



XIV JORNADAS DE ECONOMÍA CRÍTICA

Perspectivas económicas alternativas

Valladolid, 4 y 5 de septiembre de 2014

Los procesos de aprendizaje desde el capital natural y la contribución de la naturaleza al proceso de innovación

Álvaro Pío Gómez Olaya

Universidad del Valle, Cali – Colombia

LOS PROCESOS DE APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL Y LA CONTRIBUCIÓN DE LA NATURALEZA AL PROCESO DE INNOVACIÓN

Álvaro Pío Gómez Olaya¹

Resumen

En esta comunicación, se plantea que existe un hecho económico fundamental que no ha sido suficientemente analizado en el ámbito del Desarrollo Sostenible: la relación entre el capital natural y el proceso de innovación, a través de la producción de tecnologías, bienes y servicios de origen natural aprovechados por el sistema económico. El capital natural es una valiosa (y en muchos casos, imprescindible) fuente de información y conocimientos de naturaleza tecnológica que han sido aprovechados por el sistema económico a través de procesos de aprendizaje.

Es necesario plantear de manera diferente la contribución de los ecosistemas naturales, al ser considerados como fuente de innovación tecnológica, y ello implica asumir que los ecosistemas son “agentes” susceptibles de contribuir, inspirar, o producir innovaciones tecnológicas, lo cual constituye un aporte de la naturaleza al proceso humano de innovación el cual debe ser considerado de manera apropiada en los marcos explicativos de la disciplina económica, pues el no reconocimiento de esta propiedad básica del capital natural implica una subestimación tanto de los beneficios asociados a la utilización de las tecnologías naturales, como de los costos derivados de la destrucción de los ecosistemas, y con ello de sus posibilidades de ofrecer soluciones tecnológicas.

La comunicación plantea una reflexión que tiene contrapartidas tanto en el plano teórico (problemas de especificación en los modelos de Desarrollo Sostenible) como en el plano de la política económica (¿Qué tipo de políticas económicas, instrumentos, incentivos son apropiados para mantener los procesos de innovación natural?).

El texto se divide en 3 apartados. El primero aborda el análisis de la relación existente entre las tecnologías naturales y las tecnologías humanas, desde el punto de vista de la economía y de otras disciplinas. En el segundo se clasifican las tecnologías humanas basadas en la naturaleza en tres tipos de procesos de aprendizaje: bioinspiración, biomimética y bioutilización. En el tercero se plantean conceptos útiles en la construcción de una comprensión adecuada del proceso de aprendizaje desde el capital natural: La teoría de los sistemas de innovación, los aportes pioneros de Kenneth Boulding y una revisión del concepto de “funciones ecosistémicas”, son propuestos como elementos pertinentes para dar cuenta del proceso de aprendizaje desde el

¹ Profesor Universidad del Valle, Cali – Colombia. Vice-Decano Académico Facultad de Ciencias de la Administración – Estudiante de Doctorado Departamento de Economía Aplicada III – Universidad Complutense de Madrid. Correo electrónico: alvaropiogomez@gmail.com

capital natural que se genera a través de la interacción entre las tecnologías naturales y las humanas.

Palabras clave: Desarrollo Sostenible - Capital Natural - Servicios Ecosistémicos. - Innovación.

Clasificación JEL: Q2 Recursos Renovables y Conservación; Medio Ambiente

1. Tecnologías naturales e innovación humana

En la actualidad existe una intensa reflexión alrededor de la importancia que tiene la naturaleza como fuente de innovación humana, en disciplinas científicas tales como la física, la ingeniería, la biomecánica, la biología, la química (entre otras) la cual no tiene –aún- contrapartida al interior de la disciplina económica.

Dicha reflexión tiene como motivación esencial el análisis de tecnologías, bienes y servicios que tiene como factor común el uso de la naturaleza como fuente de inspiración, como referente para el diseño, o como insumo tecnológico: desde productos y tecnologías ampliamente conocidos tales como el Velcro®, o el aeroplano moderno, pasando por el tren bala japonés Shinkansen, la Pintura Lotusan®, el sistema de embalaje biodegradable a base de hongos Mycobond®, un conjunto de medicamentos como Zocor® (Simvastatina, Medicamento para el control del colesterol), Byetta® (Medicamento inyectable para el control de diabetes mellitus tipo 2), o el Agente Anticancerígeno Yondelis® (Trabectedina). Estas tecnologías han impactado áreas tales como la generación de energía (las Turbinas de viento Whalepower®), la arquitectura (el Edificio Eastgate Centre en Harare-Zimbawe o la arquitectura de Gaudí), entre muchos otros, los cuales han sido reseñados en diversos estudios en los que se presentan y describen las tecnologías humanas basadas en tecnologías naturales correspondientes a una gran diversidad de campos tales como la robótica, la nanotecnología, la medicina, los nuevos materiales, la microelectrónica, la arquitectura, la biomecánica, la bioremediación, los biopolímeros, la cibernética, la inteligencia artificial (Bar-Cohen 2006, National Academy of Engineering 2007, Bhushan 2009, Von Gleich et al 2009, Carpi y Brebbia 2010, Martin 2011, Reed et al 2009; entre otros).

