

Biomimética de las plantas o cómo nos inspira el reino vegetal

Gustavo Vargas-Silva
Angelo State University (ASU)

Si nos tomáramos más en serio las palabras de Bryce Nelson (Leavell, 2001): «La gente que no preserve los árboles pronto vivirá en un mundo que no preservará la gente», le prestaríamos más atención a los bosques. Las escalofriantes cifras de la FAO (2010) afirman que 7,3 millones de hectáreas (73.000 km²) de bosque, aproximadamente el tamaño de Panamá, se pierden cada año, y que para 2010 casi la mitad de los bosques tropicales del mundo había sido deforestada. Esta situación es aún más crítica en la Amazonía, con sus 6,7 millones de km² (dos veces el tamaño de India), que abarca el bosque tropical más grande que queda en la Tierra y donde habita al menos el 10% de la biodiversidad conocida, incluyendo flora y fauna endémica y en peligro; una hectárea de selva tropical del Amazonas contiene más especies de plantas que toda Europa (Cain *et al.*, 2012). Además, el río Amazonas representa casi el 16% de la descarga fluvial total a los océanos del mundo, fluyendo a lo largo de más de 6.600 km, y junto con sus cientos de afluentes (ver Figura 1), contiene el número más grande de especies de peces de agua dulce del planeta (WWF, 2016); el número de especies de peces en el río Amazonas supera el que se encuentra en todo el océano Atlántico (Cain *et al.*, 2012).

Según la WWF (2014), un tercio de los bosques tropicales del mundo se encuentra en la Amazonía. Su intrincada red de la vida es el hogar de una de cada diez especies en la Tierra y de cerca de 40.000 especies de plantas. Más de 30 millones de personas viven en la región, y muchos de ellos dependen de sus bosques para su sustento. La Amazonía también juega un papel muy importante en el clima de la Tierra, no sólo como el principal acumulador de carbono, sino también gracias a su influencia en los patrones de lluvia del planeta. Los modelos climáticos sugieren que la deforestación amazónica podría dar lugar a sequías y malas cosechas en el continente americano, y posiblemente en otras regiones agrí-

colas lejanas, por ejemplo en Europa.



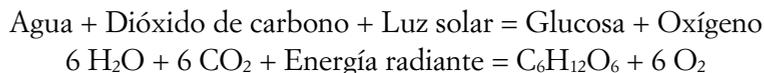
Figura 1. Lagos de Yahuarcaca en el noroeste de Leticia (Colombia). Foto: G. Vargas.

Con este panorama, para afrontar el tema de la sostenibilidad la humanidad se requiere de nuevas visiones, de nuevos ámbitos, de nuevos paradigmas... tal y como dijo Marcel Proust (The Guardian, 2008) haciendo referencia a los cambios de paradigma: «El verdadero viaje de descubrimiento no consiste en buscar nuevos paisajes, sino en tener nuevos ojos». La sostenibilidad es un problema complejo, multidisciplinario y colectivo, y el estudio de la naturaleza puede aportar ideas que nos ayuden a resolver problemas de esta índole (McGregor, 2013); es justo aquí cuando la biomimética entra en juego...

Con esta perspectiva, el presente artículo pretende aportar ideas / soluciones tecnológicas desarrolladas según los principios de la biomimética, tomando como modelos los árboles y las plantas, resaltando la forma en la que las especies vegetales nos pueden servir como referentes biomiméticos en aplicaciones de ingeniería, arquitectura y diseño industrial. Dichas ideas y soluciones se presentan destacando la relación entre estructura, morfología y función, que caracteriza a algunos sistemas vegetales. De este modo, veremos cómo nos inspira el reino vegetal o lo que es lo mismo, veremos qué es esto de la biomimética de las plantas.

Relaciones entre el mundo vegetal y el humano

Gracias a la evolución por selección natural, el concepto más revolucionario en la historia de la ciencia, por un lado, las primeras plantas terrestres aparecieron en el planeta hace unos 542 millones de años, arriesgándose a las nuevas condiciones de una tierra firme inhóspita, seca y hostil para los organismos acuáticos: falta de estabilidad en el aire (en el agua se mantenían flotando), falta de nutrientes disueltos en el agua, células reproductivas que se «apareaban» en medios acuosos (Erice, 2015)... Las plantas terrestres se convirtieron entonces en las reinas del planeta, porque contaban con un arma secreta: la fotosíntesis, es decir, podían convertir directamente la energía solar en energía química. Gracias a la fotosíntesis, las plantas nos sirven de batería solar al resto de seres vivos. Así las plantas, al igual que las algas y las cianobacterias, son los únicos organismos fotosintéticos que conocemos. Este proceso de convertir la luz del sol en carbohidratos es el proceso bioquímico más importante para la existencia de vida en la Tierra, y su reacción química se puede esquematizar de la siguiente forma:



Por otro lado, los primeros primates hicieron su entrada en el mundo hace 65,5 millones. Es decir, nuestra relación con el mundo vegetal se ha forjado a lo largo de más de 476 millones de años (Thomas, 2014), que no es poco. Los homínidos, la familia de primates hominoideos de los que descendemos, aparecieron en el continente africano hace unos 7 millones de años, y se abrieron camino beneficiándose de una oportunidad que otras especies no estaban aprovechando: la disponibilidad de alimento en las copas de los árboles (hojas, frutas e insectos). Y así, subiéndose a los árboles, irguiéndose para alcanzar mayores alturas, y otras tantas acciones evolutivas más, consiguieron ponerse de pie y caminar a dos patas hasta llegar a evolucionar en *Homo erectus*. Su cráneo siguió creciendo hasta llegar a su tamaño actual, el del *Homo sapiens*, que es lo que somos todos nosotros: la última y única especie del género *Homo* en la Tierra (Erice, 2015). Es más, gracias a nuestro paso por el planeta estamos en una nueva época geológica, el Antropoceno, que comienza en 1950 con los residuos radiactivos de las bombas atómicas. Así, los humanos hemos conseguido cambiar el ciclo vital del planeta, hemos sacado al planeta de su variabilidad natural (Waters *et al.*, 2016).

En resumen, sin plantas no es posible la vida en el planeta, al menos fuera del

agua. Así es que no nos queda otra; tenemos que relacionarnos con las plantas. Pero además de permitirnos la vida, ¿para qué nos sirven las plantas? Nos las comemos, nos las bebemos, nos vestimos con ellas, nos curan y nos hacen más bellos y bellas; nos sirven para construir edificios, para fabricar productos, para dar color, para conectarnos con la categoría de lo sagrado, para perfumar...

Vegetales como alimento

Los seres vivos nos tenemos que alimentar. Tenemos que obtener energía y «re-puestos» para nuestro cuerpo (por ejemplo, pelo, piel y uñas nuevas), y para regular procesos internos (la digestión, la respiración...). No estamos obligados a comer vegetales (ni animales), pero sí estamos obligados a cubrir las necesidades nutritivas: proteínas, hidratos de carbono, vitaminas, grasas... Quizás podríamos pensar que el ser humano empezó a comer vegetales porque recoger plantas es más fácil que cazar animales, pues no salen volando, corriendo ni nadando. Tienen otro tipo de mecanismos de defensa / disuasión: espinas, púas, armas químicas (venenos, mal sabor, sustancias alergénicas...). La importancia de la alimentación es innegable, tanto que es de las pocas cosas en las que todos los pueblos y culturas han estado de acuerdo. De hecho, somos la única especie que cocina: transformamos los alimentos de crudo a cocido, una actividad que compartimos todos los humanos (de todas las épocas y de todos los sitios) (Erice, 2015).

