

Innovación, biomimesis y organizaciones. De las metáforas hacia la aplicación

Álvaro Pío Gómez Olaya
Universidad Del Valle (Colombia)

La reflexión sistemática acerca de la relación existente entre las organizaciones, la innovación y la naturaleza podría llevarnos a replantear y comprender de una manera más adecuada el rol que cumple la naturaleza en el desarrollo de las organizaciones a través de procesos de innovación. Este texto presenta un análisis de determinados procesos biomiméticos a partir de tres ejemplos de tecnologías correspondientes a estrategias de bioinspiración, biomimética y bioutilización. En este sentido, se centra en un análisis de caso a la hora de explorar los distintos niveles de aplicación de la biomimesis.

El uso de conceptos y metáforas biológicas en la teoría de las organizaciones

La relación entre el aprendizaje proveniente de la naturaleza y las organizaciones ha sido abordada desde diversas aproximaciones en los campos de la teoría de las organizaciones y de la gestión, principalmente a través de conceptos provenientes de la biología que han sido empleados, por lo habitual, como metáforas. Al respecto, Jiménez & Castellanos (2009) realizan una revisión bibliométrica del uso de la metáfora biológica en el campo del *management* organizacional y encuentran las siguientes conclusiones:

- Utilización significativa de la “teoría general de sistemas”, en la medida en que permite entender la organización como un sistema compuesto por diversos subsistemas jerarquizados, hacer énfasis en el medioambiente y constatar la importancia de las habilidades organizacionales para responder a los cambios o, por el contrario, para buscar deficiencias en el propio sistema organizacional.
- Identificación estrecha entre organización y organismo, que ha sido empleada por autores como Morgan (1979), Mayo (1920), Maslow (1954), Woodward (1965), Lawrence y Lorsch (1973). Esta asociación ha permitido desarrollar una estrategia de búsqueda de soluciones creativas en las compañías, a la vez

que ha permitido resaltar el carácter orgánico del proceso innovador. Estos autores señalan, no obstante, como una desventaja la puesta en práctica de la imagen de la organización social como ser vivo.

- Traducción de la organización como sistema “autopoietico”, de tal modo que los distritos industriales y *clusters* se interpretan como sistemas orgánicos.
- Asunción del “*bio-management*”, en la medida en que integra aspectos propios de las teorías administrativas, de la tecnología y de las ciencias biológicas y, además, se orienta a aquellas organizaciones que usan elementos biológicos en sus procesos productivos.
- Uso de la “*evolución directa*”. Se trata de una herramienta procedente del campo de la biotecnología que busca alcanzar el mejor desempeño de las enzimas a partir de la modificación de los organismos productores de dichas enzimas. Este tipo de aproximación desarrolla un análisis comparativo entre la organización y los organismos con el propósito de conseguir nuevas estructuras y procesos organizacionales.
- Introducción de la noción de “*hormesis*”, en tanto que establece una analogía entre las toxinas y la organización.

Como puede comprobarse, en lo que respecta a la biomimesis los conceptos provenientes de la biología son variados y se corresponden con diversos campos como, por ejemplo, la teoría de las organizaciones, el *management* o la innovación tecnológica. Pero surge, en este caso, el interrogante acerca del nivel de aplicabilidad de los conceptos provenientes del campo de la biomimesis, tanto a nivel teórico como a nivel aplicado. Al hilo de ello, cabe destacar el análisis presentado por Schatten & Zugaj (2011), en el que analizan los siguientes conceptos:

- Organizaciones tipo Ameba
- Autopoiesis
- Redes neuronales
- Heterarquías
- Fractales
- Bio-equipos
- Inteligencia de Enjambre
- Estigmergia
- Génesis y reproducción

Todos estos conceptos han tenido algún tipo de aplicación en el campo de la gestión de organizaciones. Desde este punto de vista, los autores se cuestionan si esos conceptos son realmente aplicables, tanto desde el punto de vista práctico como desde el punto de vista teórico. Para ello establecen una evaluación basa-

da en tres niveles distintos de aplicación. El primero es el que corresponde a la metáfora y se hace referencia a un concepto determinado cuando no puede ser implementado directamente en la práctica pero puede ser útil para otros propósitos. El segundo es el nivel analítico, en el que el concepto provee métodos que pueden aplicarse en la práctica para analizar una organización. El tercer nivel, denominado sistémico, corresponde a conceptos que pueden ser aplicados en la práctica para establecer nuevos sistemas organizacionales.

En lo que respecta al plano teórico, los tres niveles corresponden, en primer lugar, a un nivel descriptivo común, en tanto que el concepto puede ser utilizado para describir algún fenómeno organizacional; seguidamente cabría identificar un elemento distintivo en el nivel analítico, ya que, a partir de él, se determina el modo en que el concepto provee métodos para analizar algún fenómeno organizacional particular y, también en el sistémico, en la medida en que el concepto puede proveer métodos holísticos para comprender el fenómeno organizacional. La evaluación de estos niveles muestra que, desde el punto de vista de la aplicación práctica, los conceptos asociados a la inteligencia de enjambre y redes neuronales se sitúan en un nivel sistémico, en tanto que, desde el punto de vista del uso teórico, los conceptos de *autopoiesis*, redes neuronales e inteligencia de enjambre se encuentran en este nivel. De esta forma, este análisis, permite concluir que:

The use of metaphors is likely the first step in creating a more tangible biomimetic application in organization theory. The development of such applications can provide us with a suitable backdrop for understanding, analyzing and optimizing modern organizations (Schatten & Zugaj, 2011, p. 52).

El uso de conceptos provenientes de la biología y de otras disciplinas propias de las “ciencias naturales” ha sobrepasado, pues, el mero uso metafórico, para pasar a constituirse en una herramienta descriptiva, analítica y de aplicación sistemática sobre la que, sin embargo, persisten dudas acerca de su implementación práctica.

En tal sentido, vale la pena resaltar la propuesta metodológica para la implementación de un modelo de procesos para la gestión de programas (conjunto de proyectos) basado en fundamentos biomiméticos desarrollada por Worobei & Flämig (2014). Estos autores toman como punto de partida la existencia de sistemas diferenciados de gestión “mecanicistas” y “orgánicos”, caracterizando a éstos últimos por tener una estructura de control, autoridad y comunicación en red. Teniendo en cuenta lo anterior, pasan a llevar a cabo una revisión de los modelos orgánicos de gestión propuestos por diversos autores, entre los que cabe destacar a Burns & Stalker (1961), Stachowiak (1989), Beer (1972), Ulrich y Fluri (1995), Vester (1985), etc., en la medida en que su aplicación práctica posee un alto grado de complejidad. En tal sentido, proponen que una aproximación basada en principios propios de la biomimética (a través del aprendizaje proveniente de