Este proceso de interdependencia entre tecnologías existentes en la naturaleza y tecnologías humanas consiste, básicamente, en la transferencia de información, principios naturales, o materiales, para crear productos, servicios o tecnologías, aprovechando la capacidad que tienen los sistemas biológicos, los ecosistemas, de llevar a cabo funciones muy complejas con resultados óptimos. El estudio sistemático del funcionamiento de estos sistemas biológicos por parte de científicos en distintas disciplinas y de las 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 como modelo o fuente de innovación. La interacción entre tecnologías provenientes de la naturaleza y los procesos productivos ha recibido, en general, la denominación de “biomimética”, como campo de carácter amplio que incluye diversas denominaciones relacionadas (bioinspiración, biomimesis, biónica, entre otras). Como campo de investigación, la biomimética está experimentando un auge representado por su rápido crecimiento en las últimas décadas. El análisis bibliométrico de Lepora et al (2013) muestra que esta área de investigación ha duplicado su tamaño cada 2-3 años desde mediados de los noventa y ha producido casi 3000 publicaciones por año. Adicionalmente, el aporte a la innovación tecnológica de la biomimética 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 de 1985 a 2005 encontró que el número de patentes que se basan en fundamentos biomiméticos ha crecido, en términos proporcionales, más rápido que el número total de patentes. En la misma línea, el estudio de Von Gleich et al. (2009: 117) muestra que a los países que lideran las aplicaciones de patentes en este campo son los Estados Unidos de Norteamérica, Japón, China y Alemania.

Las innovaciones humanas (bienes, servicios y tecnologías) que se basan en la transferencia de ideas, procesos, estrategias, materiales, tecnologías provenientes de los sistemas biológicos, se producen a través de diferentes tipos de procedimientos, que pueden asumirse como modalidades diferentes de apropiación humana (bioinspiración, biomimética, bioextracción, bioderivación, bio -asistencia, entre otros) sobre los cuáles surgen algunos interrogantes relevantes. En tal sentido, vale la pena preguntarse acerca de la diferenciación entre estas modalidades, lo cual nos conduce a la necesidad de contar con definiciones precisas y una delimitación que permita comprender los diversos grados de dependencia que las tecnologías humanas tienen respecto de las tecnologías naturales.

Respecto de las definiciones precisas, aparecen con el aporte de Otto Schmitt en el año de 1969, quien acuñó el término biomimética integrando los conceptos de “bios”, que significa vida, y “mimesis”, que significa imitar (Schmitt 1969), y continúan con una larga lista de aportes, de los cuales se reseñan algunos de los más relevantes con fines de permitir una comparación, en la tabla 1. En ella, se puede constatar la equivalencia entre las nociones de biónica y biomimética y la gran similitud de éstos con las definiciones correspondientes a la bioinspiración.

Las dificultades que entrañan los intentos de diferenciación clara entre los conceptos de bioinspiración, biomimética y los demás conceptos relacionados, se reflejan con precisión por Hanks y 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 y Swiegers 2012: 2).

Las motivaciones 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 y Gebeshuber (2013). Algunas de las modalidades estrechamente relacionadas con la biomimética suelen solaparse y pueden ser fácilmente confundidas, especialmente cuando se abordan las innovaciones relacionadas con el aprovechamiento de individuos, poblaciones, materiales, principios activos y sustancias naturales (relacionados al final de la tabla 1) con las nociones de bioderivación, bioadaptación, bioasistencia, bioextracción y bioutilización. El campo más comprehensivo, más amplio, es el de la bioinspiración, la cual consiste en obtener influencia o información desde fuentes naturales para crear bienes, servicios, tecnologías, procesos; tal vez es el más difícil de definir con precisión puesto que tiene una superposición muy amplia con la biomimética. Algunos autores señalan que la amplitud de la definición del concepto, indicaría que la biomimética estaría incluida en el concepto más general de bioinspiración, con lo cual la biomimética sería un caso especial de la bioinspiración en el sentido de que el desarrollo de todo producto biomimético (transferencia) requiere previamente de un proceso de bioinspiración (influencia, información). De otra parte, la bioutilización, la cual consiste –para efectos de este trabajo– en el aprovechamiento de un componente natural (dicho componente natural 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 humanos, puede agrupar las nociones de bioderivación, bioadaptación, bioasistencia y bioextracción, puesto que cada uno de éstos representa una forma específica de incorporación de un elemento natural en bienes, servicios o tecnologías humanas.

Tabla 1. Biomimética, bioinspiración, bioutilización y definiciones relacionadas.

Autor(es) / Año	Definición (Fuente)
J. E. Steele / 1958–60	"La biónica explora sistemas cuyas funciones son modeladas a partir de los sistemas naturales, o cuyas propiedades se asemejan a las de los sistemas naturales, o son análogas a ellos " (Gérardin 1972: 11)
L. P. Kraismet / 1967 [publicación inicial 1962]	"La biónica es, pues, la ciencia que investiga los procesos y métodos biológicos con el propósito de aplicar los resultados al mejoramiento de las máquinas y sistemas antiguos para crear máquinas y sistemas más novedosos. También podría decir que se trata de la ciencia de los sistemas que demuestran características similares a las de los organismos vivos". (Kraismet 1967: 12)
J. F. V. Vincent et al. / 2006	"La biomimética (la cual debe entenderse como sinónimo de "biomimesis", "Biomimetismo", "biónica", "biognosis", "diseño inspirado biológicamente", y palabras o frases similares que implican la copia, adaptación o derivación desde la biología) es un estudio relativamente reciente dedicado al uso práctico de mecanismos y funciones de la ciencia biológica en la ingeniería, el diseño, la química, la electrónica, entre otras". (Vincent et al. 2006: 471)
Y. Bar-Cohen / 2006	"La biomimética es el término para designar al campo de estudio que involucra copiar, imitar y aprender de la biología ... el término biomimética en sí mismo se deriva de bios, que significa vida, y mimesis, que significa imitar. Esta nueva ciencia representa el estudio y la imitación de los métodos, diseños y procesos de la naturaleza". (Bar-Cohen 2006: 2)
Benyus/1998	"La biomimesis [biomimicry] (de bios, que significa vida, y mimesis, es decir, imitar) es una nueva ciencia que estudia la mejores ideas de la naturaleza y luego imita estos diseños y/o procesos para resolver problemas humanos. (Benyus 1998: 2)