«Bebercio» y comercio

Al hilo de lo anterior, también podemos suplir las necesidades nutritivas no comiendo sino bebiendo los alimentos. Nos encontraríamos entonces con los jugos, batidos, infusiones, té, cafés, licores, leches, cocteles... En el mundo occidental ninguna bebida no alcohólica despierta tantas pasiones e intereses como el café. Se cuenta que esta planta, originaria del este africano, despertó la curiosidad de un pastor que vio a sus cabras más excitadas de lo normal después de haber ingerido sus frutas rojas. Y así ha sido durante los últimos 1500 años, tiempo que ha sido cultivada en las montañas de Etiopía y Sudán. Luego cruzó el mar Rojo hasta llegar a Estambul para después hacer su entrada a Europa por Venecia, desde donde se extendió a todos los continentes. Así se forjó, en prácticamente 50 años, el mayor desarrollo comercial de un producto de origen vegetal. Actualmente es

uno de los productos vegetales más valiosos en el mercado internacional, siendo el primer producto del denominado «Comercio justo» (Erice, 2015).

Vestidos vegetales

Una de las principales diferencias de los mamíferos, con respecto a otros animales, es que tienen pelo para regular su temperatura interna. Sin embargo, los seres humanos tenemos relativamente poco pelo, comparándonos con otros primates. Ese pudo haber sido uno de los factores que promovió el uso de una segunda piel: echarse algo encima. También pudo haber sido una forma para adornarse, para marcar una diferencia de clase, como señal de valor o de habilidad (cazar un tigre, tejer una falda...). ¡Aquí tenemos la invención del taparrabo! Se empezaron a utilizar hojas, hierba seca, cortezas de árboles... Más adelante vinieron las fibras vegetales (Vargas *et al.*, 2015) -ver Figura 2-, provenientes del tallo (lino, cáñamo, yute, banano, ramio, kenaf), de la semilla (algodón), del fruto (coco) o de las hojas (abacá, piña, sisal, fique) (Gañan & Mondragon, 2002; Wambua *et al.*, 2003). Estas fibras pudieron haber sido usadas como hilo para coser vestidos, alfombras, cestas, redes de pesca, canastos... De hecho, el arte de tejer es considerado por algunos como una evolución de la cestería (Erice, 2015).



Figura 2. Plantación tradicional de lino en el País Vasco francés. Foto: B. Kurth.

Materiales de construcción a partir de las plantas

Cuando hablamos de los seres humanos del paleolítico nos referimos a ellos como los cavernícolas. Pero, ¿cuándo abandonamos las cuevas y empezamos a construir casas? Quizás fue cuando empezamos a explorar nuevos territorios buscando alimento y mejores climas, cuando empezamos a ser nómadas. Y si nos íbamos a mover de un sitio a otro en poco tiempo ¿para qué íbamos a esforzarnos en construir refugios permanentes? Probablemente ese sea el origen del uso de los vegetales como materiales de construcción (Erice, 2015): techos de palmeras, elementos estructurales de bambú (Minke, 2012), ladrillos de adobe (barro reforzado con paja). Sin embargo, el material vegetal de construcción más importante es la madera: se ha utilizado para apuntalar los pozos y las minas, para los elementos estructurales en todo tipo de edificios, para las ruedas de agua y los molinos de viento (la principal fuente de energía mecánica antes de la electricidad) y para mil cosas más. El campesino no pudo haber cultivado sin mangos de herramientas o arados de madera; el cazador no pudo haber proyectado su lanza, disparado su flecha, o mantenido su arma sin la culata de madera. ¿Qué habrían hecho el cervecero y el viticultor sin madera para sus barriles y toneles, o las hilanderas sin madera para sus ruecas y telares? (Perlín, 2005).

Las maderas, y los árboles, tienen entonces un gran valor cultural, tecnológico, económico y comercial en la sociedad; basta con destacar que la producción de madera para la construcción supera incluso a la del acero, si se mide en toneladas por año (como se aprecia en la Figura 3), y como la madera es diez veces más ligera que el acero, ésta lo eclipsa totalmente si se mide en m^3 / año (Ashby, 2012). Es más, hasta podríamos identificar algunas especies de árboles: un pino, una araucaria, un eucalipto, un guayacán... Esta situación nos llevaría a pensar, erróneamente, que lo sabemos todo sobre los árboles. Sin embargo son unos grandes desconocidos: han dominado la tierra durante los últimos 300 millones de años (mucho más que los dinosaurios, los mamíferos o nosotros los seres humanos). Igualmente, los árboles tienen una diversidad asombrosa con más de 80.000 especies que cubren el 30 % de la tierra firme de nuestro planeta (Ennos, 2001).

Papel, escritura e imprenta

Sin papel no existirían los libros (bueno, los *e-books* sí). Agendas, billetes, postales, cuadernos, cartas, recibos, periódicos, revistas... Cuando pensamos en la

comunicación escrita se nos viene a la mente el papel: un soporte físico para escribir, dibujar, pintar o garabatear. La palabra papel viene de papiro, aunque éste técnicamente no lo es, ya que sus fibras (vegetales) no están desordenadas. El papel se obtiene de una masa acuosa aleatoria de pulpa de celulosa (Vargas *et al.*, 2015), mientras que el papiro se consigue laminando el tallo de la planta, del mismo nombre, en dos capas: una longitudinal y otra transversal. Después de la invención del papel en China en el siglo II a.C., vinieron los libros de tallo y los pergaminos de trapo (todos provenientes de las plantas) hasta que en el siglo XVIII se empezó a utilizar la madera como fuente de celulosa, al igual que lo hacen las avispas ¿Solución biomimética?, dada la escasez de trapos viejos y la alta demanda de papel. Para terminar, cabe mencionar el uso de colas, pegamentos y tintas vegetales en el desarrollo de la imprenta (Erice, 2015).

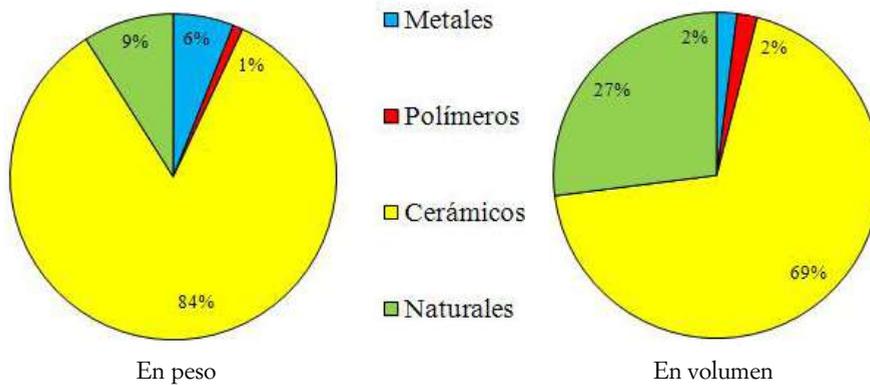


Figura 3. Consumo anual de materiales por la familia (Ashby, 2012).