los sistemas naturales) podría contribuir a superar los problemas de implementación observados en los modelos de gestión orgánicos, especialmente en el campo del diseño de sistemas de gestión de programas. Este problema podría encontrar solución por analogía, mediante una aproximación en tres fases diferentes que coincida con otras tantas etapas del proceso biomimético. En primer lugar, se trataría de establecer una identificación y descripción de principios existentes en la naturaleza. En segundo lugar, la derivación de dichos principios, y finalmente la aplicación de éstos a la solución de problemas. En la primera fase, los sistemas antropogénicos se diferencian de acuerdo a sus características específicas, que son empleadas para identificar a los sistemas biológicos adecuados con base en un mapeo analógico. De esta forma, se posibilita la transferencia de conocimientos. En la segunda fase, se incorpora la comprensión analógica, en la que se incluye la descripción de las variables relevantes, su análisis para determinar aquellas que resulten útiles para actuar sobre el sistema, y el establecimiento de determinadas bases para derivar principios provenientes de los sistemas naturales. Finalmente, en la tercera fase se emplea la resolución analógica de problemas mediante la aplicación de los principios encontrados en la segunda fase. Para estos autores, el aprendizaje de los sistemas naturales es un camino que permite lidiar con la complejidad. Puede decirse que no hay duda de la profundidad y alcance que posee el empleo de conceptos provenientes de la biología y de las “ciencias naturales” en la teoría de las organizaciones, ni de su potencial para ofrecer mejores explicaciones y aplicaciones prácticas en términos de gestión; pero es innegable que aún falta camino por recorrer en la construcción de un marco conceptual apropiado para entender los mecanismos a través de los cuales las organizaciones generan innovaciones desde el aprendizaje obtenido en su relación con la naturaleza.

Algunos aportes, desde el campo de la economía, a la teoría del “aprendizaje desde el capital natural”

La construcción de una teoría sólida acerca del proceso de aprendizaje de la naturaleza depende de una reflexión en torno a la importancia que tiene la naturaleza como fuente de innovación humana. Este hecho se está produciendo, tanto en disciplinas científicas asociadas a las “ciencias naturales” (tales como la física, la ingeniería, la biomecánica, la biología, la química, etc.) como en la disciplina económica (ciencias sociales). Bajo este enfoque, cabe adquirir una mejor comprensión de los procesos de aprendizaje de la naturaleza asumiendo una estrategia que combine conceptos provenientes de las ciencias naturales, dada la complementariedad existente entre las nociones de “biomimética” y “bioinspiración”, y algunas categorías derivadas del análisis económico como *naturfact*, *biological artefacts* y

learning by natural capital. De esta forma y mediante el empleo de un análisis de casos asociadas a tecnologías fundadas en el conocimiento de funciones naturales, es posible ilustrar adecuadamente la manera en que puede aprovecharse esta síntesis conceptual para conseguir una interpretación adecuada de los procesos de aprendizaje de la naturaleza; Este análisis parte de una clasificación de las modalidades de “aprendizaje del capital natural” con base en tres tipos específicos de procesos: “bioinspiración”, “biomimética” y “bioutilización”.

Tecnologías naturales e innovación humana

En la actualidad, existe una intensa reflexión sobre la importancia de la naturaleza como fuente de innovación humana en disciplinas científicas tales como la física, la ingeniería, la biomecánica, la biología, la química, etc. Dicha reflexión tiene como motivación esencial analizar las tecnologías, bienes y servicios que hacen uso de la naturaleza como fuente de inspiración para el diseño o como insumo. Estas tecnologías han generado un impacto significativo en ciertas líneas de innovación como la generación de energía (las Turbinas de viento *Whalepower*), la arquitectura (el Edificio *Eastgate Centre* en Harare-Zimbawe) y otras muchas, vinculadas a campos como la robótica, la nanotecnología, la medicina, los nuevos materiales, la microelectrónica, la arquitectura, la biomecánica, la biorremediación, los biopolímeros, la cibernética, la inteligencia artificial que han quedado registradas en multitud de trabajos realizados, entre otros, por Bar-cohen (2006), *National academy of engineering* (2007), Bhushan (2009), Von gleich *et al.* (2009), Carpi & Brebbia (2010), Martin (2011), Reed *et al.* (2009), etc.

Este proceso concreto de interdependencia entre tecnologías existentes en la naturaleza y tecnologías humanas se hace evidente a partir de la transferencia de información, de principios naturales o materiales para crear productos, servicios o tecnologías, aprovechando la capacidad que tienen los sistemas biológicos de llevar a cabo funciones muy complejas con resultados óptimos. El estudio sistemático del funcionamiento de estos sistemas biológicos y de las propias posibilidades de adaptación de ideas, principios y características que rigen las tecnologías naturales ha dado origen a un vasto conjunto de bienes, servicios y tecnologías basadas en la naturaleza que sirven de fuente de innovación. La interacción entre tecnologías provenientes de la naturaleza y los procesos productivos humanos ha recibido, en general, la denominación de “biomimesis”, considerado como un amplio campo de estrategias conocidas, por lo general, bajo diversas denominaciones: bioinspiración, biomimesis, biónica, etc. Como campo de investigación, la biomimesis está experimentando un creciente auge en las últimas décadas. El análisis bibliométrico de Lepora *et al.* (2013) muestra que esta área de investigación

ha duplicado su extensión cada 2 o 3 años desde mediados de los noventa y ha producido casi 3000 publicaciones por año. Igualmente, el aporte a la innovación tecnológica de la biomimesis también es creciente. La revisión hecha por Bonser (2006) de las patentes de la *Oficina de Patentes y Marcas* de los Estados Unidos en el periodo que va de 1985 a 2005 constató que el número de patentes basadas en fundamentos biomiméticos ha crecido, en términos proporcionales, más rápido que el número total de patentes. Las innovaciones humanas (en forma de bienes, servicios y tecnologías) que parten de la transferencia de ideas, procesos, estrategias, materiales y tecnologías provenientes de los sistemas biológicos expresan modalidades diferentes de apropiación humana (como la bioinspiración, biomimética, bioextracción, bioderivación, bio-asistencia, etc.) acerca de las cuales surgen algunos interrogantes relevantes. Desde este punto de vista, vale la pena preguntarse sobre la diferenciación entre estas modalidades, ya que suscita la necesidad de establecer delimitaciones y definiciones precisas a fin de obtener una mejor comprensión de los diversos grados de dependencia que las tecnologías humanas tienen respecto de las tecnologías naturales. En este sentido, resulta relevante el aporte de Otto Schmitt (1969), quien acuñó el término biomimética integrando los conceptos de *bios*, que significa vida, y *mimesis*, que significa imitar -siguiendo a Schmitt (1969)- y esta labor de identificación continúa con una larga lista de aportes durante las décadas siguientes. Siendo así, la dificultad que entraña el intento de diferenciación clara entre los conceptos de bioinspiración, biomimética y otros conceptos relacionados, es expresada con precisión por Hanks & Swiegers:

La distinción entre la biomimética y la bioinspiración no es, sin embargo, tajante. Existen muchos tonos de solapamiento entre estos dos conceptos. Por ejemplo, una imitación deliberada y sistemática de las técnicas empleadas por la naturaleza dentro de los sistemas que están muy lejos de la naturaleza puede ser considerada ya sea biomimética o bioinspiración...la distinción formal entre la biomimética y la bioinspiración por lo tanto, pueden estar difuminadas y llegar a ser difícil de separar (Hank & Swiegers, 2012, p. 2).