Hank y Swieger /2012	"La bioinspiración se describe como la comprensión de los aspectos fundamentales de alguna actividad biológica para reconstruirla de otra manera". (Hank y Swieger 2012: 2)
Committee on Biomolecular Materials and Processes, National Research Council / 2009	"el conocimiento de que una tarea puede ser realizada por un sistema vivo, puede inspirar a los científicos a desarrollar un sistema sintético que lleve a cabo la misma función, incluso si el sistema utiliza un esquema sintético bastante diferente del empleado por el sistema biológico." (Committee on Biomolecular Materials and Processes, National Research Council 2008: 19)
Rawlings et al /2012	"La bioinspiración consiste en obtener influencia o información de lo natural para crear procesos o productos" (Rawlings et al 2012: 6676)
Hank y Swieger /2012	"... denominaremos bioutilización al uso directo de materiales naturales; nos referiremos a la bioextracción cuando el componente natural de interés es cosechado y diluido para propósitos humanos, tal como ocurre con los productos naturales que son usados en productos farmacéuticos... Los materiales bioderivados son el resultado de la modificación de la oferta de la naturaleza para proporcionar un desempeño mejorado". (Hank y Swieger 2012: 5)
Harrington/ 2012	"La Bio-adaptación consiste en alinear el propósito fundamental de un organismo para satisfacer una necesidad real de las personas en este planeta. La agricultura es un ejemplo de Bio-adaptación". (Hummels 2012:116)
Committee on Biomolecular Materials and Processes, National Research Council / 2010	" Bioderivación . Esta estrategia implica el uso de un biomaterial existente junto con un material artificial para crear un híbrido. Un ejemplo destacado es la incorporación de proteínas de origen biológico en conjuntos poliméricos para la entrega de fármacos." (Committee on Biomolecular Materials and Processes, National Research Council 2008: 19)
Benyus/2006	"El aprovechamiento a través de la adaptación se refiere a la domesticación del productor. La domesticación de organismos para que nos ayuden en el desarrollo de productos también se conoce como " Bio-Asistencia " (The natural Edge Project 2007: 83)

Fuente. Elaboración del autor basada en Von Gleich et al (2009)

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 el hecho evolutivo de que existen artefactos -un producto humano- cuyos antecesores no fueron fabricados por otro ser humano, a los cuales denomina "Naturfactos", en referencia a bienes económicos originados en tecnologías naturales, las cuales sirven de antecesor evolutivo, de referente a bienes y tecnologías humanas:

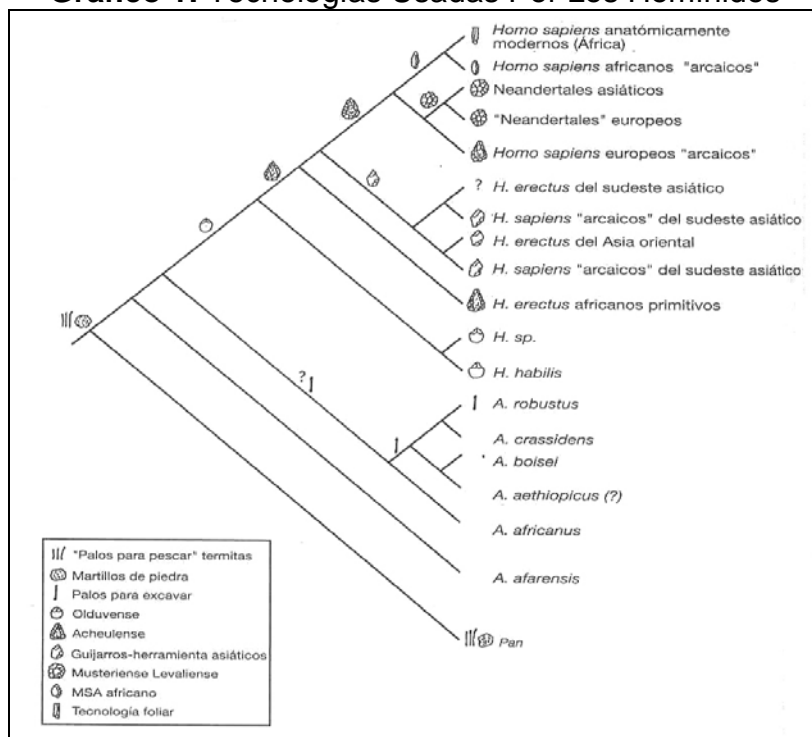
"Suponiendo que cada nuevo artefacto se basa en cierta medida en un artefacto anterior afín, debemos afrontar la cuestión del origen de la primera cosa creada. ¿Cuál fue su modelo? Aunque no había artefactos anteriores por entonces, una multitud de *naturfactos* pudieron servir de modelo para iniciar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

El propio 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. Dada la pertinencia, se sugiere la adopción del concepto "naturfacto" como representativo del conjunto de bienes, servicios y tecnologías derivadas de las

interacciones entre las tecnologías humanas y las tecnologías naturales, del proceso que denominamos “aprendizaje desde el capital natural”, como una aproximación válida, desde el punto de vista de la disciplina económica, hacia las tres modalidades en las que (según las disciplinas señaladas antes) se produce el proceso (bioinspiración, biomimética, bioutilización).

Acerca del origen histórico de los naturfactos, es importante señalar que su éste se remonta –incluso- a la prehistoria. Tal y como lo muestra Lewin (1994) el uso de tecnologías que emplean elementos naturales adaptados para ser aprovechados en tareas específicas se remonta hasta las especies de homínidos precursores del homo sapiens sapiens, como lo muestra el gráfico 1 en el que se presentan algunas de las tecnologías empleadas por los homínidos prehistóricos, lo cual indica claramente que el aprovechamiento humano de las tecnologías naturales, para la producción de naturfactos, que ha permitido al ser humano obtener beneficios de los avances tecnológicos naturales, ha acompañado a los seres humanos durante todo el devenir de su desarrollo económico y tecnológico, contribuyendo a mejorar nuestro desempeño tecnológico a partir de la adopción de técnicas existentes en la naturaleza. Las aproximaciones al proceso de aprendizaje desde el capital natural tanto desde el punto de vista de la economía, como de las demás disciplinas señaladas en este texto, muestran que existe una conexión verificable entre los productos generados en la naturaleza y los artefactos o productos fabricados por los seres humanos. Esencialmente, la tecnología humana ha tomado prestadas ideas técnicas y herramientas directamente de la naturaleza; y una manera apropiada de entenderlo podría ser la de asumir que el capital natural posee la capacidad de producir bienes, servicios y tecnologías que son transformadas mediante las formas de capital producidas por los humanos (capital físico, capital humano, etc.).

