

LA BIOLOGÍA INSPIRA NUEVOS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS EN EL CAMPO DE LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y LA INGENIERÍA

Eduardo Alfredo Favret

Instituto 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: eafavret@cnia.inta.gov.ar

RESUMEN

Se introduce el biomimetismo, su origen y objetivo. Se describe brevemente algunos ejemplos generales del mismo, para luego desarrollar temas más relacionados con los materiales, tales como nuevos cerámicos, nuevas fibras y nuevos pegamentos a prueba de agua. Por último se informa sobre cuatro propiedades funcionales de ciertas superficies biológicas, producto de su micro-nanotopografía estructural y su química, que están siendo estudiadas y aplicadas a las superficies de materiales tecnológicos. Se concluye con un resumen de los puntos principales presentados.

ABSTRACT

The origin of Biomimetism is introduced and examples are shown. Some new biological materials, such as spider silk, abalone ceramic and mussel adhesive are analyzed. At last, biological surfaces with characteristic functional properties, due to their physical and chemical structure are presented with their technological applications. The paper concludes with a summary of the main points.

INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que numerosos inventos utilizaron la naturaleza como fuente de inspiración, desde Leonardo Da Vinci (circa 1500) estudiando el vuelo de los pájaros y su diseño del Ornitóptero (figura 1), hasta los hermanos Wright con sus prototipos de máquinas voladoras. Un claro ejemplo fue la invención del Velcro (VELours-CROchet) por el ingeniero suizo George de Mestral (1950), un mecanismo de cierre tan usado hoy día por el hombre, cuyo desarrollo surgió de analizar la adherencia del abrojo en la pelambre de su perro (sistema de cierre denominado "hook-loop"). Parte de la teoría de los sensores de infrarrojo fue una adaptación de mecanismos observados en la víbora de cascabel. Hasta el estudio de la semilla de la tipa (*Tipuana tipu*) permitió a los ingenieros considerar nuevos diseños para los paracaídas.

El estadounidense J. Steele y el alemán O. Schmitt, en las décadas de 1950 y 1960,

propusieron los términos **Biónica** y **Biomimetismo** para describir una nueva ciencia interdisciplinaria que estaba surgiendo y que englobaba el estudio de sistemas biológicos para el desarrollo de nuevas tecnologías. El biomimetismo/biónica se puede resumir como el **diseño, construcción, evaluación y mantenimiento de sistemas artificiales que imiten sistemas vivos o bien se inspiren en ellos** [1-5].

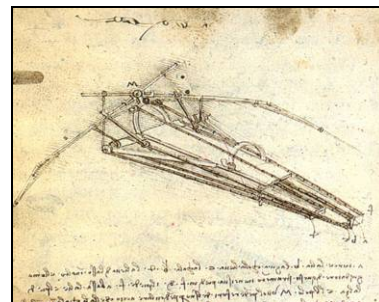


Figura 1. Leonardo Da Vinci, considerado el padre de la biónica y uno de sus diseños para volar.

La abundancia de diseños eficientes y multifuncionales en la naturaleza se debe a los 3.5 mil millones de años de evolución. Como establece la teoría de la selección de Darwin, los más eficientes mecanismos, la multifuncionalidad, los fuertes y livianos materiales sobrevivirán mientras que los diseños inferiores desaparecerán. Los ingeniosos mecanismos de la naturaleza llevaron a los científicos a crear nuevos sistemas en diversos campos. Veamos algunos ejemplos. La planta llamada cardo ruso (*Salsola tragus*) ha inspirado a los ingenieros de la NASA para diseñar un medio de transporte que utiliza la fuerza del viento para moverse, con el objeto de ser usado en Marte donde los fuertes vientos predominan. El cardo ruso (figura 2) es una planta similar a un ovillo que en otoño se seca y se desprende de su raíz, y es libremente transportada por el viento. En casi toda película del oeste americano puede verse dicha planta desplazarse por las calles de los pueblos fantasmas.



Figura 2. Cardo ruso (*Salsola tragus*). Cortesía de Forest y Kim Starr (USGS).

La aerodinámica también se ha inspirado en el reino animal. Últimamente la empresa automotriz Mercedes Benz estudió el diseño hidrodinámico del pez caja (*Ostracion cubicus*) para crear un nuevo automóvil con similar morfología (figura 3). Es un claro ejemplo de lo que se denomina “vehículo biónico”.



Figura 3. Pez caja (*Ostracion cubicus*). Cortesía de J. Petersen (GFDLicense).

También en temas de refrigeración, el mundo natural ha dado su valioso aporte. La espiral logarítmica tridimensional de los caracoles marinos y de los poros de la piel es copiada por los ventiladores de las PCs y tubos de ventilación de los aires acondicionados usados en automóviles. Se ha verificado que dicho diseño logarítmico ayuda a la liberación y escape del fluido con menor fricción y mayor eficiencia. Este tipo de diseño podría ser usado para el mejoramiento de bombas de agua y sistemas para la circulación de la sangre.

El mecanismo de apertura de las brácteas del fruto o cono del pino cuando se seca ha llevado a la industria textil a diseñar nuevas vestimentas para uso militar. El mecanismo es el siguiente, las brácteas se mantienen cerradas cuando el cono está en el árbol, a medida que madura y se seca dichas brácteas se abren, el cono cae y las semillas se liberan. Las brácteas consisten en capas de dos materiales distintos que reaccionan de distinta forma a la humedad. Cuando el cono se seca, las brácteas tienden a doblarse, puesto que uno de los lados se expande más que el otro [6]. Este efecto fue mimetizado en sentido inverso, creando un tejido textil de multicapas con numerosas ventanitas o “flaps”, que se abren automáticamente cuando la persona que la viste comienza a sudar. Cuando la piel retorna a su humedad natural, se cierran. Una vestimenta con esta propiedad es considerada muy útil para personal militar destinado a zonas cálidas.