Las motivaciones que se manejan para la unificación de éstos conceptos han sido expuestas por autores como Vincent *et al.* (2006), Lepora *et al.* (2013), Rawlings *et al.* (2012) y Drack & Gebeshuber (2013). Al hilo de ello, resulta preciso indicar que algunas de las modalidades estrechamente relacionadas con la biomimesis suelen solaparse y pueden ser fácilmente confundidas, especialmente cuando se desarrollan innovaciones relacionadas con el aprovechamiento de individuos, poblaciones, materiales, principios activos y sustancias naturales encuadradas dentro de diversas nociones como las de bioderivación, bioadaptación, bioasistencia, bioextracción y bioutilización. El campo más comprehensivo y am-

plio es el de la bioinspiración, que consiste en obtener información de fuentes naturales para crear bienes, servicios, tecnologías, procesos, etc.; tal vez es el más difícil de definir con precisión puesto que se superpone con el concepto de biomimesis. Algunos autores señalan que la amplitud de la definición del concepto respondería al hecho de que la biomimesis estaría incluida en el concepto más general de bioinspiración. De esta forma, la biomimesis sería un caso especial de bioinspiración en el sentido de que el desarrollo de todo producto biomimético (transferencia) requiere previamente de un proceso de bioinspiración (influencia, información). Por otra parte se encuentra la bio-utilización, que consiste -para efectos de este trabajo- en el aprovechamiento de un componente natural (ya sea una molécula, una sustancia, un material, un organismo o población o una función ecosistémica) con el propósito de integrarlo de manera funcional en una tecnología, bien o servicio desarrollado por los seres humanos. Este concepto puede agrupar las nociones de bioderivación, bioadaptación, bioasistencia y bioextracción, puesto que cada uno de éstos términos representa una forma específica de incorporación de un elemento natural a bienes, servicios o tecnologías humanas.

En lo que respecta a la disciplina económica, el proceso de transferencia de tecnologías o conocimientos útiles para mejorar la productividad y la innovación ha sido abordado por el historiador de la tecnología y la innovación George Basalla, quien propone como punto de partida hacer seguimiento de la lógica evolutiva por la que existen artefactos -un producto humano- cuyos antecesores no fueron fabricados por otro ser humano. Este tipo de realización humana es denominado “*Naturfacto*”, en referencia a bienes económicos originados a través de tecnologías naturales que sirven de antecesor evolutivo y de referente para bienes y tecnologías humanas:

Suponiendo que cada nuevo artefacto se basa en cierta medida en un artefacto anterior afín, debemos afrontar la cuestión del origen de la primera cosa creada. ¿Cuál fue su modelo? Aunque no había artefactos anteriores por entonces, una multitud de naturfactos pudieron servir de modelo para iniciar el proceso de evolución tecnológica... (Basalla, 1991, p. 73).

Basalla aporta ejemplos de tecnologías con origen orgánico, como por ejemplo la alambrada, cuyo origen es el deliberado intento de copiar una forma orgánica que funcionara eficazmente como repelente del ganado. Teniendo todo ello en cuenta, este autor sugiere la adopción del concepto “*naturfacto*”, en tanto que define un conjunto de bienes, servicios y tecnologías derivadas de las interacciones entre las tecnologías humanas y las tecnologías naturales, a partir del proceso que denominamos “aprendizaje desde el capital natural”. Se trata de una aproximación válida, desde el punto de vista de la disciplina económica, en relación con las tres modalidades desde las que se lleva a cabo el proceso de innovación (bioinspira-

ción, biomimética, bioutilización).

Además de contar con una definición para diferenciar a los artefactos humanos de los naturales, es necesario abordar el problema del grado de dependencia existente entre los artefactos naturales y los *naturfactos*, puesto que el reconocimiento de la existencia de los *naturfactos* y su importancia en el proceso de innovación no implica necesariamente que la dependencia de los inventos humanos respecto de las tecnologías naturales esté fuera de discusión. En tal sentido, debe resaltarse la posición de Steven Vogel (2000), según la cual las tecnologías naturales y las tecnologías humanas son esencialmente diferentes desde el punto de vista técnico, lo que llevaría a concluir que la producción de inventos o innovaciones en el ámbito humano no guarda una relación de dependencia frente a las tecnologías naturales. Aun reconociendo que existen ejemplos exitosos de tecnologías basadas o inspiradas en la naturaleza (en campos tales como la nanotecnología, la mecánica muscular, los materiales compuestos, materiales inteligentes, robots manipuladores, vehículos que caminan, etc.) las posibilidades de copiar, imitar y emular a la naturaleza son limitadas:

La (tecnología de la) naturaleza es esencialmente minúscula, húmeda, no metálica, sin ruedas y flexible. La tecnología humana es principalmente todo lo contrario: grande, seca, metálica, con ruedas y rígida. Allí donde una tecnología opera en lo que normalmente es el dominio de la otra, la emulación es prometedora (Vogel, 2000, p. 301).

El aprendizaje desde el capital natural

En este apartado se presentarán aquellos conceptos que, a partir de la idea de “aprendizaje desde el capital natural” permiten caracterizar el papel desempeñado por las tecnologías naturales en el proceso de innovación. Como precedente de gran importancia, es preciso tener en cuenta el trabajo de Kenneth Boulding (1981), ya que en él se desarrolla una reflexión sistemática sobre las características básicas de la interconexión entre el sistema natural y el económico. Este autor da cuenta de la existencia de ciertos procesos de intercambio entre los sistemas naturales y humanos, además de realizar una identificación de tecnologías y agentes naturales. Desde ese punto de vista, plantea la importancia de los procesos de acumulación de conocimientos y de aprendizaje en la naturaleza, en la medida en que los diferentes tipos de conocimiento pueden ser considerados como *stocks* asociados a dinámicas de aprendizaje en flujo. Según Boulding, existe un proceso general de evolución del que los ecosistemas forman parte, evolucionando en estrecha relación con la “econósfera” -esfera de actividades económicas-, y la “socioesfera” -o esfera de todas las actividades, relaciones e instituciones humanas-. Una de las

características más sobresalientes de la ecosfera consiste en que posibilita la aparición del desarrollo económico, circunstancia ésta que, en esencia, expresa un proceso de aprendizaje. Dicha trayectoria evolutiva general se materializa con la participación de poblaciones de diferentes tipos de especies naturales y humanas (esto es, especies químicas, especies biológicas y especies sociales), provenientes de diferentes lógicas productivas, que crean, a su vez, “artefectos naturales” y “artefectos humanos”. En este sentido, existen dos tipos de artefactos derivados de dos clases distintas de especies. Existen, en primer lugar, procesos biológicos de producción (natural) que producen artefactos biológicos y después hacen su aparición los seres humanos. Mediante el empleo de un sugerente ejemplo, Boulding señala la existencia de una estrecha relación entre los artefactos humanos y los naturales:

Los artefactos humanos son especies al igual que los artefactos biológicos. El automóvil es una especie al igual que el caballo. Los artefactos humanos entran en relaciones ecológicas entre sí y con los artefactos biológicos. (Boulding, 1978, p. 122).