Gráfico 1: Tecnologías Usadas Por Los Homínidos



Fuente: Lewin (1994)

En cuanto a la definición de la noción de “tecnologías naturales” o “artefactos naturales”, es pertinente la referencia al artefacto como unidad de análisis tecnológico básica, el cual es definido por Basalla de la siguiente manera:

"En cada momento, la tecnología está íntimamente ligada a lo físico y lo material; los artefactos son tanto el medio como el fin de la tecnología. El objeto físico tridimensional es tanto una expresión de la tecnología como una pintura o una escultura expresión de las artes visuales. El artefacto es un producto del intelecto y la imaginación humana y, como con cualquier obra de arte, nunca puede sustituirse plenamente por una descripción verbal." (Basalla 1991: 51).

Puesto que el artefacto, se define a partir de tres propiedades (en primer lugar, es un objeto físico; en segundo lugar, es producido por los humanos, y en tercer lugar, se produce empleando recursos como el intelecto y la imaginación, además de los materiales necesarios), podríamos definir a las tecnologías naturales, por analogía, como el conjunto de elementos provenientes de los ecosistemas naturales, que son producidos por “agentes naturales”, empleando recursos propios de éstos agentes naturales, los cuáles –en principio- deben suponerse diferentes de los recursos empleados por los agentes humanos (intelecto e imaginación). Una diferencia esencial entre las tecnologías humanas y las naturales es el carácter teleológico y el comportamiento consciente de las creaciones humanas, dos características –en general- no imputables a la naturaleza.

Además de contar con una definición, 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 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, 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, los Análogos musculares, los materiales compuestos, materiales inteligentes, robots manipuladores, vehículos que caminan, entre otras) 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: 301).

2. Bioinspiración, biomimética y bioutilización: los tres tipos de aprendizaje desde el capital natural

En este apartado se analiza el proceso de aprendizaje desde el capital natural en dos niveles: en primer lugar, a partir de cuatro ejemplos de naturfactos correspondientes a procesos de bioinspiración, biomimética y bioutilización, para finalmente ilustrar un caso de superposición entre los tres. En segundo lugar, se presenta un diagrama de Venn que permite la clasificación de los naturfactos, separando aquellos casos en los que se asocian a un tipo de aprendizaje, de aquellos en los que se solapan dos o tres modalidades. La tabla 2 resume el método de análisis empleado, el cual incluye la revisión documental y la verificación del origen de cada producto, servicio o tecnología basado en un referente natural en 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, al igual que la publicidad disponible acerca del producto (adicionalmente se ha documentado cada ejemplo con imágenes y videos).

Tabla 2.

FUENTE DOCUMENTAL	DESCRIPCIÓN	ACTOR
PATENTE	Derecho de Propiedad Intelectual	Inventor
ANÁLISIS TÉCNICO	Artículo-Libro Publicación Científica-Página Web científica o analítica	Inventor, Creador, Autor, Analistas, Críticos.
DECLARACIÓN PERSONAL	Entrevista, Página Web, Artículo de Prensa, Publicación Científica	Inventor, Creador, Autor.
PRENSA – MEDIOS DE COMUNICACIÓN	Artículo de prensa	Inventor, Creador, Autor, Analistas, Divulgadores.
PUBLICIDAD	Página Web (Empresa, grupo de investigación, Creador, inventor)	Inventor, Creador, Autor, Analistas.
VIDEO	Película (en diversos formatos)	Inventor, Creador, Autor, Empresa

Fuente. Elaboración del autor

Este ejercicio está basado en el análisis de más de cincuenta naturfactos, los cuales se encuentran listados en la tabla 3, en la cual se especifican para cada caso: 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 desde el capital natural del cual se benefició.

Tabla 3. Tecnologías basadas en el aprendizaje desde el capital natural

Producto - servicio - tecnología	Empresa - Innovador - Inventor	Descripción de la tecnología	Aprendizaje desde el capital natural
Baleen Filters	Baleen Filters	Sistema de filtración de agua	Filtración de agua por medio de las barbas en algunas especies de ballenas.
Eucerin AQUAporin	Beiesdorf	Crema hidratante para la piel	Uso de las acuaporinas (sustancias encargadas de transportar el agua a través de las membranas)