Otro ejemplo que ha inspirado a los arquitectos para encontrar nuevos sistemas de ventilación que permitan el ahorro de energía, es el de los nidos de termitas (figura 4). Dichas estructuras internas, como las de la *Macrotermes michaelseni*, permiten mantener la temperatura dentro del nido en $31\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante el día y la noche, cuando la variación en el exterior es de entre 3°C y 42°C . En Harare, Zimbabwe, se ha construido un prototipo siguiendo tal diseño.

Los ejemplos citados hasta el momento son una ínfima parte de las numerosas ideas tecnológicas que ha generado la observación de la naturaleza, como el estudio del pulpo y el calamar para los mecanismos de camuflaje, las hojas de las plantas para la construcción de pequeñas y más eficientes celdas solares (fotosíntesis), las fibras naturales para nuevos compuestos, los distintos tipos de prótesis (óseas, dentarias, cocleares) y órganos artificiales (corazón, piel) para ser utilizados en el cuerpo humano. Son claros ejemplos del biomimetismo. Pero hay otros dos temas de suma importancia que surgen de esta ciencia, uno es el desarrollo de nuevos materiales y el otro es el diseño de superficies con propiedades funcionales específicas. Estos dos puntos los veremos brevemente a continuación.



Figura 4. Nido de termitas. (GFDLicense).

NUEVOS MATERIALES

La Ingeniería y Ciencia de los Materiales es una disciplina que ha ido creciendo desde 1950. Los metales, polímeros, cerámicos y compuestos fueron y son piezas fundamentales en su desarrollo, pero a partir de 1990 entraron en escena los materiales biológicos, cuyas propiedades en general superan a los de los materiales tradicionales y tienen la capacidad de ser multifuncionales. Aún no se tiene cabal conocimiento de todas sus posibles potencialidades, pero estamos en los umbrales de importantes avances científicos gracias a la bio y nanotecnología, fundamentalmente en la síntesis y producción de tales materiales. En un reciente trabajo el Dr. M. A. Meyers dio una excelente revisión de los últimos progresos en este campo, en especial referido a las propiedades mecánicas de los materiales biológicos [7]. Veamos algunos ejemplos como ser el de la tela de araña, la concha del abalone rojo y el pegamento del mejillón azul.

Los hilos de seda de la tela de araña ya fueron usados en la antigüedad en los retículos de lunetas astronómicas, micrómetros y otros instrumentos ópticos.

Algunas tribus de América del Sur las empleaban como hemostático en las heridas. Los pescadores de las islas de la Polinesia usan el hilo de la araña *Nephila* como hilo de pescar. En Madagascar, los nativos capturaban las arañas *Nephila* y obtenían rollos de hilos que usaban para fabricar tejidos de color amarillo dorado. Algunas tribus en Nueva Guinea usan telas de araña como sombrero para protegerse de la lluvia.

La seda de captura de la *Araneus diadematus* se compone de un par de fibras recubiertas de una solución de 80% de agua y 20% de aminoácidos, lípidos, sales y compuestos de bajo peso molecular. Esta composición química varía según el entorno físico, dieta de la araña y cambios genéticos en la química de la tela. Cuando se la estira, el núcleo del filamento puede extenderse un 200%, lo cual evita el rebote de la presa una vez atrapada. Las propiedades mecánicas de la seda dependen fuertemente del tamaño y dieta de la araña, temperatura del cuerpo de la araña, velocidad de hilado y composición de aminoácidos [8]. La araña (figura 5) puede controlar con precisión la secuencia de los aminoácidos que componen las fibras, con el fin de ajustar las propiedades mecánicas de cada seda según sea su función. Un hilo común de la seda de la tela de araña es capaz de extenderse hasta 70 kilómetros sin quebrarse sobre su propio peso, y se puede estirar hasta 30 ó 40% más allá de su longitud inicial, sin romperse, mientras que el nylon resiste un estiramiento de sólo un 20%. Se dice que la seda que produce la araña posee una resistencia tal que si fuera posible construir una tela con el grosor de una lapicera, sería capaz de detener un avión Boeing 747 en pleno vuelo.

Muchas fibras sintéticas, tales como el Kevlar y las fibras de polietileno de muy alta densidad, llegan a módulos de elasticidad y tensiones de estiramiento elevadísimos, debido a cristalinidades muy altas. En virtud de la alta cristalinidad, estas fibras tienden a ser quebradizas y por lo tanto no muy resistentes cuando están bajo compresión. Sin embargo, el hilo de la tela de araña, a pesar de no llegar a los módulos de elasticidad extremadamente altos de algunas fibras

sintéticas, posee un alto alargamiento de ruptura y es más fuerte bajo compresión.

Es importante subrayar que el mecanismo de producción, por ejemplo para el Kevlar, implica contar con hornos a 700°C, para luego extraer fibras de bateas llenas de H₂SO₄ bajo enormes presiones, siendo además dicho elemento no biodegradable. En cambio la araña produce fibras con el balance exacto de propiedades para la aplicación específica que necesite, y el método de producción es no contaminante, lo produce en su abdomen, a temperatura ambiente y presión normal, usando insectos como el material base, no hay residuos tóxicos y es biodegradable. Para una mejor información sobre las propiedades y composición de la tela de araña, recomiendo leer el informe del Ing. J. L. Ferrero, entonces alumno de la carrera de Ingeniería del Instituto Sábato [9].