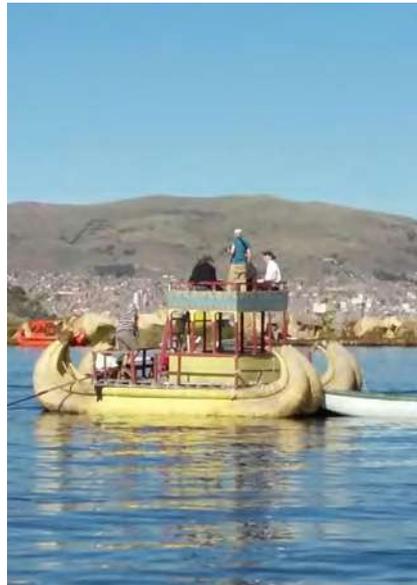
Las plantas en el transporte

El transporte habría sido impensable sin la madera. Hasta el siglo XIX todos los barcos, desde la chalupa de la Edad de bronce hecha con un tronco hueco hasta la fragata más *Hi-Tech*, fueron construidos con madera. Cuando la cantidad de carga fue aumentando, más personas, más materias primas, más productos, los materiales alternativos para la construcción naval, como vejigas, hierbas y cañas, resultaron ser poco resistentes para soportar tanto peso (Perlín, 2005). El barco de madera fue, por excelencia, el artefacto que hizo posible la expansión de la civilización occidental. Los barcos de madera exploraron y explotaron el mundo: transportaron pasajeros y ejércitos, emigrantes, presos y esclavos; acarrearon oro y

carbón, máquinas y libros, lana y té, tomates, maíz y prendas de algodón, no sólo surcando los mares sino también alrededor de las costas y a lo largo de los ríos (Gordon, 1976). Los buques de madera eran atados a muelles y embarcaderos hechos de madera; carros, carruajes, cuadrigas, carretas, calesas...de madera cruzaron puentes de madera; las traviesas de ferrocarril, por supuesto, eran de madera (Perlin, 2005). No podemos olvidarnos del importante papel que jugó el papiro en la construcción de embarcaciones en el antiguo Egipto (Frost, 2011) ni del que juega actualmente la totora en la construcción de pequeñas embarcaciones en el continente americano (Macía & Balslev, 2000), especialmente en el lago Titicaca entre Perú y Bolivia (Macía, 2006), como se aprecia en la Figura 4.



Trabajo artesanal



Embarcación tradicional

Figura 4. Explotación de los tallos de totora en el Lago Titicaca. Fotos: A. Arana.

Energía vegetal

No podemos negar el lugar que ocupa la madera en la evolución de la civilización. Y eso que aún no hemos hablado de la energía... A lo largo de la historia los árboles nos han proporcionado el material para hacer fuego (leña y carbón), la clave de la dominación de la humanidad sobre todas las demás especies (para mal más que para bien). El calor del fuego le ha permitido a nuestra especie explotar el planeta para su beneficio: climas fríos se convirtieron en habitables; granos

comestibles llegaron a ser la principal fuente de alimento; la arcilla se pudo transformar en cerámica para almacenar productos; pudimos extraer el metal del mineral, revolucionando herramientas e instrumentos en la agricultura, la artesanía y la guerra; pudimos fabricar materiales de construcción resistentes y duraderos (ladrillo, cemento, cal, yeso). El carbón vegetal y la leña proporcionaron el calor para producir sal, evaporando el agua de mar (algunos soldados romanos recibían parte de su «salario» en sal); para producir vidrio fundiendo la potasa y la arena; para producir tintes y jabón hirviendo mezclas acuosas; en Estados Unidos, los primeros barcos de vapor y las primeras locomotoras utilizaban leña como combustible (Perlin, 2005).

Brebajes, pociones, ungüentos, potingues, fármacos, pócimas y elixires

Todos queremos estar sanos, tener buen aspecto, estar bellos. Por eso las sustancias con propiedades medicinales, curativas o cosméticas nunca pasarán al olvido. Prueba de ello es la gran influencia y el enorme poder que tienen las industrias farmacéuticas. Aunque a día de hoy la producción de medicamentos es más una cuestión de química que de botánica, es innegable la importancia de las plantas en todo este tema: muchos de los compuestos que usamos a diario provienen de las plantas; por ejemplo, la aspirina -ácido acetilsalicílico- dice explícitamente su origen: extracto de la corteza de sauce blanco (*Salix alba*). Otro ejemplo: cuando se habla de proteger los bosques tropicales, la Amazonía en primer lugar, uno de los argumentos más recurrentes es la enorme cantidad de sustancias medicinales que desconocemos, que se encuentran escondidas en alguna hoja, semilla, fruto, flor o raíz, en la frondosidad de la selva. Asimismo, estamos regresando a los remedios naturales y a la fitomedicina (Erice, 2015).

Vegetales como puentes con lo sagrado

Los seres humanos hemos interpretado la realidad como algo lleno de significados... Buscamos un sentido, una explicación, un significado a nuestra realidad personal, y en esa búsqueda están los llamados sistemas religiosos que, para no entrar en polémicas, incluyen todos los sistemas de espiritualidad que buscan conectar al individuo con la categoría de lo sagrado. Las plantas forman parte de este viaje en búsqueda del significado último de la existencia; la experiencia con el mundo ve-

getal ha ayudado a configurar cómo la humanidad describe e imagina lo sagrado: podemos ingerir iboga para «ver» a dios, predecir el futuro mirando los posos de café, tomar té y encarnar el espíritu zen, ofrecer cacao a los dioses en Tlalocan, visitar el oráculo de Dodona que escuchaba las palabras de Zeus susurrándole al viento entre los robles... Uno de los puentes de conexión con lo sagrado (como el ayuno, la oración o la meditación) son las sustancias enteógenas, también conocidas como alucinógenas, psicomiméticas, psicolíticas o psicodélicas (aunque no son lo mismo) (Erice, 2015). Aquí nos encontramos con puentes vegetales como la ayahuasca (caapi o yagé), el peyote, la iboga, el copal, los hongos (que no son vegetales)... y, entrando en el terreno de las drogas, la marihuana, la heroína y la cocaína. Buen «viaje».

Colorantes y tintes vegetales

Estamos literalmente rodeados de colores y hemos aprendido a manipularlos: nos apropiamos de colores ajenos, los convertimos en tintes / pigmentos y los aplicamos a los objetos. Claro, el origen de los pigmentos puede ser mineral, animal o vegetal, pero en el caso de las plantas la paleta de colores es mucho más amplia y más versátil. ¿Por qué? Porque las plantas necesitan del color para sobrevivir: la clorofila es un pigmento captador de luz. Además, los vegetales ofrecen señales cromáticas a los polinizadores y dispersores de semillas: flores blancas y amarillas para los insectos, frutas y flores rojas para las aves y los primates. Utilizamos tintes para colorear la ropa y nuestro cuerpo, llenar de color los dibujos, pintar las paredes y los coches... Un caso destacable es el índigo, que es la principal característica de la prenda de vestir más importante de nuestro tiempo: el *blue jean*. El índigo se puede extraer de dos plantas: la hierba pastel, «prima» de la mostaza, y el añil, de la familia de las lentejas (Erice, 2015). Pero ojo, el color no existe, es una característica aparente que sólo está en el cerebro de quien lo contempla. Ayyy...