			celulares).
Joinlox	Joinlock Pty. Ltd.	Método para sellar mecánicamente piezas, materiales, estructuras entre sí	Adherencia de las almejas y otras conchas marinas a las rocas
PAX Scientific	PAX Scientific	Mezcladores, ventiladores, turbinas para equipos industriales	Movimiento en espiral observados en los fluidos naturales
Platelet Technology™ leak sealer	Brinker	Material para sellar de fugas	Detección y control del sangrado en una herida por medio de las plaquetas (trombocitos).
Aeroplano	Otto Lilienthal y Hermanos Wright	Vehículo capaz de navegar por el aire, provisto de alas fijas e impulsado por uno o más motores	Vuelo de las aves
REGEN Energy Management Solution	REGEN Energy	Controladores para optimizar el uso de electricidad	Comunicación y coordinación de los enjambres de abejas "la lógica del enjambre".
Solar Sailor	SolarSailor	Paneles solares para vehículos marinos	Captación de radiación solar a través de las alas por parte de algunas especies de insectos (libélula).
Speedo Fastskin®	Speedo	Trajes de baño	Natación aerodinámica empleando dentículos dérmicos en la piel (tiburón).
Vitalis PET bottle	Logoplaste Innovation Lab	Botellas PET más resistentes y ligeras	Crecimiento en espiral de las fibras a lo largo del Pino de corteza blanca
Sierra para cortar madera	Joseph Buford Cox (Oregon)	Herramienta que sirve para cortar madera e incluso otros materiales	Forma (mandíbula) y función (corte de madera) de las larvas de los escarabajos (Ergates spiculatus)
BioStream	BioPower Systems Pty Ltd.	Generación de energía derivada de las corrientes marinas	Movimiento de la aleta en ciertas especies de peces (delfín, atún, tiburón entre otros)
Erlus lotus	Erlus	Tejas de arcilla autolimpiantes	Estructura de microrelieve de la hoja del loto sagrado
Eastgate Centre building	Arquitecto Mick Pearce en conjunto con Arup Associates	Centro comercial con refrigeración natural ubicado en Harare, Zimbabwe	Diseño de los montículos de las termitas africanas (Macrotermes michaelseni)
ORNILUX	Arnold Glas	Vidrio para reducir de la colisión de aves en las ventanas	Reflectancia de las telarañas de algunas especies de arañas
Lotusan Paint	Sto Corp	Recubrimiento de pintura autolimpiante	Estructura de microrelieve de la hoja del loto sagrado
Morphotex fibras	Teijin Fibers Limited	Fibras y tejidos de colores sin tintes químicos (sin pigmentos)	Cambio de color en las alas de la mariposa Morpho a partir de la estructura de sus alas
Shinkansen Train	Japan Railways Group	Tren de alta velocidad menos ruidoso	Diseño aerodinámico del pico del pájaro martin pescador (alcedo atthis) y vuelo silencioso de los búhos
Phillips Head Protection System	Phillips helmets	Cascos de protección con membrana de lubricación	Sistema de protección del cráneo humano utilizando membrana exterior como elemento reductor de daños
Vortex Generator	Watreco	Tecnología para purificación de agua	Estabilidad dinámica de la trucha cuando nada contra la corriente
Whalepower	WhalePower	Turbinas de viento con anatomía de aleta de ballena	Protuberancias en las aletas de las ballenas jorobadas
Velcro	Velcro USA Inc	Sistema de cierre y adhesión	Adherencia de los cardos Arctium
Biomatrica SampleMatrix®	Biomatrica®, Inc.	Almacenamiento y manipulación de muestras biológicas sin necesidad de refrigeración	Principio de anhidrobiosis o capacidad de vivir sin agua (artemia, y tardígrados)
Cinta de gecko	Universidad de Manchester	Cinta adhesiva	Fuerza de adhesión de las patas del gecko
Sycamore	Sycamore Technology	Ventilador de techo	Movimiento aerodinámico de la semilla del árbol del sicomoro al caer
Stabilitech vaccine stabilization technology	Stabilitech Ltd.	Almacenamiento y manipulación de vacunas y biofármacos sin necesidad de refrigeración	Principio de anhidrobiosis o capacidad de vivir sin agua (artemia, y tardígrados)
Norian SRS	Cement Norian	Cemento de secado rápido en huesos fracturado quirúrgicamente por inyección	Crecimiento de los esqueletos de los corales en la formación de arrecifes
VitRIS y HydRIS vaccine stabilization technologies	Nova Laboratories Ltd	Almacenamiento y manipulación de productos fármacos sin necesidad de refrigeración	Principio de anhidrobiosis o capacidad de vivir sin agua (artemia, y tardígrados)
La alambrada	Michael Kelly y Joseph Glidden	Estructura de alambre, normalmente de acero, destinada a delimitar terrenos, encerrar ganado, demarcar propiedades, entre otras	Forma y función de las espinas en las plantas (naranja de osage)
Aquaporin	Aquaporin	Membranas para filtración de agua	Uso de las acuaporinas (sustancias encargadas de transporte de agua a través de las membranas celulares).
Biolytix® water filter	Biolytix	Sistema compacto de tratamiento de aguas residuales	Descomposición de residuos a través de gusanos, escarabajos y organismos microscópicos
Biopolymers Nanochem	Biopolymers Nanochem	Polímeros biodegradables a base de proteínas solubles en agua.	Segregación y moldeado del carbonato de calcio por parte de las ostras como componente esencial de su caparazón.