Figura 5. Araña (*Argiope argentata*). Cortesía del Dr. Esteban Saini (IMYZA, INTA Castelar).

Otro ejemplo interesante se da en el campo de los cerámicos. La concha del molusco Abalone (*Haliotis rufescens*) consta de un material inorgánico, carbonato de calcio (CaCO₃) en forma de "ladrillos" de minerales, aragonita y calcita, de dimensiones de 0.5 μm

x 10 μm , que crece dentro de una matriz orgánica (Lustrina-A, una proteína), cuyas capas tienen de 20-30 nm de espesor, lo que evita la propagación de una fractura, haciéndolo un material cerámico no-frágil [10, 11]. En la naturaleza este proceso recibe el nombre de *biomineralización*. Es el crecimiento de una fase mineral dentro o encima de una matriz orgánica que controla la nucleación, crecimiento y eventualmente el tamaño y forma de los cristales. La combinación de capas duras y elásticas permite al material deslizarse ante fuerzas compresivas. La cara interna de la concha de este molusco, similar a la perla, es dos veces más tenaz que los cerámicos actuales de alta tecnología (figura 6). Kevin Kendall y Bill Clegg (UK) describieron, inspirándose en la perla, un cerámico compuesto de carburo de silicio (distribuidos en placas) embebido en una matriz de grafito (entre-placas) creando un compuesto resistente a la fractura [12]. N. Kotov de la Universidad de Oklahoma (USA) está también desarrollando materiales formados por nanocapas de arcilla y polímeros, logrando propiedades semejantes a las de los cerámicos naturales.

Otro elemento similar al anterior por su forma constitutiva es el hueso, que consta de un componente orgánico, el colágeno, intercalado en una fase mineral, la hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$).



Figura 6. Abalone (*Haliotis rufescens*). Vista externa e interna de su concha. Notar la iridiscencia de su cara interna. (GFDLicense).

Un nuevo adhesivo obtenido a través del mejillón azul (*Mytilus edulis*) está siendo estudiado por biólogos moleculares del Laboratorio Nacional de Ingeniería y Ambiente de Idaho (USA). Están clonando las proteínas que conforman los filamentos situados en la base del pie del mejillón para ser usadas como

pegamento a prueba de agua [13, 14]. El pie del mejillón produce un epoxi con propiedades adhesivas remarcables que permanece intacto en el agua de mar, “anclándose” en piedras u otros materiales del fondo marino, resistiendo los movimientos tumultuosos del mar. Los filamentos que componen el adhesivo son 5 veces más tenaces y 16 veces más extensibles que el tendón humano. Este tipo de pegamento insoluble en agua y no-tóxico ofrece una amplia gama de aplicaciones biotecnológicas. Serviría para componer huesos rotos, tendones o tejidos, y también en la reparación de dientes y en cirugía. Otra posible aplicación es el de usarlo como recubrimiento resistente a la corrosión del agua marina, debido a la alta afinidad de sus elementos constitutivos con el Fe^{3+} y otros metales, lo que le permite interactuar fuertemente con esos materiales.

Por último quisiera comentar brevemente sobre otro material biológico actualmente en estudio, y es el cuerno de rinoceronte. Dicho cuerno no es de constitución ósea, como en el caso de la cornamenta de los venados, sino que está formada por una proteína llamada queratina, similar a la que compone nuestros cabellos y uñas. Análisis llevados a cabo en rinocerontes blancos (*Ceratotherium simun*) indican que los cuernos consisten en tubos de queratina en una matriz amorfa de queratina [15]. Lo que quisiera subrayar es que fue un zoólogo, el Dr. J. Daniel (USA), interesado en tratar de hallar alguna solución a la matanza de rinocerontes, animales muy preciados por sus cuernos en civilizaciones orientales y en ciertos pueblos del medio-oriente, quien dio origen a dichos estudios en colaboración con un metalurgista, la Dra. A. Van Orden (USA). La idea consistía, primero, en estudiar el material natural, segundo hallar un material sintético que reemplazara al natural (similar a la historia del caucho sintético y el caucho natural extraído de la *Hevea brasiliensis*). La tercera etapa, quizás la más difícil, que fuese aceptado por dichas sociedades. Gracias a las técnicas de microscopía y metalografía pudieron entender la constitución del cuerno de rinoceronte, cumpliéndose la primera etapa [3].

SUPERFICIES FUNCIONALES

Otra clara expresión del biomimetismo es el análisis de los principios funcionales y estructurales de ciertas superficies biológicas, lo que permite su utilización en sistemas artificiales hechos por el hombre. Citaré cuatro ejemplos, el efecto Lotus (planta del Loto, *Nelumbo nucifera*) para producir superficies autolimpiantes ultrahidrofóbicas; el efecto Gecko para el desarrollo de la adhesión seca de las superficies; el efecto Ojo de Polilla, para lograr superficies antirreflectantes y el efecto Piel de Tiburón, para generar superficies antifricción. Analizaremos brevemente cada una de ellas.

