuosa como oleosa e incluso previene la formación de hielo o escarcha. Llevando su aplicación a otros campos, podría utilizarse por ejemplo sobre el casco de los barcos para evitar que se adhirieran los crustáceos, algo que aumenta el consumo de energía hasta en un 40%. Transformar lo que una vez fue una superficie sólida perfecta para las bacterias en una superficie líquida, de modo que no puedan aferrarse a ella para formar el biofilm y en caso de que se forme, se pueda quitar fácilmente porque resbala.

SLIPS funciona tanto en entornos estáticos como en contacto con una corriente, lo que lo hace perfecto para utilizarlo en dispositivos médicos que interactúan con fluidos

del cuerpo humano. Por supuesto, se trata de una sustancia que no es tóxica, fácil y barata de producir en grandes cantidades y que no necesita para mantenerse limpia nada más que la gravedad, ya que todo resbala sobre ella [Wong 2011].

2.2.2 SUPERFICIE NANOESTRUCTURADA INSPIRADA EN LA LIBÉLULA Y LA CIGARRA

Otros estudios han demostrado que las alas de las libélulas y las cigarras evitan el desarrollo de las bacterias debido a su estructura natural (Figura 14). Las superficies de sus alas están cubiertas de nanopilares haciéndolos parecer un lecho de clavos. Cuando las bacterias entran en contacto con estas superficies, sus membranas celulares se rompen inmediatamente y perecen. Esto inspiró a los investigadores del Instituto de Bioingeniería y Nanotecnología (IBN) de Singapur para inventar un nano revestimiento antibacteriano para desinfectar superficies que se tocan con frecuencia, como manijas de puertas, mesas, etc. Esta tecnología resultará particularmente útil para crear superficies en lugares como hospitales y clínicas, donde la esterilización es importante para ayudar a controlar la propagación de infecciones. El 80% de las infecciones comunes se propagan a través de las manos. Desinfectar las superficies que se tocan con frecuencia ayuda a reducir la propagación de gérmenes nocivos por nuestras manos, pero requeriría desinfección manual y repetida porque los gérmenes crecen rápidamente. Los desinfectantes actuales también pueden contener productos químicos que no se reconocen como seguros y efectivos, y pueden conducir a resistencia y contaminación ambiental si se usa extensivamente. Para abordar este problema, un equipo de investigadores dirigido por el líder del grupo IBN, el Dr. Yugen

Zhang creó un nano revestimiento novedoso que puede matar bacterias espontáneamente al contacto, inspirado en estudios sobre libélulas y cigarras. Los científicos del IBN cultivaron nanopilares de óxido de zinc, un compuesto conocido por sus propiedades antibacterianas y no tóxicas. Los nanopilares de ZnO pueden matar una amplia gama de gérmenes como *E. coli* y *S. aureus* que son comúnmente transmitidas por el contacto con la superficie. Las pruebas en superficies de cerámica, vidrio, titanio y zinc demostraron que el recubrimiento efectivamente eliminó hasta el 99.9% de los gérmenes que se encuentran en las superficies. Las bacterias mueren mecánicamente en lugar de químicamente, por lo tanto, las bacterias no podrán desarrollar resistencia ya que son completamente destruidas cuando sus paredes celulares son perforadas por los nanopilares al contacto. Otros estudios revelaron que el nano revestimiento potencia su efecto anti-bacteriano cuando se aplica sobre superficies de zinc, en comparación con otras superficies. Esto es porque los nanopilares de óxido de zinc catalizan la liberación de superóxidos, que incluso podrían matar bacterias flotantes cercanas que no estaban en contacto directo con la superficie. Este súper poder para matar bacterias de la combinación de nanopilares y el zinc amplía el alcance de las aplicaciones del recubrimiento más allá de las superficies duras. Posteriormente, los investigadores estudiaron el efecto de colocar una pieza de zinc que había sido recubierto con nanopilares de óxido de zinc en agua que contiene *E. coli*. Todas las bacterias perecieron, lo que sugiere que este material podría usarse potencialmente para la purificación del agua [Guangshun Yi 2018].