Byetta® exenatide injection	Amylin Pharmaceuticals, Inc. and Lilly USA, LLC.	Medicamento inyectable para control la diabetes mellitus tipo 2 en adultos	Compuesto extraído de la saliva del monstruo de Gila (<i>Heloderma suspectum</i>)
Eco-Machine	Todd Ecological Design, Inc.	Sistema de tratamiento de aguas residuales	Uso de poblaciones de bacterias, hongos, plantas, etc; para degradar y digerir los contaminantes orgánicos del agua en un ambiente que replica el diseño de los humedales.
PureBond® technology	Columbia Forest Products	Pegamento de madera no utiliza formaldehído	Adherencia del mejillón a rocas
Biodome	Wastewater Compliance Systems, Inc.	Sistema de tratamiento de aguas residuales	Uso de bacterias y microbios simbióticos para degradar desechos
Primeras herramientas: hachas	Hominios desde periodo Olduvense (entre 1,5 y 2,5 millones de años)	Herramienta cortante	Uso de materiales naturales piedras, huesos y ramas.
Mycobond™	Ecovative Design	Material para embalaje	Uso del micelio del hongo <i>Basidiomycete</i> como polímero natural
Simvastatina (Zocor®)	Merck and Co	Fármacos para la reducción del colesterol (Estatinas)	Compuesto extraído del hongo <i>Aspergillus terreus</i>
Polinización	Agricultura comercial y no comercial	Proceso de transferencia del polen desde los estambres hasta el estigma haciendo posible la producción de semillas y frutos.	Aprovechamiento agrícola de los procesos ecosistémicos de polinización (abejorros, abejas, avispas, mariposas y polillas entre otros)
Control biológico de plagas	Periodo inicial desde el año 200 dC -1887 dC, Periodo intermedio año 1888-1956, Periodo moderno año 1957 hasta el presente	Uso de organismos vivos como depredadores naturales para reducir la densidad poblacional de otros organismos considerados como plagas	Uso de especies como depredadores naturales para controlar el tamaño poblacional de otras especies: hormiga <i>Oecophylla smaragdina</i> en China, mariquita <i>Rodolia Cardinalis</i> en California-Estados Unidos, Murciélago de cola suelta brasileño (<i>Tadarida brasiliensis</i>)
Taxol	Bristol Myers Squibb, Abraxis oncology, Sanofi-Aventis, Cell therapeutics entre otras	Fármaco anticancerígeno	Compuesto extraído del árbol tejo del Pacífico (<i>Taxus brevifolia</i>).
Aciclovir®, Zovirax®	Glaxo, Wellcome, Mylan y ARA Pharmaceutical Medical	Fármaco Antiviral contra los Herpes tipo 1 y 2, y la varicela-zóster.	Compuesto extraído de la esponja Marina <i>Cryptotethya crypta</i> (Caribe)
Cytarabine®	Pharmace & Upjon	Fármaco anticancerígeno	Compuesto extraído de la esponja Marina <i>Cryptotethya crypta</i> (Caribe)
Prialt®	Elan Pharmaceutical-Azur Pharma-Warner Lambert	Fármaco usado en el tratamiento del dolor crónico	Compuesto extraído del Caracol: <i>Conus geographicus</i> , <i>Conus magus</i> (MOLLUSCA)
Aequorin, BacMam Aequorin	Calcium Aequorin Imaging Lab, BacMam	Indicador Bioluminiscente del Calcio (Medición intracelular de Calcio)	Compuesto extraído de la medusa Bioluminiscente <i>Aequorea victoria</i>
Calyculin A	AG Scientific	Inhibidor potente de la fosfatasa utilizado en tratamientos contra el cáncer avanzado (leucemia), enfermedades neurodegenerativas, y la diabetes mellitus tipo 2.	Compuesto extraído de esponja marina <i>Discodermia calyx</i>
Formulaid®	Martek Biosciences, Columbia	Suplemento nutricional infantil que contiene ácidos grasos	Compuesto extraído de la microalga Marina (<i>Cryptocodinium cohnii</i>)
Resilience®	Estée Lauder	Compuesto anti-inflamatorio y de actividad analgésica (cremas para quemaduras, irritación, artritis)	Compuesto extraído de los gorgonáceos <i>Pseudopterogorgia elisabethae</i> (Coral blando-Caribe)
ProZyme®	OSMAN International Group S.A.	Proteína con aplicaciones biotecnológicas en industria de alimentos, inmunodiagnóstico, cosméticos, marcaje de las células, pruebas clínicas ELISA y citometría de flujo.	Compuesto extraído del Alga Roja
Trabectedina (Yondelis®)	PharmaMar	Fármaco anticancerígeno	Compuesto extraído de la Ascidia Tunicate <i>Ecteinascidia</i>
Vent®	New England Biolabs, Inc.	Utilizada en pruebas diagnósticas: detección de: virus (hepatitis B y C ó VIH), enfermedades (hemofilia A y B, la distrofia muscular y la fibrosis quística), riesgo de padecer enfermedades (diabetes tipo I y enfermedad celíaca), entre otras.	Compuesto extraído de la Arqueobacteria <i>Thermophilic</i> (<i>Thermus aquaticus</i> Taq, <i>Pyrococcus furiosus</i> , <i>Thermus thermophilus</i> , <i>Thermus flavus</i> , <i>Thermococcus litoralis</i> , and <i>Pyrococcus species</i> GB-D)

Fuente: Elaboración del autor

2.1 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, el cual incluyó procesos de bioinspiración y biomimética en diversas etapas de su trayectoria. Anderson (2002: 28) 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 cuales se creó la idea de un avión con alas batientes, que se sostiene y avanza gracias a que sus alas ejecutan movimientos parecidos a los de las aves, al cual se le conoce como Ornitóptero.

Un momento decisivo para la consolidación de la tecnología del aeroplano, se dio con realización del primer vuelo tripulado y sostenido en el aire, por parte de Otto Lilienthal en el año de 1891, como resultado de sus diseños, experimentos, pruebas y aportes técnicos 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 igualmente a la comprensión de la aerodinámica con los llamados “coeficientes aerodinámicos” o “tablas de Lilienthal”. La trayectoria de Lilienthal es una perfecta ilustración de los alcances que puede tener la inspiración ofrecida por la naturaleza cuando ésta se complementa con habilidades y conocimientos de naturaleza técnica. La obra maestra de Lilienthal “El vuelo de los pájaros como base de la aviación” publicada en el año 1889 es una evidencia 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 diseños derivados de estos estudios científicos que intentan replicar el vuelo de las aves, como queda evidenciado en sus modelos de ornitópteros. A manera de ejemplo, puede considerarse el diseño de un ornitóptero denominado “Seagull” 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 enfrentado el proceso de innovación: diseñó tecnologías de vuelo de alas batientes -ornitópteros- y también 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- a partir de su convicción personal y de sus estudios, este diseñador alemán sostuvo que los ornitópteros eran la tecnología más apropiada para el futuro de la aviación.