Fue durante la década de 1980 que se desarrollaron, en el Instituto de Botánica de la Universidad de Bonn (Alemania), una serie de trabajos enfocados a estudiar mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) la topografía de superficies foliares de distintas especies de plantas. El estudio, a cargo de los Dres. Barthlott y Neinhuis, consistía en hallar y caracterizar cualitativamente las diversas plantas cuya superficie foliar era considerada "autolimpiante", perteneciendo éstas específicamente a la categoría de superficies ultrahidrofóbicas, con ángulos de contacto estático mayores a 150° y una diferencia entre el ángulo de contacto de avance y de retroceso menor a 10° , es decir con muy baja histéresis [16]. Los científicos alemanes investigaron la ultraestructura de superficies epidérmicas desde el punto de vista taxonómico, así como sus aspectos funcionales. Con respecto a este último punto, demostraron que las superficies foliares son no-mojables debido a la micro-nanoestructura topográfica de la epidermis, conjuntamente con las propiedades hidrofóbicas de la cera epicuticular [17-19]. El efecto físico es el siguiente, las partículas contaminantes situadas sobre dichas superficies son arrastradas por gotas de agua, debido a que existe una reducción de la adhesión (tensiones superficiales) de las partículas a la superficie, lo que conduce a denominarlas "superficies autolimpiantes" [20-25]. Entre las especies cuyas hojas presentan esta condición, se encuentran la *Nelumbo nucifera*, *Brassica oleracea*, *Xanthosoma violaceum*, *Euphorbia*

myrsinites, *Tropaeolum majus* y *Colocasia esculenta* (figuras 7 y 8).



Figura 7. Taco de reina (*Tropaeolum majus*).



Figura 8. Gotas de agua sobre la hoja ultrahidrofóbica de la planta taco de reina.

Observaciones hechas con el ESEM muestran que la epidermis foliar de las distintas especies se diferencian básicamente en su micro y nanotopografía (figuras 9 y 10). Aún así, el comportamiento autolimpiante de ellas es casi idéntico.

Actualmente diversos investigadores, como los Dres. M. Nosonovsky (USA), A. Marmur (Israel), y D. Quéré (Francia) entre otros, se hallan abocados en explicar el comportamiento de este tipo de superficies usando modelos como el de Casie-Baxter y Wenzel [26-32]. Se supone que la condición de ultrahidrofobicidad se maximiza cuando la rugosidad de la superficie tiene dos dimensiones características, en el orden de las decenas de micrón (células epidérmicas) y en el orden de las centenas del nanómetro (ceras epicuticulares). Otro punto en discusión es

saber si es necesario contar con una superficie hidrofóbica desde el punto de vista químico, o bien con sólo tener una micro-nanotopografía específica se puede lograr el mismo comportamiento en materiales hidrofílicos.

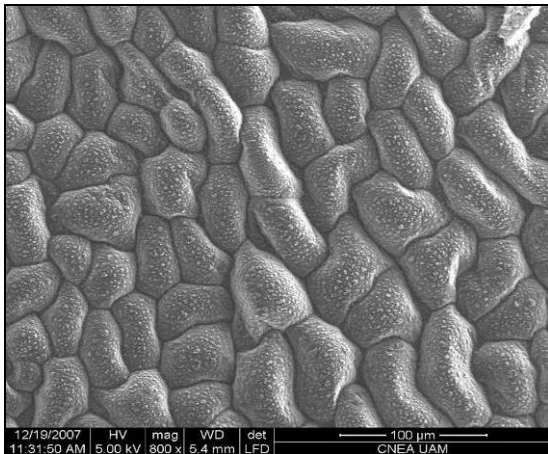


Figura 9. Microestructura de una hoja de taco de reina observada con el ESEM. Se distinguen las células epidérmicas y las ceras epicuticulares dentro de aquéllas.

En general los trabajos que describen la superficie foliar son sumamente cualitativos [33], excepto algunos estudios con el SEM sobre cortes transversales de hojas. Ciertos investigadores decidieron usar microscopía de fuerza atómica como herramienta para la cuantificación de la topografía, pero su rango de aplicación está restringido a superficies de baja rugosidad (alturas menores a los 7 micrones) [34, 35]. Nosotros estamos tratando de cuantificar y encontrar las características principales de la topografía foliar utilizando microscopía óptica y electrónica tradicional, acompañada por métodos basados en la iluminación laser [36, 37] y análisis de imágenes [38-43].

Existen numerosos procesos para fabricar superficies tecnológicas con similar propiedad, tales como litografía, plasma, y electrodeposición [44, 45]. Los métodos interferométricos con lasers de alta potencia son útiles para “grabar” patrones periódicos de variadas dimensiones en la superficie del material. Las aplicaciones tecnológicas de este tipo de superficies son vastas, van desde

la industria automotriz a la microelectrónica, pasando por pinturas (Lotusan) y telas.

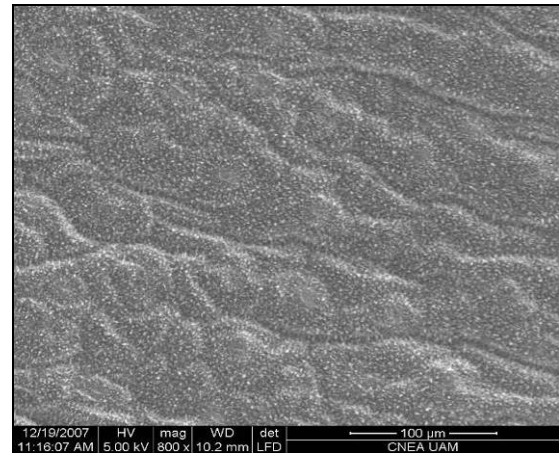


Figura 10. Microestructura de una hoja de *Brassica oleracea* (vulgarmente repollo) observada con el ESEM. Se observan las células epidérmicas y las ceras epicuticulares. Dicha estructura es mucho más suave que la de taco de reina.