2.3 SUPERFICIE FOTÓNICA INSPIRADA EN LOS COLEÓPTEROS BLANCOS

No existe nada en el mundo natural que supere la blancura de *Cyphochilus* y *Lepidiota estigma*, dos coleópteros que logran su extraordinaria coloración gracias a la geometría de quitina (Figura 15 y 16). La tecnología actual tampoco es capaz de producir una capa tan blanca y delgada.

El escarabajo del género *Cyphochilus*, nativo de Asia sudoriental, posee una blancura resplandeciente. Es más blanco que el papel gracias a una capa ultradelgada que cubre su cuerpo y que está formada por un material natural fotónico muy reflectante. Los científicos estudian las propiedades ópticas de su esqueleto externo porque si logran comprender sus propiedades, podrán emularlas para crear nuevos materiales más blancos.

Ahora, un equipo de Universidad de Cambridge (Reino Unido) y el Laboratorio Europeo de Espectroscopía

no lineal en Italia ha demostrado por primera vez que estos escarabajos son los seres más blancos de la naturaleza. Esto, en términos físicos, se traduce en que son capaces de dispersar la luz más eficientemente que cualquier otro tejido biológico conocido [Burrelli 2014]. Físicamente, vemos los objetos de cierto color porque absorben ciertas longitudes de onda de la luz y reflejan otras, que nuestros ojos perciben. Por ejemplo, vemos un tomate rojo porque absorbe todas las longitudes de onda de la luz, menos la correspondiente al rojo, que se refleja. Los objetos blancos reflejan todas las longitudes de onda de la luz con la misma eficiencia.

El cuerpo de los escarabajos *Cyphochilus* y *Lepidiota estigma* está cubierto por quitina, una molécula de estructura similar a la celulosa, que se encuentra en las conchas de los moluscos, los exoesqueletos de los insectos y las paredes celulares de los hongos. Los filamentos de quitina son muy delgados y por su propia cuenta no reflejan la luz particularmente bien. Entonces,

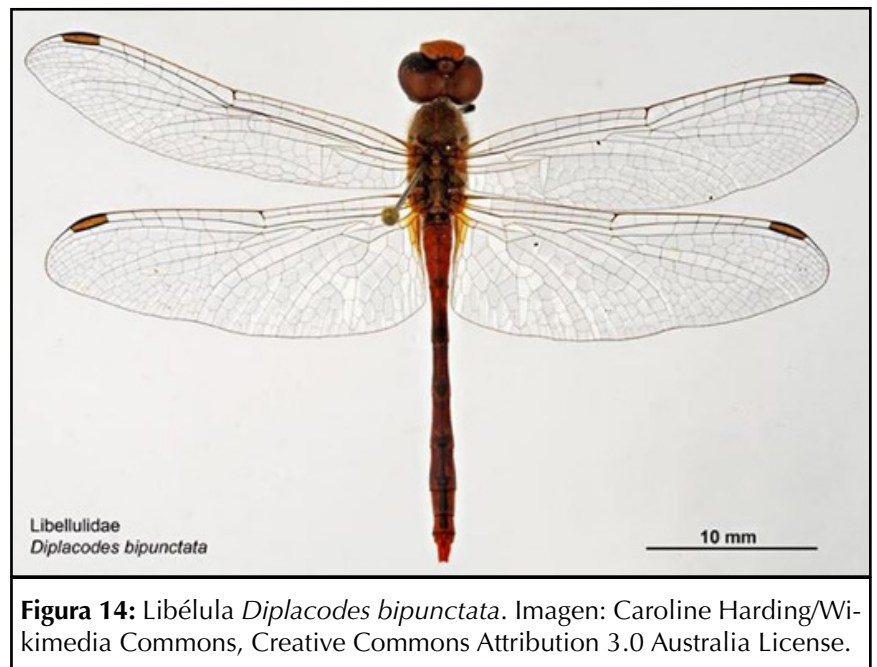


Figura 14: Libélula *Diplacodes bipunctata*. Imagen: Caroline Harding/Wikimedia Commons, Creative Commons Attribution 3.0 Australia License.