Valor estético de los vegetales

El mundo vegetal (Erice, 2015), así como otros que nos rodean, lo valoramos permanentemente según criterios estéticos (sensoriales) que forman un marco de referencia con el que le damos un valor a la realidad que nos rodea. Así, con la ayuda de nuestros sentidos establecemos este marco para discernir lo que es

verdadero, bueno y bello. Cuando decidimos algo no sólo tenemos en cuenta criterios éticos (de la virtud) y prácticos; también nos preguntamos si nos gusta, si nos parece hermoso. Cuando el primer ser humano se comió una manzana ¿lo hizo porque le parecía bella? ¿o porque le iba a aportar fibra y nutrientes? ¿o no se preguntó el porqué, se la comió y ya?. De este modo ¿se puede afirmar que un vegetal es bello? ¿Qué responderían Caravaggio, Zurbarán, Cézanne, van Gogh, Rivera o Botero? ¡Sí!.

Perfumes y plantas

No nos engañemos: es mejor oler bien que oler mal. Nos perfumamos para sacarle brillo a nuestras armas de seducción, para hacer más agradables las estancias, una casa, un coche, una tienda... Las funciones del aroma son muy variadas y se basan en criterios estéticos: el olfato. En el reino vegetal el perfume tiene una función muy importante: atraer a los polinizadores. Los capullos tienen olor si quieren atraer insectos, y no tienen si buscan aves; perfume «floral» si se trata de abejas o polillas, y hedor a carne podrida si son moscas. Algunas orquídeas ofrecen a los insectos, a cambio de polinización, un exquisito perfume que los hace irresistibles al sexo opuesto, lo que potencia su atractivo en el apareamiento. Cualquier parecido con los humanos es pura coincidencia... Asociamos los perfumes al mundo vegetal: flores, cítricos, maderas, incienso, caramelo, especias, hierbas, frutos rojos, tabaco, cacao... Hay unas 200 especies cultivadas para la explotación comercial de fragancias (Erice, 2015).

Jardines

Si una actividad artística se hace cultivando material vivo (flores, bacterias, células...) ¿la podemos catalogar como arte? A principios del siglo XVIII, cuando la sociedad europea definió lo que eran las «Bellas Artes», la jardinería estaba a la altura de la poesía, la pintura, la arquitectura y la escultura. En las culturas china y japonesa siempre ha habido una estrecha relación entre los pintores y los diseñadores de jardines. De hecho, una interpretación podría ser que un jardín es una pintura enrollada (no enmarcada): se necesita tiempo para extender la pintura que se va revelando ante nuestros pasos a medida que vamos recorriendo el espacio. Así, un caminante va dejando atrás un jardín para vivir dentro de la pintura... (Erice,

2015). También podemos encontrarnos con jardines botánicos, creados con un marcado carácter científico y educativo, o con la extensión del término, «del fr. *jardin*, dim. del fr. ant. *jart* ‘huerto’, y este del franco *gard* ‘cercado’; cf. a. al. ant. *gart* ‘corro’, ingl. *yard* ‘patio’» (RAE, 2014), que se refiere a un huerto. A fin de cuentas, si valoramos estéticamente una manzana en la mano ¿por qué no valorar un manzano? ¿o un campo lleno de manzanos?

Cultura = Cultivo

¿Cuál es el invento más importante de la humanidad? Sin duda, la agricultura. Su desarrollo cambió radicalmente la forma de vida de los pueblos cazadores-recolectores, que tuvieron que hacer frente a problemas cada vez mayores en cuanto a sanidad, contaminación, transporte... En pocas palabras, el ser humano abandonó el mundo «natural» para sustituirlo por uno más artificial (Díaz-Guillén, 2010). Sin duda, las plantas tienen un gran valor cultural; de hecho, la primera acepción de la palabra *cultura* es: «1. f. cultivo» (RAE, 2014). El cultivo es una de las metáforas más importantes de la civilización. No sólo cultivamos guayabas sino también la educación, las buenas maneras, el conocimiento y la cultura. Así, una persona cultivada es un sabedor, un maestro, un conocedor. El *Homo sapiens* apareció en África hace más de 150.000 años y los primeros vestigios del cultivo son de hace «sólo» 10.000 años: no hemos sido agricultores ni el 10% del tiempo que hemos vivido en la Tierra. En estos años de cultivo hemos dejado cicatrices en el planeta mucho más profundas e imborrables que cualquier otro sistema de abastecimiento alimentario (Erice, 2015).

Así como se habla de la domesticación de los animales, también podemos referirnos a la domesticación de las plantas (Ross-Ibarra *et al.*, 2007) para nuestro beneficio: preparar la tierra, sembrar o plantar (ya sea enterrar una semilla, sepultar una raíz o injertar un tallo), recoger lo producido... y vuelta a empezar. La domesticación de las plantas es un ejemplo excepcional de la co-evolución plantas-animales, y es un modelo mucho más rico, para el estudio de la evolución, de lo que generalmente se piensa (Purugganan & Fuller, 2009).

Lecciones biomiméticas de las plantas y los árboles

Al hilo de lo anterior, es innegable la relación del ser humano con el reino vegetal.

Pero, además de esta relación evidente, los árboles y las plantas nos han dado lecciones técnicas, ya sea en temas mecánicos, térmicos, funcionales, morfológicos o estructurales. Es más, algunas especies vegetales nos han servido como paradigmas para desarrollar soluciones tecnológicas. Ello se debe a la estrecha relación entre la estructura, la morfología y la función que hacen de las plantas unos sistemas caracterizados por una alta eficiencia estructural, metabólica y energética.

En el caso particular de las funciones estructurales, que le ofrecen a las plantas protección y soporte, la gran eficiencia mecánica de los sistemas vegetales se debe en gran parte a las estrategias que usa la naturaleza para conseguir materiales con un excelente comportamiento estructural. Dichas estrategias tienen que ver con la organización jerárquica de los materiales biológicos (Lakes, 1993), y a que en la mayoría de los casos se tratan de materiales compuestos reforzados con fibras (Mayer & Sarikaya, 2002) o materiales celulares (Gibson & Ashby, 1997), o ambos. De hecho, muchos tejidos biológicos, tales como la madera, son sólidos celulares reforzados con fibras que presentan una estructura jerárquica. Sus excepcionales propiedades mecánicas se deben a una adaptación funcional de la estructura a todos los niveles de dicha jerarquía (Fratzl & Weinkamer, 2007).

Diseño centrado en la vida

Asimismo, la tecnología actual necesita de un nuevo paradigma. Necesitamos una visión de la tecnología que tenga en cuenta, por supuesto, la función técnica tradicional pero que tenga además un alcance más amplio, considerando la responsabilidad social y la conciencia ecológica. En esta dirección se han llevado a cabo avances significativos; en particular el concepto de sostenibilidad, los cánones éticos en algunas disciplinas de la tecnología, el campo de la ecología industrial, y el concepto de biomimética (Lau, 2004). En tal sentido deberíamos desarrollar una visión de la tecnología centrada en la vida, siendo la biomimética una de las diferentes posibilidades.

Niveles biomiméticos de analogía

Para presentar los diferentes ejemplos tecnológicos en los cuales las plantas nos han servido como modelos biomiméticos, se definen tres niveles de analogía: la copia directa, la inspiración y la abstracción. En el caso de la copia, lo que se hace

es imitar tanto la función como la forma de la planta o de parte de ella; la abstracción utiliza el principio físico fundamental de la especie vegetal (es decir, su estrategia técnica), sin necesidad de copiar su estructura ni su forma; por último, la inspiración hace uso de los seres vivos como fuente de ideas y de creatividad, sin necesidad de copiar la función, la forma ni el principio físico.