No sólo ciertas superficies vegetales pueden ser autolimpiantes, existe también en el reino animal un escarabajo con similares propiedades, el *Stenocara* sp [46]. Vive en el desierto de Namibia, una región que soporta grandes vientos, temperaturas muy altas durante el día y niebla matinal, y las lluvias son mínimas. La superficie dorsal del insecto consta de cimas suaves de 0.5 mm de diámetro, separados entre 0.5 - 1.5 mm. Los valles entre ellas poseen una microestructura cubierta de cera. Esta microestructura, que posee hemisferios de 10 µm de diámetro y ubicados en forma hexagonal, es hidrofóbica y le permite al insecto recoger agua para poder beber.

Los mecanismos de adhesión de los seres vivos han sido minuciosamente analizados por una gran cantidad de biólogos e ingenieros [47], hallándose mecanismos de tipo mecánico, de succión, y por capilaridad, como en el caso de las ranas arborícolas [48]. También la poca adherencia al suelo de ciertas víboras cuando se desplazan, ha permitido desarrollar modelos de locomoción teniendo en cuenta la microtopografía de la superficie de contacto [49]. Pero el denominado efecto Gecko, o bien superficies con adherencia seca, descubierto no hace

más de una década por el zoólogo estadounidense Kellar Autumn, ha revolucionado al mundo científico en el campo de los adhesivos inteligentes. El gecko (*Gekko gecko*) es un tipo de lagartija de pequeño tamaño que pesa no más de 50 gramos (figura 11), pero tiene la capacidad de caminar por paredes verticales y techos lisos sin caerse y a velocidades de 1 m/s.

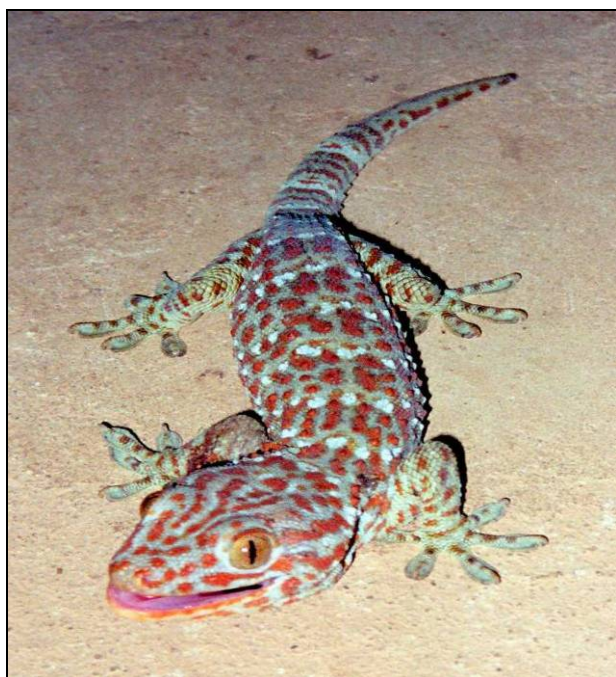


Figura 11. Tokay Gecko (*Gekko gecko*). Cortesía de R. Ling (GFDLicense).

El Dr. Autumn descubrió que la adherencia era causada por fuerzas de Van der Waals [50]. Los dedos del pie del animal tienen en su superficie inferior ramificaciones similares a pelos llamadas “setae”, las cuales a su vez también terminan en ramificaciones denominadas “spatulae”. Cada “seta”, compuesta de β queratina (proteína), tiene aproximadamente 110 μm de largo y 4.2 μm de ancho, con una densidad de 14400 por mm^2 , y cada una de ellas cuenta en su extremo con centenares de “spatulae” de 0.2 μm de largo y 0.2 μm de ancho. Se ha calculado que la fuerza de adhesión máxima de cada “seta” es de $194 \pm 25 \mu\text{N}$. Para comprenderlo mejor, si tuviéramos una superficie de 32 mm de diámetro cubierta con 5000 “setae” por mm^2 , dicha superficie podría

soportar el peso de un hombre de 77 kg. Es interesante preguntarse cómo el gecko al caminar puede despegar su pie de la superficie tan rápidamente (15 ms), permitiéndole desarrollar una alta velocidad de traslado. La explicación hallada es que la separación se produce cuando el ángulo entre la “seta” y la superficie de apoyo es de 30° [50]. Por esta razón se dice que es un adhesivo inteligente o reprogramable.

Grupos de investigadores en la ciencia de los materiales están desarrollando, gracias al avance de la nanotecnología, “spatulae” sintéticas para la fabricación de adhesivos que utilicen el principio del gecko, trabajando con materiales como el poliéster, siliconas, poliamidas y nanotubos de carbono [51, 52]. La posibilidad de usar distintos materiales es debido a que las fuerzas de Van der Waals aparecen por las nano-dimensiones de la topografía y no por la composición química de la misma.

Otra propiedad singular de las superficies biológicas es la denominada efecto Ojo de Polilla, como comúnmente se llama a un dado tipo de superficies antirreflectantes. La polilla (figura 12) es un lepidóptero de hábitos nocturnos y sus ojos compuestos tienen la característica de reflejar apenas la luz, lo cual mejora su visión en ambientes de poca luminosidad. Este efecto también se encuentra en las mariposas.