¿cómo logran estos coleópteros su extraordinaria blancura? Mediante una red de filamentos de quitina muy comprimida y densa, con una estructura interna optimizada, de manera que produce la máxima blancura —es decir, la máxima intensidad de luz reflejada para todos los colores a la vez— con el mínimo de material. Este detalle es especialmente importante para los insectos voladores, que necesitan ser ligeros. Para sobrevivir, necesitan optimizar su respuesta óptica, pero a la vez deben utilizar tan poco material como sea posible para ahorrar energía y poder volar. Curiosamente, lo consiguen mediante la quitina, que tiene un índice de refracción relativamente bajo. Los investigadores han aprendido dos lecciones de estos escarabajos. Por un lado, saben cómo mejorar la dispersión en una estructura al variar su geometría y, por otro lado, se han dado cuenta de que no hace falta añadir partículas blanqueantes en la pintura para lograr un recubrimiento ultrablanco. Los autores de esta investigación creen que sus resultados tendrán aplicaciones en el diseño de materiales, como papel, plástico y pinturas más blancos con menos cantidad de material.

■ CONCLUSIONES

El futuro debería ser emocionante para el campo de la biomimética. Así como los biólogos están descubriendo los mecanismos estructurales y fisiológicos que subyacen a las propiedades funcionales de las plantas y los animales, los ingenieros están comenzando a desarrollar un conjunto de herramientas de fabricación lo suficientemente sofisticado como para capturar sus características más destacadas. A medida que se acorta la brecha de rendimiento entre las estructuras biológicas y nuestros análogos mecánicos, los ingenieros pueden sentirse cada vez más animados a buscar y adop-



Figura 15: Acercamiento del escarabajo *Cyphochilus*, mostrando sus escamas blancas. Imagen: Andy Parnell/Wikimedia Commons.



Figura 16: Imagen de las escamas del escarabajo vistas al microscopio. Imagen: Cortesía de Lorenzo Cortese y Silvia Vignolini.

tar conceptos de diseño de la naturaleza. Aunque los dispositivos que construyen pueden parecer extraños al principio, sus orígenes en el mundo orgánico pueden dotarlos de una extraña familiaridad.

Los beneficios del estudio de la biomimética se pueden ver en muchas aplicaciones, incluidas fibras

más fuertes, materiales multifuncionales, medicamentos mejorados, robots superiores y muchos otros. Otro aspecto de la biomimética es reconocer la importancia de proteger a las especies de la extinción, para que no perdamos las soluciones de la naturaleza que lograron sobrevivir, pero que aún no hemos estudiado o aún no entendemos. La

naturaleza ofrece un modelo para nosotros como seres humanos en nuestros esfuerzos por abordar nuestras necesidades. Podemos aprender técnicas de fabricación de animales y plantas como el uso de la luz solar y compuestos simples para producir sin polución, fibras biodegradables, cerámicas, plásticos y diversos químicos. La naturaleza ya ha proporcionado un modelo para muchos dispositivos, procesos y mecanismos creados por el hombre. Uno puede imaginar el surgimiento de fibras extremadamente fuertes que se tejen como lo hace la araña, y cerámicas que son inastillables emulando a la perla. Además de proporcionar modelos, la naturaleza puede servir como guía para determinar la idoneidad de nuestras innovaciones en términos de durabilidad, rendimiento y compatibilidad.

El proceso biomimético es multi y transdisciplinario y abarca aproximadamente siete campos diferentes de investigación biónica. La estructura sugerida es de acuerdo a las subdivisiones de la Red Federal Alemana de Competencia Biónica BLOKON y es la siguiente:

1. arquitectura y diseño
2. construcción ligera y materiales
3. superficies e interfaces
4. dinámica de fluidos, nadar y volar
5. biomecatrónica y robótica
6. comunicación y sensores
7. optimización

Resumiendo, biomimética o biónica es un término relativamente nuevo para un proceso tan antiguo como la humanidad: tomar prestadas ideas de la naturaleza para