Copia directa

Como ejemplos clásicos de la copia directa están la invención del alambre de púas y del Velcro. A mediados del siglo XIX los ganaderos norteamericanos que avanzaban hacia el oeste en su peregrinación colonizadora en busca del oro tuvieron que enfrentar la escasez de madera. Es conocido además que una práctica tradicional para contener el ganado en zonas que no disponían de madera ni de piedra para levantar muros, era la de emplear setos de plantas espinosas. En el medio oeste americano la planta que se utilizaba era normalmente el naranjo de Osage (*Maclura pomifera*), pero su utilización tenía las desventajas de cualquier cultivo masivo: crecimiento lento, necesidad de mantenimiento y de riego... Fue por ello que en 1868 Michael Kelly inventó un alambre que copiaba las espinas de los setos de naranjo (Vogel, 2000).

El Velcro, cuyo nombre se deriva de las palabras en francés *velour* + *crochet* = terciopelo + gancho, ese cierre flexible, sencillo, sin adhesivos ni gomas, y de uso infinito (pegar/despegar/pegar...) se ha posicionado en la vida moderna cotidiana como sustituto de los cordones, los botones, los corchetes, las cremalleras, los cierres a presión, los clavos de pared, los aros de las cortinas... Fue en 1948 cuando un ingeniero eléctrico suizo de 33 años, George de Mestral, curioso y amante del bosque, tuvo la sensibilidad (la genialidad dirían algunos) de estudiar cómo las semillas de algunas plantas de la región se enganchaban a su perro y a sus calcetines (Figura 5). Estas semillas, de cadillo (género *Xanthium*) o de bardana (género *Arctium*), tienen unos ganchitos que se agarran a cualquier superficie peluda; así, de Mestral copió este sistema fabricando los ganchitos de nylon, que para ese entonces apenas tenía diez años en el mercado (Vogel, 2000).



Figura 5. Escultura de Martin & Youle, de la colección «Entretien avec les artistes». Cerámica vidriada (2013). Foto: G. Vargas.

Inspiración

Si pasamos al nivel de inspiración, podemos encontrar más ejemplos de tecnología biomimética basada en las plantas. El primero tiene que ver con el sueño de volar, que ha estado en el ser humano probablemente desde que tomó consciencia de ello viendo a los animales: un águila, un murciélago, una abeja... Los animales voladores pueden hacer maravillas ya que están dotados de sentidos muy sensibles y disponen de la rápida acción de sus bucles de retroalimentación. Por supuesto, las plantas no pueden hacer lo mismo; sus elementos planeadores se caracterizan por una gran estabilidad. Tal es el caso de algunas semillas que planean para hacer más lenta su caída hasta el suelo, de forma que el viento puede alejarlas del árbol progenitor para evitar la competencia directa por la luz, el agua y los nutrientes. Una de estas semillas es la del magnolio javanés (*Alsomitra macrocarpa*) que planea por los bosques tropicales del sureste asiático. Ignaz Etrich, un piloto austríaco, desarrolló a principios del siglo XX una serie planeadores con piloto, sin piloto, con motor... inspirado en semillas de magnolio javanés que consiguió en el Jardín Botánico de Hamburgo. Los aparatos voladores de Etrich eran extremadamente estables, tanto que eran prácticamente inmanejables y carecían de toda maniobra-

bilidad (Vogel, 2000).

El segundo ejemplo tiene que ver con el concepto de apertura de un sistema, entendido como el grado en que un sistema opera dentro de unos límites a través de los que se dan intercambios, que son capaces de producir un cambio en el sistema, manteniendo los límites propios. En un sistema natural, la apertura tiene que ver con el intercambio de recursos, energía, materia e información; en el ámbito arquitectónico, la apertura de un edificio tiene que ver además con la apertura física en términos de accesibilidad, visibilidad, transparencia, orientación, flexibilidad, permeabilidad y posibilidad de cambio, sin olvidar la apertura metafórica (Gruber, 2011). Desde un punto de vista operativo, por ejemplo un edificio comercial o industrial, la apertura implica luz y ventilación. En tal sentido, el arquitecto venezolano Fruto Vivas en colaboración con el ingeniero alemán Frei Otto exploraron este concepto de edificio «abierto / cerrado» con el diseño del pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover, inspirado en la forma de la flor nacional venezolana, la orquídea *cattleya* (ojo, la *cattleya* es la flor nacional de Venezuela -*Cattleya mossiae*- y de Colombia -*Cattleya trianae*-), y caracterizado por la ligereza de la estructura de acero y vidrio, la movilidad de la cubierta y el contenido de la exposición basado en la biodiversidad del país sudamericano (García-Diego *et al.*, 2001).

El último ejemplo a escala de inspiración es un trabajo de los estudiantes del Máster en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Industria, Transporte, Edificación y Urbanismo de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). La arquitecta Elisa Iztueta y el ingeniero Javier Ruiz, dentro de la asignatura Sistemas y Materiales impartida por Gustavo Vargas, han recibido un reto de diseño para el desarrollo de un posible producto tecnológico mediante un acercamiento biomimético: diseñar un sistema estructural prefabricado para la construcción de viviendas de bajo coste. Se han considerado como entornos de aplicación del producto los campamentos de refugiados en zonas cálidas y secas, como en el Sahara Occidental, en Sudán del Sur o en Jordania. De esta manera las nuevas estructuras prefabricadas para las viviendas de emergencia protegerían del sol, de las tormentas de arena y del frío en las noches, logrando además la recogida de agua por condensación, a millones de refugiados del pueblo saharauí como consecuencia del conflicto étnico sursudanés o de la guerra en Siria.

El diseño se ha inspirado en dos especies vegetales: el sauce llorón (*Salix babylonica*), conocido por la caída de sus ramas y por la sombra que éstas generan, permitiendo crear la idea de refugio, y el árbol de la sangre de dragón (*Dracaena cinnabari*), un árbol endémico del archipiélago de Socotra en el Mar Árabe, ca-

racterizado por una extraña forma que le permite sobrevivir en condiciones muy áridas y montañas escarpadas con poco suelo. La niebla matutina se condensa en las hojas cerosas y orientadas hacia arriba, para luego ser canalizada hacia el tronco y las raíces. La enorme copa densamente poblada proporciona también una sombra eficaz para reducir la evaporación de las gotas de agua que caen al suelo. La construcción de las viviendas prefabricadas se divide en tres fases: la estructura, las cápsulas prefabricadas que se encajan en la estructura y el cerramiento del tejado. Como el edificio proporcionará alojamiento provisional y deberá permitir su transporte de un lugar a otro, la solución es ligera y no tendrá cimientos fijos. La estructura portante de la edificación se entierra en el sitio y trabaja como el tronco de un árbol; las capsulas se insertan entre dos pilares de la estructura portante formando 8 habitaciones de 7,5m². Cada cápsula tiene una zona húmeda (el baño; donde se recogen las aguas pluviales en la parte central) y una zona seca (salón - dormitorio), como se aprecia en la Figura 6.