Además de exponer la existencia de los “artefectos biológicos” (que pueden ser las especies en sí mismas), Boulding atribuye a éstos, especialmente a los grandes mamíferos y pájaros, la capacidad de adquirir nuevos conocimientos a través de procesos de aprendizaje. En su argumentación subyace, pues, un intento de comprensión de los principios de la existencia asociados a diversos agentes económicos naturales. De hecho, en el marco de la denominada *learning economy* y en relación con la teoría de los sistemas de innovación, Lundvall & Johnson han incorporado las nociones de “conocimiento”, entendido como recurso (*stock*), y “aprendizaje”, entendido como proceso (flujo), para explicar los procesos de cambio continuo, tanto en los sistemas económicos como en los paradigmas tecno-económicos. La “economía del aprendizaje” se basa en cuatro formas de conocimiento (saber qué o *know-what*, saber por qué o *know-why*, saber cómo o *know-how*, y saber quién o *know-who*) complementadas por diferentes tipos de aprendizaje (tecnológico, organizacional, institucional, de políticas). Cabe añadir a este modelo económico una forma de conocimiento adicional (conocimiento del capital natural o *knowledge from natural capital*) y un proceso suplementario de aprendizaje (el aprendizaje del capital natural o *learning by natural capital*, tal y como ha sido propuesto por Segura (1999)). La aplicación de estos conceptos provenientes de la disciplina económica presenta implicaciones para la construcción de una teoría general del aprendizaje del capital natural. De esta forma, las tecnologías que tradicionalmente se basan en la “bioinspiración” o “biomimesis” se desarrollan a través de tres procesos diferenciados de “aprendizaje desde el capital natural”: “bio-inspiración”, “bio-mimética” y “bio-utilización”.

Bioinspiración, biomimética y bioutilización. Los tres tipos de aprendizaje desde el capital natural

En este apartado se analiza el proceso de aprendizaje a través del capital natural desde dos niveles: en primer lugar, a partir de tres ejemplos de tecnologías correspondientes a procesos de bioinspiración, biomimética y bioutilización. El método de análisis empleado incluye la revisión documental y la verificación del origen de cada producto, servicio o tecnología haciendo hincapié en el referente natural desde el que se desarrolla la patente correspondiente, las evaluaciones técnicas realizadas por autores diferentes al inventor, innovador o empresa, la declaración personal realizada por el inventor, innovador o la empresa creadora y, finalmente, la publicidad disponible acerca del producto. Este ejercicio está basado en el análisis de más de treinta tecnologías y se encuentra disponible en la tesis doctoral desarrollada por el autor (Gómez, 2015). En dicho estudio pueden encontrarse especificados -para cada uno de los casos- el producto, servicio o tecnología, la empresa que la ofrece en el mercado, el innovador y/o inventor correspondiente, una descripción de la tecnología y el aprendizaje específico del capital natural en el que se ha centrado.

El aeroplano: la bioinspiración como fuente de innovación tecnológica humana

La influencia de las tecnologías naturales en el desarrollo de tecnologías e innovaciones humanas puede evidenciarse plenamente a través del análisis de la evolución del diseño del aeroplano moderno, en tanto que incluyó procesos de bioinspiración y biomimética en diversas etapas de su trayectoria. Anderson (2002) señala que tanto la tecnología como el concepto moderno de aeroplano consisten esencialmente en una máquina con alas fijas, un fuselaje con cola y un mecanismo de propulsión separado. Los diseños iniciales de aeroplanos o de máquinas de volar estuvieron inspirados en la observación sistemática del vuelo de los pájaros y en la idea de imitarlos. La historia de los diseños de máquinas voladoras se remonta, cuando menos, al siglo XV con los diseños elaborados por Leonardo Da Vinci en el año de 1490; con los trabajos de Da Vinci se creó la idea de un avión con alas batientes, el ornitóptero, que se sostiene y avanza gracias a que sus alas ejecutan movimientos parecidos a los de las aves. Un momento decisivo para la consolidación de la tecnología del aeroplano se produjo con realización del primer vuelo tripulado y sostenido en el aire por parte de Otto Lilienthal en 1891, tras numerosos diseños, experimentos, pruebas y contribuciones técnicas a la aerodinámica. Este primer vuelo humano exitoso permitió comprobar que las

alas curvadas eran superiores a las alas planas gracias a los datos e información recopilados por Lilienthal, quien contribuyó además a la mejora en la comprensión de la aerodinámica por medio de los denominados “coeficientes aerodinámicos” o “tablas de Lilienthal”. La trayectoria de Lilienthal es una ilustración perfecta del alcance que puede tener la inspiración derivada de la naturaleza cuando ésta se complementa con habilidades y conocimientos de carácter técnico. La obra maestra de Lilienthal, *El vuelo de los pájaros como base de la aviación*, publicada en el año 1889, es un testimonio de la relación entre los estudios científicos del inventor y su intento por comprender el funcionamiento del vuelo en las aves con el propósito explícito de transferir ese conocimiento adquirido al diseño de una tecnología humana de vuelo. De hecho, ese mismo año produjo otros diseños derivados de estos estudios científicos que intentaban replicar el vuelo de las aves, tal y como queda evidenciado en sus modelos de ornitópteros. A este respecto, se considera que el diseño del ornitóptero denominado *Seagull* está basado en su detallado estudio de la gaviota. A través de un proceso de permanente retroalimentación entre sus datos, pruebas de vuelo y diseños produce, dos años después, el planeador *Derwitzer*. El trabajo de Lilienthal es representativo de los dilemas que, con frecuencia, ha tenido que afrontar el proceso de innovación, en la medida en que diseñó tecnologías de vuelo de alas batientes -ornitópteros- pero también tecnologías de alas fijas. En la actualidad, se asume que la tecnología más apropiada para el desarrollo del aeroplano fue la de alas fijas pero, paradójicamente, la convicción personal y las conclusiones extraídas de sus estudios llevaron a este diseñador alemán a sostener que los ornitópteros eran la tecnología más apropiada para el futuro de la aviación. Históricamente es innegable que el surgimiento de la tecnología del aeroplano tiene un origen bioinspirado, ya que sin la observación y el estudio sistemático del vuelo de las aves no habría sido posible el desarrollo del aeroplano. Pero la discusión acerca de la consolidación definitiva de la tecnología del aeroplano moderno plantea el interrogante de si esta tecnología puede considerarse como propiamente biomimética o no. Por una parte, se encuentran autores que plantean que el aeroplano es un aparato bioinspirado pero que no constituye un ejercicio biomimético. Entre éstos cabe destacar a Vogel (2000), quien demuestra que, precisamente, el diseño eficiente de ala fija constituye la característica que hace que el vuelo del aeroplano moderno no sea una copia de la tecnología natural del vuelo de las aves. Por lo que, para este autor, el aeroplano es un aparato bioinspirado pero no un ejercicio biomimético. Traer a consideración el caso de Lilienthal permite realizar un ejercicio de contrastación con respecto a este punto de vista, puesto que este inventor es uno de los pioneros de la tecnología de ala fija, solución que se diferencia claramente del vuelo de ala batiente de las aves. Podría afirmarse, por tanto, que con él comienza realmente la trayectoria tecnológica paralela, en la que los humanos no requieren de diseños biomiméticos para sus