dar forma y crear nuestro entorno. La biomimética "antigua" condujo al desarrollo de herramientas, ropa y vivienda. Con el amanecer de la era técnica y más tarde de la era industrial, técnica y desarrollos se desviaron de los prototipos naturales, porque mirando de cerca, esos principios eran a menudo demasiado complejos para transferirse a las técnicas de ingeniería. En lugar de usar estructuras de la naturaleza en su mayoría flexibles, blandas y adaptables a la fuerza, las construcciones técnicas entraron en su mayoría en rígidas formas rectangulares, que podrían calcularse y mecanizarse más fácilmente. Además, la invención de la rueda y el procesamiento de metal no tenía un ejemplo natural, y marcaron hitos de la alienación de la humanidad de la naturaleza [Neinhuis 2004]. La biomimética moderna es un enfoque sistemático para los investigadores que saben que los nuevos desarrollos e ideas solo pueden ser logrados en colaboraciones transdisciplinarias. Si esto es cierto para ejemplos de trabajo conjunto entre físicos o químicos e ingenieros, ¿por qué no establecer contactos con biólogos? Más útil y catalítico para este tipo de colaboración fue el desarrollo de nuevos métodos e instrumentos de medida, capaces de descubrir principios naturales o regularidades hasta ahora desconocidas. El enfoque sistemático hacia la comprensión de estructuras biológicas, procesos y la funcionalidad resultaron en nuevas y sorprendentes soluciones técnicas como óptimas estructuras técnicas modeladas a partir de árboles y huesos [Matheck 1990], nuevos diseños de hélice, inspirados en alas de pájaro o técnicas de transmisión sonora ampliamente mejoradas, modeladas a partir de las comunicaciones de los delfines.

Agreguemos por último que la biomimética es sólo, en pocos ca-

sos, una mera copia o imitación de estructuras naturales o procesos y su transferencia a construcciones técnicas. En muchos casos, después de entender un modelo biológico, la mente humana debe abstraer y modificar esos conceptos biológicos para llegar a una solución técnica mejor que las soluciones ya existentes, a menudo altamente sofisticadas. Con suerte, la nueva solución biomimética es, aunque no intrínsecamente, la solución más sustentable y ecológicamente superior.

■ REFERENCIAS

- [Aizenberg 2005] Aizenberg, J., Weaver, J. C., Thanawala, M. S., Sundar, V. C., Morse, D. E., & Fratzl, P. 2005. Skeleton of *Euplectella* sp.: structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale. *Science*. 309 (5732), 275-278.
- [Aizenberg 2010] Aizenberg, J. 2010. New Nanofabrication Strategies: Inspired by Biomineralization. *MRS Bulletin*. 35, 323-330.
- [Arzt 2006] Arzt, E. 2006. Biological and artificial attachment devices: Lessons for materials scientists from flies and geckos. *Materials Science and Engineering: C*. 26(8), 1245-1250.
- [Barnes 2007] Barnes, W. J. P. 2007. Functional morphology and design constraints of smooth adhesive pads. *MRS bulletin*. 32(6), 479-485.
- [Barthlott 1997] Barthlott, W., & Neinhuis, C. 1997. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*. 202(1), 1-8.
- [Berglin 2003] Berglin, M., & Gatenholm, P. 2003. The barnacle adhesive plaque: morphological