Figura 12. Polilla (*Paysandisia archon*). Cortesía del Dr. Esteban Saini (IMYZA, INTA Castelar).

La explicación a dicho fenómeno es que las unidades anatómicamente idénticas, denominadas ommatidias, de la que se



componen los ojos compuestos o facetados, poseen una micro-nanoestructura ordenada de papilas (“nipples”), las cuales varían el índice de refracción y modifican la reflectancia del medio en función de sus dimensiones [53-55]. La altura de las papilas varía según las especies entre 20 nm y 250 nm, mientras que la distancia entre ellas es de aproximadamente 200 nm, y el diámetro de las facetas varía entre 20 μm y 35 μm . Estos tipos de estructuras permiten reducir la reflectancia de un 4% a menos de un 1%. Entre las aplicaciones citaré el trabajo del Dr. A. Gombert, de Alemania, quien está usando dicha propiedad funcional para el desarrollo de celdas solares, logrando interesantes resultados [56, 57].

Quién no ha visto algún documental sobre tiburones o bien recuerde la película de S. Spielberg y no se haya maravillado al ver a esos grandes escualos moverse tan elegantemente y a velocidades máximas de 20 m/s. Es que la piel del tiburón tiene la interesante propiedad de ser una superficie antifricción. La epidermis ha sido estudiada por biólogos, físicos e ingenieros, llegando a la conclusión de que su microtopografía, constituida por escamas acanaladas de dentina, era la causa de tal propiedad funcional. Dicha morfología permite reducir la fuerza de arrastre entre el tiburón y el agua. Los “riblets” o paredes de los canales de las escamas varían en altura y no tienen la misma conformación a lo largo del cuerpo del tiburón. La geometría superficial de las escamas y su configuración espacial reducen la componente cruzada del flujo turbulento y promueve la componente longitudinal del flujo reduciendo la fricción de la piel con el agua, actuando sobre la capa límite [58-60]. Los científicos han encontrado que para maximizar la propiedad el espaciado entre los “riblets” debe ser dos veces la altura de los mismos. El espaciado hallado varía según las especies entre 40 μm y 80 μm . Se estima una reducción de la fuerza de arrastre de hasta un 10%. La compañía aérea Airbus está diseñando el 70% de la superficie externa de sus aviones con una estructura similar a la piel de tiburón, lo que le permitiría reducir el consumo de combustible

en un 3%, lo que implica reducir el costo operativo en un 1%. Sin dudas, un ahorro sustancial. También se aplica esta propiedad a trajes de baño que ya han sido utilizados en la alta competencia (Olimpíadas), logrando sus nadadores varias medallas doradas.

CONCLUSIÓN

El campo de los materiales biológicos es una rama en crecimiento dentro de la ciencia e ingeniería de los materiales. Aunque analizar los materiales biológicos sea una tarea compleja, hoy día se cuentan con técnicas de la nanotecnología que permiten avanzar y entender su comportamiento.

Las características fundamentales de los materiales biológicos son: a) auto-organización (bottom-up), b) estructura jerárquica (variaciones estructurales para distintas escalas), c) se desarrollan en medios acuosos y a temperatura ambiente, d) multifuncionalidad y e) auto-curación (se regeneran a si mismos).

En la biología, material y diseño están íntimamente conectados, hecho que no ocurre con las estructuras tradicionales creadas por el hombre. Además el concepto de auto-desarrollo (crecimiento) tiene un efecto importante en la estructura, ya que ésta se modifica en función de las sollicitaciones mecánicas que sufre el material. Por ejemplo, el tronco y las ramas de un árbol se engrosan en aquellos puntos donde los esfuerzos mecánicos son mayores, lo que se denomina un diseño mecánico adaptativo.

Otra de las características esenciales de la naturaleza es que con pocos elementos (20 aminoácidos, bases de las proteínas) puede generar ingeniosos diseños de sistemas con un amplio rango de propiedades mecánicas. Colágeno, queratina, elastina, chitina, actina, etc., son de las más importantes proteínas estructurales que aparecen en diversos materiales biológicos. Muchos de los materiales biológicos duros, como ser el hueso, diente, caparazón, tienen una fase mineral embebida en una matriz orgánica, que le confiere propiedades no vistas en los materiales tecnológicos tradicionales.

Más importante que la evolución de nuestras tecnologías es la evolución y



mejoramiento de nuestros procesos. La naturaleza opera sin el concepto de residuos. Es hacia allí donde debemos dirigir nuestros esfuerzos, emular al mundo natural, un sistema auto-contenido que no produzca desperdicios. Una empresa dedicada a la confección de alfombras (INTERFACE®) se ha convertido en una corporación completamente sustentable usando diseños biomiméticos, básicamente utilizando un diseño que imita el suelo de un bosque.

Para finalizar me agradecería subrayar, a través de todo lo visto, lo fundamental del trabajo interdisciplinario para el desarrollo de nuevas tecnologías inspiradas en la biología y que el nuevo ingeniero en ciencias de los materiales aprecie el amplio panorama de un nuevo mundo lleno de misterios y desafíos, fuente de nuevas tecnologías y apuntando a un desarrollo sustentable, protegiendo al medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Dr. N. Fuentes y la Dra. A. Molina por sus esenciales aportes a la investigación, al Dr. H. Morrás por permitirme abrir mis investigaciones a otros campos, y a la Dra. P. Bozzano y la Srta. A. Domínguez por la obtención de las micrografías de las superficies foliares.