Históricamente, hasta este punto, es innegable que el surgimiento de la tecnología del aeroplano tiene un origen bioinspirado, ya que sin la observación

y 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 ellos Vogel (2000), quien muestra que precisamente el diseño eficiente de ala fija, es 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. La consideración del caso de Lilienthal permite realizar algunos contrastes sobre ese punto de vista puesto que este inventor es uno de los pioneros de la tecnología de ala fija que es precisamente una solución claramente diferenciada del vuelo de ala batiente de las aves, y podría decirse 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 y Gebeshuber (2013) manifiestan que el trabajo de Lilienthal sirve como un buen ejemplo de biomimética, porque incluye aspectos como la abstracción, la transferencia, y la aplicación del conocimiento generado desde los modelos biológicos, a tal punto que lo consideran como representativo de la definición de biomimética² asumida por la Asociación de Ingenieros Alemanes "Verein Deutscher Ingenieure VDI".

Precisamente es esta discusión la que indica 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; puesto que es un hecho que los diseños exitosos de aeroplano a partir de los hermanos Wright no emplearon la tecnología de alas batientes de las aves, y con ello se establece una relación de bioinspiración entre la tecnología natural y la tecnología humana de vuelo; pero igualmente es cierto que el éxito de los hermanos Wright se debe en parte al uso de los coeficientes aerodinámicos contenidos en las tablas de Lilienthal, lo que indica una cierta transferencia de conocimiento derivado del diseño natural para la resolución de los desafíos técnicos que enfrentaban los diseñadores de areoplanos.

Por lo tanto, es indiscutible el origen bioinspirado de la tecnología humana de vuelo pero es discutible que se haya producido una plena relación biomimética con la tecnología natural. Los diseños posteriores de aeroplanos guardan una gran diferencia en términos de sus características técnicas frente al vuelo de las aves. Ello implica que deben reconocerse diferentes etapas del desarrollo de esta tecnología, iniciando con la bioinspiración (diseños de Da Vinci), continuando con la confluencia de la bioinspiración y la biomimética (Otto Lilienthal-hermanos Wright), pasando a una separación radical de las trayectorias tecnológicas (hermanos Wright y diseños posteriores), y finalmente con una etapa de biomimética deliberada en la que se intenta una transferencia sistemática de conocimientos tomados del vuelo de diversas especies

² 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).

naturales como pájaros, moscas, libélulas, entre otras. Además algunos científicos, desde el punto de vista de la biomimética deliberada, continuaron desarrollando la idea de Lilienthal de volar como lo hacen las aves (Park y Yoon 2008).

2.2 El “Eastgate Centre building”: Arquitectura e ingeniería humana como emulación de los nidos de termita

El Eastgate Centre es un edificio ubicado en la ciudad de Harare (Zimbabwe), utilizado como centro comercial desde el año de 1996. Fue diseñado por el arquitecto 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 al interior de la construcción se mantenga estable mientras que la temperatura en el exterior fluctúa entre los 10° 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 se reduce. 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 que permiten la transferencia y almacenamiento del calor (Baird 2001: 169).

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 autorregulan la temperatura al interior del nido. El arquitecto Pearce remonta su trayectoria de diseñador inspirado en la naturaleza a la influencia que ejerció en su pensamiento y en su obra el libro “Arquitectura sin arquitectos” de Bernard Rudofsky en los años sesenta, el cual lo 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: 48). Puntualmente, la idea de construir un edificio autorregulado surgió en la década de los noventa, cuando el arquitecto veía un documental³ mientras enfrentaba el desafío de construir un edificio que fuera energéticamente eficiente para vivir en un clima sub-tropical:

“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 2013⁴).

Tras este proceso de bioinspiración, se inicia 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 quienes hicieron viable el diseño mediante modelos computacionales que simulaban las condiciones de circulación del aire y

³ David Attenborough documental sobre las termitas https://www.youtube.com/watch?v=xGaT0B_2DM

⁴ David Parr es el editor de nuevos medios de la Organización Friends of Earth. Página Web: http://www.foe.co.uk/news/eastgate_centre_harare_termite_mound_41325

temperatura optimizando la sincronización de los ventiladores durante el día y la noche (Tzonis et al 2001: 49).

Esta tecnología exitosa de refrigeración que aprovecha los principios transferidos desde la naturaleza ha sido replicada: en el año 2001 se inauguró el Portcullis House un edificio de oficinas para miembros del parlamento y personal en Westminster Londres (Reino Unido), basado en el sistema utilizado en el edificio Eastgate, por medio de chimeneas como parte de un sistema de aire acondicionado sin alimentación para extraer el aire a través del edificio, aprovechando los flujos naturales.

El Eastgate Centre ha sido identificado como una muestra plena de aplicación biomimética por parte de diversos expertos. 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:

“...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” (Environmental Design Research Association EDRA 2009: 43)

De otra parte, algunos analistas contemporáneos señalan que el edificio no reproduce el funcionamiento natural de los termiteros y por lo tanto no constituye un ejercicio propiamente biomimético; puesto que hasta el momento en el que se construyó el 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 del mecanismo de enfriamiento natural de los montículos. Tal es el planteamiento de un equipo de científicos Turner y 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 y Soar 2008: 1)

De ser cierto el argumento de estos autores, en el caso de la tecnología derivada de las termitas se presenta la paradoja de que un ejercicio biomimético exitoso puede pasar a ser considerado solo 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 y Soar (2008: 2) al manifestar que:

“lo que hace al Eastgate más resaltable es el hecho de que combina muchas características del diseño de los montículos de termitas, los cuales tiene gran diversidad estructural”.

Los modelos explicativos del funcionamiento del montículo de las termitas son dos: de una parte el modelo denominado “efecto termosifón” (Thermosiphon

Mecanismo) y de otra parte, el modelo denominado de “flujo inducido” conocido por parte de los arquitectos e ingenieros como “efecto chimenea” (Stack effect). Puesto que existen dos interpretaciones del funcionamiento de los montículos de las termitas; una convencional asociada a los efectos de ventilación tipo chimenea y otra contemporánea, que emplea como analogía un sistema pulmonar; la evaluación que se haga del carácter biomimético del Eastgate depende de cuál de estas dos interpretaciones se emplee para juzgarlo.