desarrollos tecnológicos. Otros autores como Drack & Gebeshuber (2013) manifiestan que el trabajo de Lilienthal sirve como un buen ejemplo de biomimesis porque incluye aspectos tales como la abstracción, la transferencia y la aplicación del conocimiento generado desde modelos biológicos. Desde este punto de vista este ejemplo es considerado como representativo de la definición de biomimética¹ asumida por la Asociación de Ingenieros Alemanes (*Verein Deutscher Ingenieure*, VDI).

Precisamente, esta discusión confirma lo compleja que puede ser la distinción entre lo biomimético y lo bioinspirado, o la diferenciación entre las tecnologías biomiméticas y las que no lo son. En relación con ello, es un hecho, por ejemplo, que los diseños exitosos del aeroplano elaborados por los hermanos Wright no se basaron en la tecnología de alas batientes de las aves y, con ello, se demuestra una relación de bioinspiración entre la tecnología natural y la tecnología humana de vuelo. Pero es cierto, de igual modo, que el éxito de los hermanos Wright se debe en parte al uso de los coeficientes aerodinámicos contenidos en las tablas de Lilienthal. Y ello nos permite inferir cierta transferencia de conocimiento derivado del diseño natural para la resolución de los desafíos técnicos que afrontaban los diseñadores de aeroplanos. Por lo tanto, es indiscutible el origen bioinspirado de la tecnología humana de vuelo pero, al mismo tiempo, es discutible que se haya producido una relación biomimética plena con la tecnología natural. Los diseños posteriores de aeroplanos guardan una gran diferencia, en términos de sus características técnicas, respecto al vuelo de las aves. Esto implica que es necesario reconocer diferentes etapas en el desarrollo de esta tecnología, teniendo como punto de partida un proceso de bioinspiración (diseños de Da Vinci), para continuar con una fase de confluencia entre la bioinspiración y la biomimética (Otto Lilienthal & hermanos Wright), una fase posterior de separación radical entre las trayectorias tecnológicas (hermanos Wright y diseños posteriores) y, finalmente, concluir con una fase de biomimética deliberada en la que se intenta llevar a cabo una transferencia sistemática de conocimientos obtenidos del vuelo de diversas especies naturales tales como pájaros, moscas, libélulas, etc. No hay que olvidar tampoco que algunos científicos, siguiendo una estrategia de biomimética deliberada, continuaron, según Park & Yoon (2008), desarrollando la idea de Lilienthal de volar como lo hacen las aves.

El Eastgate Centre building. Arquitectura e ingeniería humana como emulación de los nidos de termita

El *Eastgate Centre* es un edificio construido en 1996 y ubicado en la ciudad de Harare (Zimbabwe) que sirve como centro comercial. Fue diseñado por el archi-

tecto Mick Pearce y desarrollado con un equipo de ingenieros de la empresa *Arup Associates*. No es un edificio convencional, pues está diseñado para conseguir que la temperatura en el interior de la construcción se mantenga estable frente a la temperatura externa, que fluctúa entre los 10°C y los 42°C. El edificio tiene un sistema de refrigeración pasiva que consiste básicamente en almacenar calor en las horas del día y ventilar en la noche, cuando la temperatura disminuye. Desde el punto de vista del diseño arquitectónico, el desempeño alcanzado por el *Eastgate Centre*, en términos de control térmico, se consigue a través de un diseño adecuado de los sistemas de flujo de aire y de superficie, lo que, según Baird (2001), permite la transferencia y almacenamiento del calor.

La idea de generar un sistema de refrigeración pasiva en la estructura del edificio se inspiró en la observación y estudio de los montículos de las termitas africanas (*Macrotermes michaelseni*) que consiguen autorregular la temperatura en el interior del nido. La centralidad de la inspiración basada en la naturaleza dentro de la trayectoria del diseñador M. Pearce se remonta al influjo ejercido por el libro titulado *Arquitectura sin arquitectos* de Bernard Rudofsky, escrito en los años sesenta. La lectura de esta obra le llevó a plantearse la idea de que la arquitectura bioclimática eficiente debería derivarse de principios orgánicos más que de principios mecanicistas (Tzonis *et al.*, 2001, p. 48). En ese sentido, la idea de construir un edificio autorregulado surgió en la década de los noventa, cuando el arquitecto, coincidiendo con la problemática a la que se enfrentaba de construir un edificio que fuera energéticamente eficiente para vivir en un clima sub-tropical, vio un documental de David Attenborough²:

Yo estaba viendo un documental de David Attenborough en la década de los 90 tomando un respiro de mi problema de diseño actual: ¿Cómo se diseña un edificio energéticamente eficiente en un clima sub-tropical, que también sea cómodo para vivir?... Attenborough estaba explicando cómo las termitas Nigerianas sobreviven en temperaturas extremas. Construyen sus casas -termiteros- para mantener la humedad y el calor (Pearce, 2013³).

Tras este proceso de bioinspiración, se dio inicio a una etapa de retroalimentación de tres años entre los diseños arquitectónicos de Pearce y los desarrollos técnicos proporcionados por los ingenieros mecánicos de la empresa *Ove Arup Association* de Londres. Éstos últimos, de acuerdo a lo indicado por Tzonis *et al.* (2001, p. 49), viabilizaron un diseño concreto mediante modelos computacionales que simulaban las condiciones de circulación del aire y temperatura a partir de la optimización de la sincronización de los ventiladores durante el día y la noche.