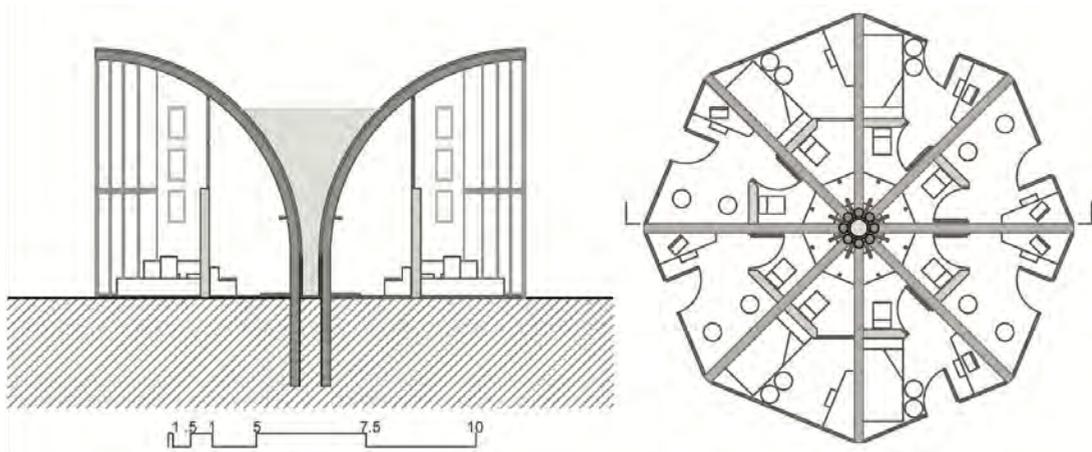


Figura 6. Sistema prefabricado para la construcción de viviendas provisionales de bajo coste.

Abstracción

Por último, en el nivel de abstracción existe una infinidad de proyectos en el ámbito tecnológico. El primero es el de las superficies autolimpiables y *antifouling* (anti-incrustantes) basadas en las superficies superhidrofóbicas de las hojas (Figura 7). La rugosidad jerárquica de la superficie de las hojas, formadas por microrrelieves superpuestos formando una nanoestructura, y la presencia de un recubrimiento hidrófobo de cristaloides epicuticulares de cera, le sirve a la planta para crear

una eficaz repelencia al agua, mejor conocida como hidrofobicidad. Este comportamiento reduce la adhesión de partículas contaminantes a las superficies de la planta. De esta forma, la rugosidad de la superficie reduce la adherencia de las partículas y favorece el comportamiento hidrofóbico, lo que gobierna el mecanismo de autolimpieza de muchas superficies biológicas. En el caso de las hojas que repelen el agua, las de la flor de loto (*Nelumbo nucifera*) ofrecen una impresionante demostración de este comportamiento, por lo que esta característica de autolimpieza / hidrofobicidad se denomina «efecto loto» (Barthlott & Neinhuis, 1997). Así, desde mediados de la década de 1990 este efecto ha tenido una gran importancia biológica y tecnológica, y se ha utilizado para desarrollar una variedad de superficies superhidrofóbicas, de autolimpieza, de baja adhesión, de reducción de la resistencia al flujo de fluido, y de antifouling (Bhushan, 2012).



Figura 7. Superficie superhidrofóbica de las hojas vegetales. Foto: N. Insausti.

El segundo ejemplo es el del tallo técnico fabricado por tecnologías textiles (braiding) basadas en el tallo del bambú (Milwich *et al.*, 2007). Este tallo técnico es un producto biomimético basado en algunas propiedades estructurales, mecánicas y funcionales que se encuentran en los tallos de dos plantas: la cañabrava (*Arundo donax*) y el equiseto de invierno o «cola de caballo» (*Equisetum hyemale*). Se han deducido y abstraído los principios físicos de los tallos y finalmente se han transferido a aplicaciones técnicas. La fabricación de los tallos técnicos se ha lle-

vado en dos fases, primero la fabricación de una preforma de refuerzo de fibras de vidrio con métodos de fabricación controlados por ordenador para la producción de textiles técnicos de doble trenzado (*double braid*), y luego la impregnación de la preforma con una resina polimérica. El resultado es un material compuesto tubular, continuo, ligero, fibroso, con propiedades mecánicas optimizadas y con una estructura en gradiente (Milwich *et al.*, 2006).



Figura 8. Flor «ave del paraíso» (*Strelitzia reginae*) con sus dos pétalos adnatos violetas. Foto: G. Vargas.

Otro ejemplo de desarrollo tecnológico abstraído a partir de las soluciones técnicas del reino vegetal es el de las persianas verticales abatibles basadas en el plegamiento de la flor «ave del paraíso» (*Strelitzia reginae*) (Knippers & Speck, 2012). Las plantas han desarrollado mecanismos de deformación flexibles dentro de un intervalo visco-elástico y reversible. Estos sistemas cinéticos elásticos pueden ser útiles para el desarrollo de estructuras flexibles biomiméticas. En tal sentido, existen dos tipos de movimientos, los autónomos y los no autónomos. Los primeros pueden ser a su vez activos (e.g. el plegado de hojas causado por un cambio en la presión de turgencia), o pasivos, debido a cambios en las circunstancias físicas (e.g. la flexión de cápsulas de la fruta al variar la humedad). Los movimientos no autónomos son deformaciones que se producen, por lo general, debido a una liberación de energía elástica almacenada; esta liberación se da por la acción de un

disparador/gatillo externo o mediante la aplicación de fuerzas mecánicas. Dentro de este último caso se tiene el ejemplo de la flor «ave del paraíso», que cuenta con dos pétalos adnatos (i.e. que nacen y crecen conjuntamente; están adheridos), formando una especie de percha para que las aves la polinicen (Poppinga, 2010), como se aprecia en la Figura 8. Bajo el peso del ave, la percha se dobla hacia abajo y simultáneamente, gracias a un acoplamiento mecánico flexión-torsión (Vargas & Mujika, 2010), la lámina del pétalo se abre para exponer al polinizador las anteras que estaban previamente ocultas están expuestas. Este sistema cinético elástico de cierre y apertura de las anteras fue analizado morfológicamente y luego fue abstraído para el desarrollo del sistema Flectofin de protección solar en fachadas (Knippers & Speck, 2012).

Por último, en el nivel de analogía de inspiración está el estudio sobre el modo de fractura en tallo verde, que se caracteriza por una rotura de fibras en el lado cóncavo sometido a tensiones de tracción seguida por grandes grietas longitudinales a lo largo de la línea central del elemento, como se presenta en la Figura 9. Este trabajo relaciona el modo de fallo de las ramas de árboles, de los huesos de mamíferos jóvenes (e.g. de niños y niñas) y de barras de plásticos reforzados con fibra de vidrio unidireccional (Vargas & Mujika, 2014). En éste se han estudiado de forma teórica dos modelos analíticos, uno considerando una viga recta y otro considerando una viga curva. Para estudiar experimentalmente el modo de fallo en tallo verde se han realizado ensayos de flexión en barras circulares pultruidas de material compuesto, con fibras de refuerzo orientadas longitudinalmente, inicialmente rectas. Se han establecido las condiciones experimentales que promueven el modo de fallo en tallo verde bajo cargas de flexión.