REFERENCIAS

- [1] Biomimetics, Biologically Inspired Technologies, Joseph Bar-Cohen (Editor), CRC Press, (2006) 1-527.
- [2] The Gecko's Foot, Peter Forbes, Happer Perennial Editorial, (2006) 1-272.
- [3] Biomimicry, Innovation inspired by Nature, J. M. Benyus, Happer Perennial Editorial, (2002) 1-308.
- [4] Some progress in the biomimetic study of composite materials, B. L. Zhou, Materials Chemistry and Physics, 45 (1996) 114-119.
- [5] Biomimetics: its practice and theory, J. Vincent, O. Bogatyreva, N. Bogatyrev, A. Bowyer, A. K. Pahl, J. R. Soc. Interface, 3 (2006) 471-482.
- [6] How pine cones open, J. Dawson, J. F. V. Vincent, Nature, 390 (6661) (1997) 668-668.
- [7] Biological Materials: structure and mechanical properties, M. A. Meyers, P. Y. Chen, A. Y. M. Lin, Y. Seki, Progress in Materials Science, 53(1) (2008) 1-206.
- [8] Liquid crystalline spinning of spider silk, F. Vollrath, D. P. Knight, Nature, 410, 29 March (2001) 541-548.
- [9] Propiedades de la seda de las telas de arañas, J. L. Ferrero, Informe final de la materia "Materiales Avanzados", Carrera de Ingeniería en Ciencia de los Materiales, Instituto de Tecnología "J. Sabato", UNSAM-CNEA (2007).
- [10] Quasi-static and dynamic mechanical response of *Haliotis rufescens* (Abalone) shells, R. Menig, M. H. Meyers, M. A. Meyers, K. S. Vecchio, Acta Materialia, 48(9) (2000) 2383-2398.
- [11] Mechanical strength of Abalone nacre: role of the soft organic layer, M. A. Meyers, A. Y. Lin, P. Y. Chen, J. Muyco, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 1(1) (2008) 76-85.
- [12] A simple way to make tough ceramics, W. Clegg, K. Kendall, N. Alford, T. Button, J. Birchall, Nature, 347(6292) (1990) 455-457.
- [13] Expression of multiple forms of an adhesive plaque protein in an individual *Mytilus edulis*, S. C. Warner, H. Waite, Marine Biology, 134 (1999) 729-734.
- [14] Mussel power, P. Marks, The New Scientist Magazine, 164(2209) (1999) 12.
- [15] Structure of white rhinoceros (*Ceratotherium simum*) horn investigated by x-ray computed tomography and histology with implications of growth and external form, T. Hieronymus, L. Witmer, R. C. Ridgely, Journal of Morphology, 267 (2006) 1172-1176.
- [16] Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, W. Barthlott, C. Neinhuis, Planta, 202 (1997) 1-8.
- [17] Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces, P. Wagner, R. Fürstner, W. Barthlott, C. Neinhuis, Journal of Experimental Botany, 54 (2003) 1295-1303.
- [18] Wetting and Self-Cleaning Properties of Artificial Superhydrophobic Surfaces, R. Fuerstner, W. Barthlott, C. Neinhuis, P. Walzel, Langmuir, 21 (2005) 956-961.
- [19] The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces, A. Solga, Z. Cerman, B. Striffler, M. Spaeth, W. Barthlott, Bioinspiration & Biomimetics, 2 (2007) S126-S134.
- [20] Self-cleaning surfaces. Virtual realities. R. Blossey, Nature Materials, 2 (2003) 301-306.
- [21] Smart clean surfaces. P. Gold. Materials Today. Nov. 2003, 44-48.