Esta tecnología exitosa de refrigeración que aprovecha los principios transferidos desde la naturaleza ha sido replicada en otras ocasiones. En el año 2001 se inauguró el *Portcullis House*, un edificio de oficinas para miembros del parla-

mento y personal en Westminster Londres (Reino Unido), cuyo funcionamiento se basa en el sistema utilizado en el edificio *Eastgate* al aprovechar las chimeneas como parte de un sistema de aire acondicionado sin alimentación que sirve para extraer el aire del edificio a través de los flujos y corrientes naturales. El *Eastgate Centre*, por tanto, ha sido considerado, por parte de diversos expertos, como un ejemplo de aplicación biomimética. De hecho, en los anales de la reunión número cuarenta de la Asociación Internacional para la Investigación del diseño Medio ambiental, *Environmental Design Research Association* (EDRA), se señala lo siguiente:

...una revisión más profunda revela que la forma del Eastgate surge de las necesidades de la vida diaria y está basada en el uso. La forma del edificio sirve para copiar los procesos naturales, no simplemente la estructura (Klein, 2009, p. 43).

Por el contrario, algunos analistas contemporáneos señalan que el edificio no reproduce el funcionamiento natural de los termiteros y, en consecuencia, no constituye un ejercicio propiamente biomimético; la razón de ello es que se entiende que, durante la fase de construcción del edificio se aplicaron los principios que se atribuían al funcionamiento de los termiteros pero los estudios más recientes acerca de su funcionamiento indican que el proceso de refrigeración del *Eastgate Centre* no constituye una reproducción fiel del mecanismo de enfriamiento natural de los montículos. Tal es, al menos, el planteamiento de los científicos Turner & Soar:

Durante los últimos años, hemos estado estudiando la estructura y función de la termiteros que inspiraron a Mick Pearce. En el proceso, hemos aprendido muchas cosas, entre ellos algo muy notable: el centro comercial Eastgate se inspira en una errónea concepción de cómo funcionan realmente los montículos de termitas. Esto no pretende ser una crítica, por supuesto. Pearce sólo estaba siguiendo las ideas dominantes de la época, y el resultado final es un edificio de éxito de todos modos (Turner & Soar, 2008, p. 1).

De ser cierto el argumento de estos autores para el caso concreto de la tecnología derivada de las termitas, se presenta la paradoja de que un ejercicio biomimético exitoso puede pasar a ser considerado sólo como un caso de bioinspiración debido a la obsolescencia del conocimiento científico que lo sustenta. Aun así, las virtudes del diseño siguen siendo admirables, tal como lo admiten Turner & Soar (2008) al manifestar que lo que hace al *Eastgate* más resaltante es el hecho de que combina muchas de las características del diseño de los montículos de termitas, especialmente su gran diversidad estructural.

Fundamentalmente, los modelos explicativos del funcionamiento del montículo de las termitas son dos: por un lado, el modelo denominado “efecto termo-

sifón” (*Thermosiphon mechanism*) y, por otro, el modelo denominado de “flujo inducido”, más conocido por parte de los arquitectos e ingenieros como “efecto chimenea” (*Stack effect*). Estos dos modelos corresponden a las dos interpretaciones reconocidas sobre el funcionamiento de los montículos de las termitas; una más convencional, asociada a los efectos de ventilación tipo chimenea, y otra contemporánea, que emplea como analogía el sistema pulmonar; la evaluación que se haga, por tanto, del carácter biomimético del *Eastgate* depende de cuál de estas dos interpretaciones se emplee para juzgarlo.

Siguiendo el análisis de Turner & Soar, el *Eastgate Centre* logra combinar esos dos modelos (que se basan en las analogías de la chimenea y del sistema pulmonar), logrando de manera eficiente mantener una temperatura interior estable sin requerir una planta de aire acondicionado suplementaria. En ese sentido, el edificio *Eastgate*, hasta el momento de su construcción, efectivamente representa un ejercicio biomimético. Sin embargo, es necesario reconsiderar esta consideración a la luz de los avances más recientes en la comprensión científica del funcionamiento de los montículos de termitas, en la medida en que son considerados como sistemas de ventilación pulmonar. Esto implica que la interpretación del rol funcional desempeñado por la chimenea en el termitero ha cambiado radicalmente al descubrirse que el aire capturado por la chimenea no cumple una función de regulación de la temperatura del nido o componente subterráneo. Si esta interpretación es correcta, el diseño del *Eastgate Centre* se basaba en la idea errónea de que la chimenea cumplía una función de captura de aire para el enfriamiento de la base inferior del termitero (el nivel subterráneo). Es decir, el sistema exitoso de enfriamiento que aprovecha tubos en la altura y la superficie para enfriar las secciones inferiores del edificio no equivale al diseño natural de enfriamiento empleado por las termitas; o lo que es lo mismo, el sistema de refrigeración pasiva como tecnología humana creada para el *Eastgate Centre* y otros edificios que adoptan dicha tecnología no estarían emulando el verdadero mecanismo usado por los termiteros (que, en realidad obedece a un modelo similar al de un sistema pulmonar).

En este caso, queda en evidencia la manera en la que el avance en el conocimiento científico básico puede modificar la evaluación del carácter biomimético conferido a una tecnología. Quienes consideraron a la tecnología humana de ventilación basada en el principio de la chimenea como un caso representativo de la biomimética estaban en lo correcto desde el punto de vista de los conocimientos disponibles en su tiempo. Pero también quienes señalan que, a tenor del conocimiento contemporáneo que la ciencia tiene de los termiteros, no debe considerarse la tecnología humana de enfriamiento como biomimética. Este es un ejemplo de cuán difícil es la clasificación de estas tecnologías, debido a que la frontera del conocimiento científico está permanentemente avanzando y genera modificaciones en los parámetros que permiten evaluar o interpretar las características de una

tecnología dada.

La bioutilización: un proceso de hibridación entre el ecosistema natural y el sistema económico

La bioutilización representa, en relación con la innovación, el tercer tipo de proceso de interacción entre los ecosistemas naturales y el sistema económico. Consiste en el aprovechamiento de un componente natural (que puede consistir en una molécula, una sustancia, un material, un organismo o población, o una función ecosistémica) con el propósito de integrarlo de manera funcional en una tecnología, bien o servicio desarrollado por los seres humanos. Agrupa diversas modalidades de adaptación o de integración que han sido identificados en la literatura especializada como bioderivación, bioadaptación, bioasistencia y bioextracción. Estas modalidades constituyen formas específicas de incorporación de elementos naturales que desempeñan un rol estratégico en los procesos económicos en los que se integran.

En este caso, analizamos un determinado servicio ecosistémico: la polinización, actividad esencial para el mantenimiento de la producción agrícola. Los polinizadores como las abejas, las mariposas, los pájaros y los murciélagos proveen sustanciales beneficios para el mantenimiento, la diversidad y la productividad de la agricultura. Un tercio de la producción de alimentos mundial depende, directa o indirectamente, de la polinización realizada por los insectos, tal y como lo señala Richards (1993). Aunque muchos de los cultivos de productos agrícolas son polinizados por el viento, otros requieren de la polinización realizada por insectos para mejorar la calidad o el rendimiento por hectárea. La productividad de algunos cultivos, como las almendras, depende sensiblemente de la polinización de los insectos y, especialmente, de la polinización de las abejas. En otros casos, la polinización provista por las abejas es importante porque afecta al tamaño, la forma y la calidad del fruto; según Gordon & Davis (2003), una gran variedad de cultivos dependen de un insecto como polinizador principal, de tal modo que el nivel de dependencia en algunos casos puede alcanzar un 80 o 100% (en los casos de la manzana, mango, cebollas, calabazas y melón).