(a)

(b)

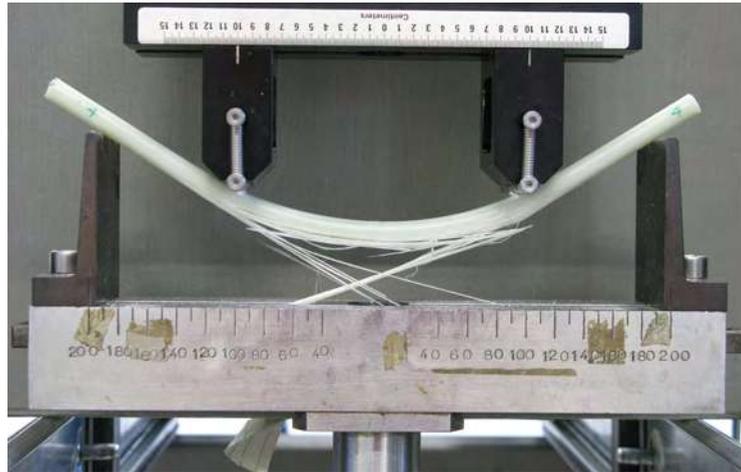


Figura 9. Fractura en tallo verde. (a) De ramas, (b) De barras pultruidas de plástico reforzado Fotos: G. Vargas.

Cierre

Este artículo se cierra con una reflexión sobre la importancia de las plantas y de los árboles en nuestro entorno vital, desde un punto de vista biomimético.

La isla era un paraíso

Remontémonos al siglo XVIII; más concretamente a 1767. Ese año, el francés Pierre Poivre, conocido por haberle quitado a los holandeses el monopolio del comercio de la nuez moscada en Île de France, hoy la isla Mauricio (Toussaint, 1971), se quejaba del expolio medioambiental que sufrió la isla con la llegada de los colonos. «La mayor falta que se ha cometido en esta isla es haber destruido las florestas que la cubrían», dijo indignado. Los colonos que habían llegado años antes habían arramblado con todo, dando paso a unas plantaciones de especias mal gestionadas (Erice, 2015) y a la extinción de especies endémicas (Cheke, 2006); la más conocida, el pájaro dodo (*Raphus cucullatus*) que se extinguió presumiblemente en 1690 (Roberts & Solow, 2003), poco más de 90 años después de su descubrimiento por la ciencia (Hume, 2006). Este comerciante francés llevó a cabo uno de los primeros planes «integrales» de gestión de la vegetación, dándole vital importancia a los bosques y a su conservación: proteger los árboles que quedan y aumentar su cantidad. Pero ojo, Poivre tenía claro que lo más importante era el

cultivo de las preciadas especias (y el abastecimiento de leña), no la conservación en sí misma; su familia estaba formada por comerciantes de seda y conocía los entresijos de la industria textil y la tintorería. Aún y todo, Poivre resalta la importancia de la agricultura no sólo como fuente de dinero sino como un todo: ecología, hidrología, medioambiente... Para esta tarea tuvo la inestimable ayuda de Philibert Commerson, y su ayudante Jeanne Baret, quien llegaría a ser el primer «científico estatal» de la historia (Erice, 2015).

La isla de la que hablaba Poivre es, en un contexto actual, «nuestra isla», perdida en la inmensidad del espacio negro y vacío. Para bien o para mal, esta isla seguirá siendo el escenario en el que se desarrolle la especie humana, y en el que se desarrollarán sus relaciones con el entorno, vegetales incluidos. Pero lo de destruir bosque no es nada nuevo: hemos talado árboles para construir, para quemar... hemos quemado árboles para convertir bosques «inútiles» en campos de cultivo «útiles»; es más, en aquellos tiempos se decía que los bosques y las selvas eran focos de enfermedades y que eran terrenos malsanos, entonces ¿por qué no destruirlos? Pero nos hemos dado cuenta muy tarde del mal, quizás demasiado tarde, cuando el sistema de la Tierra se ha desestabilizado: tormentas, sequías, cambios térmicos, sedimentos, erosión, extinción de especies naturales... Ahora sabemos que hay una relación entre lo que le hacemos a una planta, a un árbol o a un bosque, con lo que le hacemos al planeta: todas las acciones sobre una parte del sistema (vivo) traerá consecuencias sobre todo el sistema.

Para bien o para mal, impactamos en el medio ambiente sólo por el hecho de existir; genéticamente estamos programados para sobrevivir y no tenemos límites (ni individuales ni colectivos): hasta nuestra llegada, la Naturaleza no había necesitado de especies que se autolimitaran (Erice, 2015). Entonces ¿qué podemos hacer?

Soluciones colectivas

La paz, la sostenibilidad, la igualdad, el equilibrio... son conceptos que se consiguen colectivamente, poniéndonos de acuerdo como comunidad, considerando aspectos económicos, sociales y ecológicos. En tal sentido, tendremos que autolimitarnos, tendremos que decidir dónde poner los límites de la civilización y debemos decidir cómo utilizar los recursos, al igual que Poivre y Commerson, y cómo nos vamos a relacionar con el entorno. Por eso, toda la humanidad tendrá que ponerse de acuerdo (y no somos pocos). Para intentar buscar soluciones se

pueden tomar varios caminos; algunos pasan por la ecofilosofía: ecología profunda (Fox, 1989), ecofeminismo (Warren, 1997), ecología social... otros por la administración de los bienes (Bogdan et al., 2014): economía colaborativa, economía circular (McDonough & Braungart, 2002), economía azul (o verde), economía solidaria, economía del bien común... unos se centran en el diseño de procesos, bienes o servicios (O'Rourke & Seepersad, 2013): la biomimética, la bioinspiración, la bioclimática... Hay muchas formas de intentar mantener la isla a flote...

El primer biomimético latinoamericano

Para finalizar, quisiera recordar a Francisco José de Caldas, quizás el primer científico colombiano (y quizás el primer biomimético latinoamericano), aprovechando la conmemoración en este año 2016 del bicentenario de su muerte, quien dijo en 1815 (un año antes de que lo fusilaran): «Ninguno puede ser grande en una profesión sin amarla. Amad la vuestra y hacedla amar de vuestros conciudadanos por una conducta noble, dulce y virtuosa» (De Caldas, 1815).