- [22] Lotus-Effect-Surfaces, E. Nun, M. Oles and B. Schleich, *Macromol. Symp.* 187 (2002) 677-682.
- [23] Ultrahydrophobic Surfaces, Effects of Topography Length Scales on Wettability, D. Öner, T. McCarthy, *Langmuir*, 16 (2000) 7777-7782.
- [24] Surfaces Factors affecting the Wetting of Leaves, P. Holloway, *J. Pestic. Sci.*, 1 (1970) 156-163.
- [25] Rough ideas on wetting, D. Quéré, *Physica A*. 313 (2002) 32-46.
- [26] The Lotus Effect: Superhydrophobicity and Metastability, A. Marmur, *Langmuir*, 20 (2004) 3517-3519.
- [27] Transition between Superhydrophobic States on Rough Surfaces, N. A. Patankar, *Langmuir*, 20 (2004) 7097-7102.
- [28] Roughness-induced non-wetting, S. Herminghaus, *Europhysics Letters*, 52 (2) (2000) 165-170.
- [29] Wetting of Regularly Structured Gold Surfaces, M. E. Abdelsalam, P. Bartlett, T. Kelf, J. Baumberg, *Langmuir*, 21 (2005) 1753-1757.
- [30] Mimicking the Lotus Effect: Influence of Double Roughness Structures and Slender Pillars, N. A. Patankar, *Langmuir*, 20 (2004) 8209-8213.
- [31] How Plants Keep Dry: A Physicist's Point of View, A. Otten, S. Herminghaus, *Langmuir*, 20 (2004) 2405-2408.
- [32] Multiscale roughness and stability of superhydrophobic biomimetic interfaces, M. Nosonovsky, *Langmuir*, 23 (2007) 3157-3161.
- [33] Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure, Z. Guo, W. Liu, *Plant Science*, 172 (2007) 1103-1112.
- [34] Micro- and nanoscale characterization of hydrophobic and hydrophilic leaf surfaces, B. Bhushan, Y. C. Jung, *Nanotechnology*, 17 (2006) 2758-2772.
- [35] The use of plant waxes as templates for micro- and nanopatterning of surfaces, K. Koch, A. Dommissse, W. Barthlott, S. Gorb, *Acta Biomaterialia*, 3 (2007) 905-909.
- [36] The linear rugosity concept of crystalline surfaces by using the Unidirectional Laser Oblique Illumination (ULOI) technique, E. Favret, F. Povolo, *Microscopy Research and Technique*, 55(4) (2001) 270-281.
- [37] Analysis of the Intensity Curves obtained by the Unidirectional Laser Oblique Illumination (ULOI) at different magnifications, E. Favret, *Microscopy and Microanalysis*, 8 (2002) 182-190.
- [38] A new surface characterization technique: RIMAPS (Rotated Image with Maximum Average Power Spectrum), N. Fuentes, E. Favret, *Journal of Microscopy*, 206 (2002) 72-83.
- [39] RIMAPS Detection of Incipient Damage on Metallic Surfaces, E. Favret, N. Fuentes, *Materials Characterization*, 49 (5) (2003) 387-393.
- [40] RIMAPS and Variogram analysis of the surface topography induced by laser interference micropatterning, E. Favret, N. Fuentes, F. Yu, *Applied Surface Science*, 230 (2004) 60-72.
- [41] Identification of Botanical Species Using RIMAPS Analysis on Images from Leaf Surfaces, E. Favret, N. Fuentes, A. Molina, *Microscopy and Microanalysis*, 9 (Suppl. 2) (2003) 1338-1339.
- [42] RIMAPS and Variogram analysis of Barley Leaf Surfaces, E. Favret, N. Fuentes, *Microscopy Today*, 12 (5) (2004) 24-26.
- [43] Quantitative study of *Xanthosoma violaceum* leaf surfaces using RIMAPS and Variogram techniques. E. Favret, N. Fuentes, A. Molina, *Microscopy Research and Technique*, 69 (2006) 684-688
- [44] Bioinspired surfaces with special wettability, T. Sun, L. Feng, X. Gao, L. Jiang, *Acc. Chem. Res.*, 38 (2005) 644-652.
- [45] Superhydrophobic surfaces fabricated by nanoimprint lithography, A. Pozzato, S. D. Zilio, G. Fois, D. Vendramin, G. Mistura, M. Belotti, Y. Cheng, M. Natali, *Microelectronic Engineering*, 83 (2006) 884-888.
- [46] Water capture by a desert beetle. A. R. Parker, C. R. Lawrence, *Nature*. 414 (2001) 33-34.
- [47] From micro to nano contacts in biological attachment devices, E. Artz, S. Gorb, R. Spolenak, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 100 (2003) 10603-10606.
- [48] Adhesion and detachment of the toe pads of tree frogs, G. Hanna, W. J. P. Barnes, *J. Exp. Biol.*, 155 (1991) 103-125.
- [49] Nanoscale design of Snake skin for reptation locomotions via friction anisotropy, J. Hazel, M. Stone, M. S. Grace, V. V. Tsukruk, *Journal of Biomechanics*, 32 (1999) 477-484.
- [50] How Gecko toes stick, K. Autumn, *American Scientist*, 94(2) (2006) 124-132.
- [51] Synthetic Gecko foot-hair micro/nano-structures for future wall-climbing robots, M.



- Sitti, R. Fearing, Proc. of the 2003 IEEE, International Conference on Robotic and Automation, Taipei, Taiwan, Sep. 14-19 (2003) 1164-1170.
- [52] Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures, H. Gao, H. Yao, PNAS, 101 (2004) 7851-7856.
- [53] Solar-absorber antireflector on the eye of an Eocene fly (45Ma), A. Parker, Z. Hegedus, R. Watts, Proc. R. Soc. Lond. B, 265 (1998) 811-815.
- [54] Light on the Moth-eye corneal nipple array of butterflies, D. G. Stavenga, S. Foletti, G. Palasantzas, K. Arikawa, Proc. R. Soc. B, 273 (2006) 661-667.
- [55] Photonics structures in biology, P. Vukusic, J. R. Sambles, Nature, 424 (14 August 2003) 852-855.
- [56] Antireflective transparent covers for solar devices, A. Gombert, W. Glaubitt, K. Rose, J. Dreibholz, B. Bläsi, A. Heinzl, D. Sporn, W. Döll, V. Wittwer, Solar Energy, 68(4) (2000) 357-360.
- [57] Investigation of structured TiAlN- and TiO₂-coatings with Moth-eye-like surface morphologies, F. Burmeister, E. Schäffer, G. Kleer, W. Döll, B. Bläsi, A. Gombert, Surface and Coatings Technology, 200 (2005) 1088-1092.
- [58] Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry, D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J. G. T. Van Der Hoeven, G. Hope, Journal of Fluid Mechanics, 338 (1997) 59-87.
- [59] Fluid Mechanics of biological surfaces and their technological application, D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, R. Meyer, Naturwissenschaften, 87 (2000) 157-171.
- [60] Flow over convergent and divergent wall riblets, K. Koeltzsch, A. Dinkelacker, R. Grundmann, Experiments in Fluids, 33 (2002) 346-350.