La polinización supone la transferencia de la información genética entre las plantas a través del polen, substancia que es requerida para la reproducción sexual de éstas. En otras palabras, la polinización consiste en la fertilización de las plantas florecidas mediante la transferencia de polen llevada a cabo por distintos tipos de insectos (en especial, las abejas). Existen dos tipos de polinizadores: “silvestres y domesticados” (*wild and managed*). Los servicios de los polinizadores silvestres (naturales) no son comercializados en el mercado, por lo tanto su valor es subes-

timado o no se tiene en cuenta a nivel económico. Los insectos son el grupo más grande de polinizadores, siendo las abejas las que proporcionan aproximadamente 80% de toda la polinización por insectos (véase al respecto Robinson *et al.* (1989)).

El valor del servicio ecosistémico de la polinización, considerando su grado de interdependencia con la agricultura humana, ha sido demostrado ampliamente por diversos autores. El valor económico total del servicio de polinización prestado por los insectos para la producción económica agrícola mundial fue estimado por Pimentel (1997) en 200 billones de dólares. De igual forma, el estudio de Gallai *et al.* (2009) cifró este valor en 153 billones de euros, lo que representaba el 9.5% del valor de la producción agrícola mundial destinada para la alimentación humana en el año 2005.

Los valores no son comparables debido a que usan distintas metodologías. Se muestran a efectos ilustrativos del valor del servicio de polinización, pero no deben tomarse como una evaluación exacta. En Estados Unidos el valor económico de la polinización de las abejas fue estimado por Southwick & Southwick, (1992) en 6 billones de dólares. También Morse & Calderone (2000) estiman el aumento del valor anual de la producción agrícola atribuible a la polinización de la abeja en 14,6 billones de dólares. En un estudio más reciente, Losey & Vaughan (2006) estimaron que los polinizadores naturales -casi exclusivamente las abejas- pueden ser responsables de un equivalente a 3,07 mil millones de dólares de la producción agrícola de frutas y verduras en los Estados Unidos. Ha habido otros estudios centrados en otros países en los que se ha evaluado el valor de la polinización. Cabe destacar entre ellos, el trabajo de Carreck & Williams (1998), quienes estiman el valor de polinización de las abejas melíferas y los abejorros para los cultivos en el Reino Unido en 172,2 millones de libras, para cultivos al aire libre, y 29,8 millones de libras para los cultivos de invernadero. En Australia, Gibbs y Muihead (1998) estiman el valor de la polinización de las abejas en 1,2 billones de dólares y Gordon & Davis (2003) estiman que ese valor es de 1,7 billones de dólares australianos. De igual manera, el estudio de Gallai *et al.* (2009) estima el valor de la polinización de insectos para la Unión Europea (25 países) en 14,2 billones de euros.

Desde el punto de vista de los beneficios, la polinización no se limita al aumento de la productividad en la agricultura, también está asociada al denominado efecto de desbordamiento de la polinización o “*Spillover pollination*” expuesto por Morse & Calderone (2000). Este efecto se basa en el hecho de que la polinización beneficia tanto a la agricultura comercial como a la no comercial, sin existir retribución alguna por estos servicios. Desde el punto de los costos, se ha verificado una disminución gradual del servicio ecosistémico de la polinización. Las causas que cabe atribuir a esta tendencia son, entre otras, la pérdida de hábitat, frente

a la creciente urbanización de espacios naturales e incremento de la agricultura (debido a que los polinizadores requieren áreas naturales para anidación, reposo y forrajeo), el efecto negativo de parásitos y enfermedades y el uso intensivo de pesticidas. En el caso de los pesticidas, en los Estados Unidos las poblaciones naturales (silvestres) de las abejas están disminuyendo en las regiones agrícolas, de acuerdo a los datos proporcionados por Richards (1993).

Finalmente, resulta conveniente, una vez expuestos estos casos, resumir las lecciones que nos deja el estudio del desarrollo de tecnologías originadas del proceso de aprendizaje desde el capital natural:

- El empleo de conceptos provenientes de la biología y las “ciencias naturales” ha permitido el desarrollo de metáforas, herramientas analíticas y aplicaciones en áreas tales como la teoría de las organizaciones o el *management*, y representan un gran potencial en relación con las aplicaciones teóricas y aplicadas potenciales que pueden desarrollarse a partir de ellos. No obstante, aún falta mucho camino por recorrer en términos de comprensión precisa de los procesos y fenómenos de aprendizaje (y, por tanto, de innovación) que llevan a cabo las organizaciones en la naturaleza.
- Existen tres tipos de aprendizaje desde la naturaleza que caracterizan el proceso de transferencia de conocimiento tecnológico desde los ecosistemas naturales hasta el sistema económico humano: la bioinspiración, al biomimética y la bioutilización.
- El uso de conceptos provenientes de la biología y otras disciplinas afines a las “ciencias naturales” ha superado la dimensión metafórica, para pasar a desembocar en una herramienta descriptiva, analítica y de aplicación sistemática en lo relativo a la innovación.

NOTAS

¹ Biónica (o biomimética) es la combinación de la cooperación interdisciplinar entre la biología y la tecnología con el objetivo de abstraer, transferir y aplicar del conocimiento obtenido de los modelos biológicos para resolver problemas técnicos (VDI 6220, Draft 2011).

² David Attenborough, documental sobre las termitas. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=xGaT0B__2DM

³ David Parr es el editor de nuevos medios de la Organización *Friends of Earth*. Página Web: http://www.foe.co.uk/news/eastgate_