BIBLIOGRAFÍA

- ASHBY, M. F. (2012). *Materials and the environment: eco-informed material choice*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- BARTHLOTT, W., NEINHUIS, C. (1997) 'Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces'. *Planta*, 202: 1-8.
- BHUSHAN, B. (2012). *Biomimetics: bioinspired hierarchical-structured surfaces for green science and technology*. Heidelberg: Springer.
- BOGDAN, A., ISTUDOR, N., GRUIA, R., TOBA, G.F., BULZ, N., GÂF-DEAC, I., CHELMU, S., GAVAN, C., PRICA, I., PASALAU, C. (2014) 'New Holistic Approach of Bioeconomics and Ecoeconomics Theories, Practical Bridging from the Green Economy to Blue Economy, Trough New Integrated and Innovative Paradigm about "Bio-eco-geo-economy"'. *Procedia Economics and Finance*, 8: 83-90.
- CAIN, M.L., BOWMAN, W.D., HACKER, S.D. (2012). *Ecology*. Sunderland: Sinauer.
- CHEKE, A.S. (2006) 'Establishing extinction dates – the curious case of the Dodo *Raphus cucullatus* and the Red Hen *Aphanapteryx bonasia*'. *Ibis*, 148: 155-158.
- DE CALDAS, F. J. (1815). *Discurso para dar comienzo al curso militar del Cuerpo de Ingenieros de la República de Antioquia*. Medellín: Imprenta Nacional.
- DÍAZ-GUILLÉN, F. (2010) 'El proceso de domesticación en las plantas'. *Casa del Tiempo*, 28: 66-70.
- ENNOS, R. (2001). *Trees*. London: Natural History Museum.
- ERICE, A.S. (2015). *La invención del reino vegetal*. Barcelona: Ariel.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2010). *Main report: Global Forest Resources. Assessment 2010*. Rome (Italy): FAO.
- FOX, W. (1989) 'The Deep Ecology-Ecofeminism: debate and its parallels'. *Environmental Ethics*, 11: 5-25.
- FRATZL, P., WEINKAMER, R. (2007). 'Nature's hierarchical materials'. *Progress in Materials Science*, 52: 1263-1334.
- FROST, H. (2011). 'Don't forget the dunnage: targeting plants on ships'. *Nautical Archaeology*, 40: 194-198.
- GAÑAN, P., MONDRAGON, I. (2002). 'Surface modification of fique fibers: effect on their physico-mechanical properties'. *Polymer Composites*, 23: 383-394.
- GARCÍA-DIEGO, Ch., LLORENS, J., POPPINGHAUS, H. (2001). 'El pabellón de Venezuela en la expo 2000 de Hannover'. *Informes de la Construcción*, 53: 11-26.
- GIBSON, L.J., ASHBY, M.F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge: Cambridge University.
- GORDON, J.E. (1976). *The new science of strong materials or why you don't fall through the floor*. Princeton: Princeton University.
- GRUBER, P. (2011). *Biomimetics in architecture: architecture of life and buildings*. Wien: Springer.
- HUME, J.P. (2006). 'The history of the Dodo *Raphus cucullatus* and the penguin of Mauritius'. *Historical Biology*, 18: 69-93.
- KNIPPERS, J., SPECK, T. (2012). 'Design and construction principles in nature and architecture'. *Bioinspiration & Biomimetics*, 7(015002): 1-10.
- LAKES, R. (1993). 'Materials with structural hierarchy'. *Nature*, 361: 511-515.

- LAU, A.S. (2004). 'Life-centered Design - A Paradigm for Engineering in the 21st Century', pp. 1-10 (3261 - 9.866) in American Society for Engineering Education Annual Conference. Kansas (USA): ASEE.
- LEAVELL, C. (2001). *Forever green: the history and hope of the American forest*. Atlanta: Longstreet.
- MACÍA, M.J. (2006) 'Las plantas de fibra', pp. 370-384 in *Botánica Económica de los Andes Centrales*. La Paz (Bolivia): Universidad Mayor de San Andrés.
- MACÍA, M.J., BALSLEV, H. (2000). 'Use and management of totora (*Schoenoplectus Californicus*, Cyperaceae) in Ecuador'. *Economic Botany*, 54: 82-89.
- MAYER, G., SARIKAYA M. (2002). 'Rigid biological composite materials: Structural examples for biomimetic design'. *Experimental Mechanics*, 42: 395-403.
- MCDONOUGH, W., BRAUNGART, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. New York: Macmillan.
- MCGREGOR, S.L.T. (2013). 'Transdisciplinarity and Biomimicry'. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*, 4: 57-65.
- MILWICH, M., SPECK, T., SPECK, O., STEGMAIER, T., PLANCK, H. (2006). 'Biomimetics and technical textiles, solving engineering problems with the help of nature's wisdom'. *American Journal of Botany*, 93: 1455-1465.
- MILWICH, M., PLANCK, H., SPECK, T., SPECK, O. (2007). 'The technical plant stem: a biomimetically inspired narrow fabric'. *Melliand - Narrow Fabric and Braiding Industry*, 44: 34-38.
- MINKE, G. (2012). *Building with bamboo: design and technology of a sustainable architecture*. Basel: Birkhauser.
- O'ROURKE, J.M., SEEPERSAD, C.C. (2013) 'Examining efficiency in bioinspired design', pp. DETC2013-13147 in International Design Engineering Technical Conference. Portland (USA): ASME.
- PERLIN, J. (2005). *A Forest Journey: The Story of Wood and Civilization*. New York: Countryman.
- POPPINGA, S., LIENHARD, J., MASSETER, T., SCHLEICHER, S., KNIPPERS, J., SPECK, T. (2010) 'Biomimetic Deployable Systems in Architecture', pp. 40-43 in C.T. Lim, J.C.H. Goh (eds). *6th World Congress of Biomechanics*. Singapore: Springer.
- PURUGGANAN, M.D., FULLER, D.Q. (2009). 'The nature of selection during plant domestication'. *Nature*, 457: 843-848.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA (2014). *Diccionario de la lengua española*. Madrid (España): RAE.
- ROBERTS, D.L., SOLOW, A.R. (2003). 'Flightless birds: When did the dodo become extinct?'. *Nature*, 426: 245.
- ROSS-IBARRA, J., MORRELL, P.L., GAUT, B.S. (2007) 'Plant domestication, a unique opportunity to identify the genetic basis of adaptation'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 8641-8648.
- THE GUARDIAN (2008) 'Marcel Proust', URL (abril, 2016). Obtenido de <https://www.theguardian.com/books/2008/jun/11/marcelproust>
- THOMAS, P.A. (2014). *Trees: their natural history*. Cambridge: Cambridge University.
- TOUSSAINT, A. (1971). 'Histoire de l'Île Maurice', 128 p. in *Que sais-je? 1449*. Paris: Presses Universitaires de France.
- VARGAS, G., MUJICA, F. (2010). 'Determination of in-plane shear strength of unidirectional composite materials using the off-axis three-point flexure and off-axis tensile tests'.

- Journal of Composite Materials*, 44: 2487-2507.
- VARGAS, G., MUJICA F. (2014) 'Greenstick fractures or how plant branches, young mammal bones and composite pultruded rods break', pp. 22-26 in 16th European Conference on Composite Materials. Seville (Spain): European Society for Composite Materials.
- VARGAS, G., TRIFOL, J., ALGAR, I., ARBELAIZ, A., MONDRAGON, G., FERNANDES, S.C.M., MUJICA, F., ECEIZA, A. (2015) 'Nanostructured composite materials reinforced with nature-based nanocellulose', pp. 75-85 in S. Syngellakis (Ed). *Natural Filler and Fibre Composites: Development and Characterisation*. Wessex (England): WIT.
- VOGEL, S. (2000). *Ancas y palancas: mecánica natural y mecánica humana*. Barcelona: Tusquets.
- WAMBUA, P., IVENS, J., VERPOEST, I. (2003). 'Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?'. *Composites Science and Technology*, 63: 1259-1264.
- WARREN, K., ERKAL, N. (1997). *Ecofeminism: women, culture, nature*. Bloomington: Indiana University.
- WATERS, C.N., ZALASIEWICZ, J., SUMMERHAYES, C., BARNOSKY, A.D., *et al.* (2016). 'The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene'. *Science*, 351(6269): 1-10.
- WORLD WIDE FUND FOR NATURE (2014). El crecimiento de la soja: impactos y soluciones. Gland: WWF.
- WORLD WIDE FUND FOR NATURE (septiembre, 2016). '¡Por una Amazonía viva!'. Obtenido de http://wwf.panda.org/es/nuestro_trabajo/iniciativas_globales/amazonia/