- and chemical differences as a response to substrate properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 28(2-3), 107-117.
- [Bhushan 2011] Bhushan B, Jung Y C. 2011. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*. 56, 1–108.
- [Burrese 2014] Burrese, M., Cortese, L., Pattelli, L. et al. 2014. Bright-White Beetle Scales Optimize Multiple Scattering of Light. *Sci Rep*. 4, 6075. <https://doi.org/10.1038/srep06075>.
- [Catania 2015] Catania, K. 2015. Electric eels use high-voltage to track fast-moving prey. *Nat Commun*. 6, 8638. <https://doi.org/10.1038/ncomms9638>.
- [Chen 2008] Chen, P.Y., Lin, A.Y.M., McKittrick, J., and Mayers, M.A. 2008. Structure and mechanical properties of crab exoskeleton. *Acta Biomater*. 4: 587-596.
- [Favret 2009] Favret, E. A., & Fuentes, N. O. (Eds.). 2009. *Functional properties of bio-inspired surfaces: characterization and technological applications*. World Scientific.
- [Favret 2017] Favret, E. 2017. Soluciones bioinspiradas para el desarrollo de herramientas agrícolas no-adherentes. Actas del 25° Congreso Anual de Aapresid. <http://congresoaaapresid.org.ar/wp-content/uploads/2017/08/Favret-Soluciones-bioinspiradas-para-el-desarrollo-de-herramientas-agr%C3%ADcolas.pdf>.
- [Gorb 2009 1] Gorb, S. N. (Ed.). 2009. *Functional Surfaces in Biology: Little Structures with Big Effects Volume 1* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- [Gorb 2009 2] Gorb, S. N. (Ed.). 2009. *Functional Surfaces in Biology: Adhesion Related Phenomena Volume 2* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- [Guanjun Tan 2017] Guanjun Tan, Jiun-Haw Lee, Yi-Hsin Lan, Mao-Kuo Wei, Lung-Han Peng, I-Chun Cheng, and Shin-Tson Wu. 2017. Broadband antireflection film with moth-eye-like structure for flexible display applications. *Optica*. 4, 678-683.
- [Guangshun Yi 2018] Guangshun Yi, Yuan Yuan, Xiukai Li and Yugen Zhang. 2018. ZnO Nanopillar Coated Surfaces with Substrate Dependent Superbactericidal Property. *Small*. DOI:10.1002/sml.201703159.
- [Hensel 2016] Hensel R, Neinhuis C, Werner C. 2016. The springtail cuticle as a blueprint for omniphobic surfaces. *Chemical Society Reviews*. 45, 323–341.
- [Koch 2009] Koch K, Barthlott W. 2009. Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: An inspiration for biomimetic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 367, 1487–1509.
- [Konrad 2019] Konrad, W., Adam, J., Konietzko, S. & Neinhuis, C. 2019. When Lotus Leaves Prevent Metal from Melting — Biomimetic Surfaces for High Temperature Applications. *J Biomic Eng*. 16, 281–290. <https://doi.org/10.1007/s42235-019-0023-6>. [Ragesh 2014] Ragesh P, Ganesh V A, Nair S V, Nair A S. 2014. A review on 'self-cleaning and multifunctional materials'. *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 14773–14797.
- [Mattheck 1990] Mattheck, C.; Bukhard, S. 1990. A new method of structural shape optimization based on biological growth. *Int. J. Fatigue*. 12, 185–190.
- [Meyers 2014] Meyers, M., & Chen, P. 2014. *Biological Materials Science: Biological Materials, Bioinspired Materials, and Biomaterials*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511862397.
- [Neinhuis 2004] Neinhuis, C., & Speck, T. 2004. Plant Growth-A Biomechanical Perspective. *Journal of Plant Growth Regulation*. 23(2), 59-60.
- [Nihiser 2014] Nihiser, B. A. 2014. *Evaluation of the applications of a Biomimetic Antifouling Surface (Sharklet™) relative to five other surfaces to prevent biofilm growth in freshwater aquaponics systems* (Doctoral dissertation, Ohio University).
- [Tesouro 2018] Tesouro O.M., Venturelli L., Roba M.A., Romito A., Setten L.M., Favret E.A. 2018. How to Improve Soil Anti-adhesion by Studying the Microtopography of a Beetle Cuticle. *Microscopy and Microanalysis*. 24 (Suppl 1) 1190 - 1191.
- [Vukusic 2003] Vukusic, P., Sambles, J.R. 2003. Photonic Structures in Biology». *Nature*. 424 (6950): 852-855.
- [Waite 1987] Waite, J. H. 1987. Nature's underwater adhesive specialist. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 7(1), 9-14.

- [Waite 2005] Waite, J. H., Andersen, N. H., Jewhurst, S., & Sun, C. 2005. Mussel adhesion: finding the tricks worth mimicking. *The journal of adhesion*. 81(3-4), 297-317.
- [Weaver 2010] James C. Weaver, Qianqian Wang, Ali Miserez, Anthony Tantuuccio, Ryan Stromberg, Krassimir N. Bozhilov, Peter Maxwell, Richard Nay, Shinobu T. Heier, Elaine DiMasi, David Kisailus. 2010. Analysis of an ultra-hard magnetic biomineral in chiton radular teeth. *Materials Today*. 13, Issues 1–2, 2010, Pages 42-52.
- [Wong 2011] Wong T-S, Kang SH, Tang SKY, Smythe EJ, Hatton BD, Grinthal A, and Aizenberg J. 2011. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*. 477:443-447.
- [Zapka 2009] Manuela Zapka, Dominik Heyers, Christine M. Hein, Svenja Engels, Nils-Lasse Schneider, Jorg Hans, Simon Weiler, David Dreyer, Dmitry Kishkinev, J. Martin Wild, Henrik Mouritsen. 2009. "Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird". *Nature*. 461. doi: 10.1038/nature08528.