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, J. D. (2002). *The airplane, a history of its technology*. Reston: AIAA.
- BAIRD, G. (2003). *The Architectural Expression of Environmental Control Systems*. London: Taylor & Francis.
- BAR-COHEN, Y. (2005). *Biomimetics: biologically inspired technologies*. Boca Ratón: CRC Press.
- BASALLA, G. (1991). *La evolución de la tecnología*. Barcelona: Crítica.
- BHUSHAN, B. (2009). Biomimetics: lessons from nature—an overview. *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 367, 1445–1486.
- BONSER, R. H. (2006). Patented biologically-inspired technological innovations: a twenty year view. *Journal of bionic engineering*, 3(1), 39-41.
- BOULDING, K. E. (1981). *Ecodynamics: a new theory of societal evolution*. London: Sage.
- CARPI, A., & BREBBIA, C. A. (Eds.). (2010). *Design & Nature V: Comparing design in nature with science and engineering* (Vol. 5). Southampton: WIT Press.
- CARRECK, N., & WILLIAMS, I. (1998). The economic value of bees in the UK. *Bee world*, 79(3), 115-123.
- COOPER, S. M., & GINNETT, T. F. (1998). Spines protect plants against browsing by small climbing mammals. *Oecologia*, 113(2), 219-221.
- DE GROOT, R. S., WILSON, M. A., & BOUMANS, R. M. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*, 41(3), 393-408.
- DRACK, M., & GEBESHUBER, I. C. (2013). Comment on “Innovation through imitation: biomimetic, bioinspired and biokleptic research” by AE Rawlings, JP Bramble and SS Staniland, *Soft Matter*, 2012, 8, 6675. *Soft Matter*, 9(7), 2338-2340.
- GALLAI, N., SALLES, J. M., SETTELE, J., & VAISSIÈRE, B. E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological economics*, 68(3), 810-821.
- GIBBS, D. M., & MUIRHEAD, I. F. (1998). *The economic value and environmental impact of the Australian beekeeping industry*. A report prepared for the Australian Beekeeping Industry, 30.
- GLIDDEN, J. (1874). Patente n° 157124 A. Estados Unidos.
- GÓMEZ, A. P. (2015). *Desarrollo sostenible, aprendizaje del capital natural y discontinuidad tecnológica* (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).
- GORDON, J., & DAVIS, L. (2003). Valuing honeybee pollination. *Rural Industries Research and Development Corporation*, Canberra, 36.
- GRUBB, P. J. (1992). Positive distrust in simplicity--lessons from plant defenses and from competition among plants and among animals. *Journal of ecology*, 80, 585-610.
- HANKS, T., & GERHARD, S. (2012). The Concept of Biomimicry and Bioinspiration in Chemistry. En Swiegers, G. (Ed.). *Bioinspiration and biomimicry in Chemistry Reverse-Engineering Nature*. New York: Wiley.
- HORNBECK, R. (2010). Barbed wire: Property rights and agricultural development. *The Quarterly Journal of Economics*, 125(2), 767-810.
- JIMÉNEZ, C. N., & CASTELLANOS, O. F. (2009, August). Exploring the use of biological metaphor upon Technology Management research within the new paradigm of ongoing change. In *Management of Engineering & Technology*, 2009. PICMET 2009. Portland Interna-

- tional Conference on (pp. 37-46). IEEE.
- KELLY, M. (1868). Patente n° 503268 A. Estados Unidos.
- KLEIN, L. (2009). A Phenomenological Interpretation of Biomimicry in Two Sustainable Designs. *EDRA*, 40, 39-47.
- LEWIN, R. (1989). *Evolución humana*. Navarra: Salvat.
- LEPORA, N. F., VERSCHURE, P., & PRESCOTT, T. J. (2013). The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration & biomimetics*, 8(1), 013001.
- LOSEY, J. E., & VAUGHAN, M. (2006). The economic value of ecological services provided by insects. *Bioscience*, 56(4), 311-323.
- LUNDVALL, B. (2004). The economics of knowledge and learning. In Christensen, J. L., & Lundvall, B. (Eds.). *Product innovation, interactive learning and economic performance* (pp. 21-42). London: Emerald Group Publishing Limited.
- MARTÍN-PALMA, R. J., & LAKHTAKIA, A. (2011). *Bioinspiration, Biomimetics and Bioreplication*. Bellingham: SPIE.
- MORSE, R. A., & CALDERONE, N. W. (2000). The value of honey bees as pollinators of US crops in 2000. *Bee culture*, 128(3), 1-15.
- NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING (2007). *Frontiers of engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2006 Symposium*. Washington: The National Academies Press.
- PARK, J. H., & YOON, K. J. (2008). Designing a biomimetic ornithopter capable of sustained and controlled flight. *Journal of Bionic Engineering*, 5(1), 39-47.
- PEARCE, M. (2013). *The Eastgate Centre in Harare—a termite mound in disguise*. David Parr, Entrevistador. http://www.foe.co.uk/news/eastgate_centre_harare_termite_mound_41325.
- PIMENTEL, D., WILSON, C., MCCULLUM, C., HUANG, R., DWEN, P., FLACK, J. & CLIFF, B. (1997). Economic and environmental benefits of biodiversity. *BioScience*, 47(11), 747-757.
- RAWLINGS, A. E., BRAMBLE, J. P., & STANILAND, S. S. (2012). Innovation through imitation: biomimetic, bioinspired and biokleptic research. *Soft Matter*, 8(25), 6675-6679.
- SCHATTEN, M., & ŽUGAJ, M. (2011). Biomimetics in Modern Organizations—Laws or Metaphors? *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 9(1), 39-55.
- REED, E. J., KLUMB, L., KOOBATIAN, M., & VINEY, C. (2009). Biomimicry as a route to new materials: what kinds of lessons are useful? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1571-1585.
- RICHARDS, K. W. (1993). Non-Apis bees as crop pollinators. *Revue suisse de Zoologie*, 100(4), 807-822.
- ROBINSON, W. S., NOWOGRODZKI, R., & MORSE, R. A. (1989). The value of honey bees as pollinators of US crops. *Am. Bee J.* 128, 1-15.
- SCHMITT, O. H. (1969, August). *Some interesting and useful biomimetic transforms*. In Third Int. Biophysics Congress (Vol. 1069, p. 197).
- SEGURA, O. (1999). *Systems of innovation and learning from natural capital*. In DRUID's summer conference on innovation system, industrial dynamics and innovation policy. Rebild, Denmark.
- SOUTHWICK, E. E., & SOUTHWICK, L. (1992). Estimating the economic value of honey bees (Hymenoptera Apidae) as agricultural pollinators in the United States. *Journal of Economic Entomology*, 85(3), 621-633.
- TURNER, J. S., & SOAR, R. C. (2008, May). *Beyond biomimicry: What termites can tell us*

- about realizing the living building*. In First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction at Loughborough University.
- TZONIS, A., LEFAIVRE, L., & STAGNO, B. (Eds.). (2001). *Tropical architecture: critical regionalism in the age of globalization*. Chichester: Wiley-Academy.
- VINCENT, J. F., BOGATYREVA, O. A., BOGATYREV, N. R., BOWYER, A., & PAHL, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- VOGEL, S., & GAVALDÁ, J. (2000). *Ancas y palancas: mecánica natural y mecánica humana*. Barcelona: Tusquets.
- GLEICH, A., PADE, C., PETSCHOW, U., & PISSARSKOI, E. (2010). *Potentials and trends in biomimetics*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- WOROBEL, A., & FLÄMIG, H. (2014). Towards a methodology for bio-inspired programme management design. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 119, 877-886.
- YOUNG, T. P., & OKELLO, B. D. (1998). Relaxation of an induced defense after exclusion of herbivores: spines on *Acacia drepanolobium*. *Oecologia*, 115(4), 508-513.