Siguiendo el análisis de Turner y Soar, el Eastgate Centre logra combinar esos dos modelos (Chimenea y 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 clasificación a la luz de los avances más recientes en la comprensión científica del funcionamiento de los montículos de termitas que los considera como sistemas de ventilación pulmonar lo cual implica que la interpretación del rol funcional desempeñado por la chimenea en el termitero haya 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 (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 replica el 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 los edificios que adoptan su tecnología, no estarían emulando el verdadero mecanismo usado por los termiteros, el cual obedece al modelo de 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 igualmente quienes señalan que dado el conocimiento contemporáneo que la ciencia tiene de los termiteros, no debe considerarse la tecnología humana de enfriamiento como biomimética, tienen razón. 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 modificación en los parámetros que permiten evaluar o interpretar las características de una tecnología dada.

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

La bioutilización representa el tercer tipo de proceso de interacción entre los ecosistemas naturales y el sistema económico, en relación con la innovación.

Consiste en el aprovechamiento de un componente natural (dicho componente natural 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 humanos. Agrupa diversas modalidades de adaptación o integración, los cuales han sido identificados en la literatura especializada como bioderivación, bioadaptación, bioasistencia y bioextracción, las cuales constituyen formas específicas de incorporación de elementos naturales que desempeñan un rol estratégico, clave en los procesos económicos con los cuales se integran.

En este caso, analizamos un servicio ecosistémico: la polinización, el cual resulta esencial para el mantenimiento de la producción agrícola. Los polinizadores tales 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 directa o indirectamente depende de la polinización realizada por los insectos (Richards 1993). Aunque muchos de los cultivos de productos agrícolas son polinizados por el viento, otros requieren de la polinización por parte de insectos para mejorar la calidad o el rendimiento por hectárea (Richards 1993).

La productividad de algunos cultivos, como las almendras, depende sensiblemente de la polinización de los insectos, puesto que la cantidad de producción depende directamente de la polinización -de las abejas-. En otros casos, la polinización provista por las abejas es importante porque afecta el tamaño, forma y calidad del fruto: según Gordon y Davis (2003: 30) una gran variedad de cultivos dependen de un insecto como polinizador principal, llegando el nivel de dependencia en algunos casos a situarse en el rango 80-100% (manzana, mango, cebollas, calabazas y, melón).

La polinización involucra la transferencia de la información genética entre las plantas a través del polen, la cual es requerida para la reproducción sexual de las plantas. En otras palabras, la polinización consiste en la fertilización de las plantas florecidas mediante la transferencia de polen, por parte 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 comerciados en el mercado, por lo tanto su valor es subestimado o no se tiene en cuenta en el mercado. Los insectos son el grupo más grande de polinizadores y, las abejas proporcionan aproximadamente 80% de toda la polinización por insectos (Robinson et al 1989).

El valor del servicio ecosistémico de polinización, entendido como una aproximación a la importancia del mismo, y al grado de interdependencia que existe entre la agricultura humana y la polinización, ha sido demostrado ampliamente por diversos autores; en la tabla 4 se presentan algunos de estos estudios. 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, Sallesc, Setteled y Vaissière (2009) calculó este valor, el cual fue de €153 billones de euros, que representaba el 9.5% del valor de la producción agrícola mundial usada para la alimentación humana en el año 2005.

Tabla 4. Valor económico de la polinización por región.⁵

País	Valor de la polinización	Polinizador	Fuente
Estados Unidos	US\$6 billones	abejas	Southwick and Southwick (1992)
Estados Unidos	US\$14.6 billones	abejas	Morse and Calderone (2000)
Estados Unidos	US\$3.07 billones	Insectos naturales	Losey and Vaughan (2006)
Reino Unido	£202 millones	Insectos (abejas)	Carreck and Williams (1998)
Australia	AUS \$1.7 billones	abejas	Gordon and Davis (2003)
Australia	US\$1.2 billones	abejas	Gibbs y Muirhead (1998)
Mundo	US\$200 billones	Insectos	Pimentel et al (1997)
Mundo	€153 billones	Insectos	Gallai et al (2009)
Unión Europea (25 miembros)	€14.2 billones	Insectos	Gallai et al (2009)

Fuente. Elaboración del autor

En Estados Unidos el valor económico de la polinización de las abejas fue estimado por Southwick y Southwick (1992) en \$6 billones de dólares. También, Morse y 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 y Vaughan (2006) encontraron 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. En el mismo sentido, en otros países alrededor del mundo se ha estimado el valor de la polinización, entre esos estudios se encuentran los de Carreck y 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 Muirhead (1998) estiman el valor de la polinización de las abejas en \$1.2 billones de dólares y Gordon y 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 desbordamiento de la polinización* o “Spillover pollination” (Morse y Calderone 2000: 3), el cual se basa en el hecho de que la polinización beneficia tanto a la agricultura comercial y no comercial, sin existir retribución alguna por estos servicios. Desde el punto de los costos, se ha verificado una disminución gradual pero continua del servicio ecosistémico de la polinización. Las causas de la disminución de este servicio ecosistémico son entre otras: la pérdida de hábitat para los polinizadores, debido a que los polinizadores requieren áreas naturales para anidación, reposo y forrajeo (urbanización e intensificación de la agricultura), parásitos y enfermedades y el uso intensivo de pesticidas.

⁵ Los valores no son comparables debido a que usan distintas metodologías. Los valores se muestran para efectos ilustrativos del valor del servicio de polinización pero no deben tomarse como una evaluación exacta de valor de este servicio

En el caso de los pesticidas, en los Estados Unidos, las poblaciones naturales (silvestres) de las abejas están disminuyendo en las regiones agrícolas (Richards 1993). En California, por ejemplo, el hábitat posee alteraciones provocadas por el uso de pesticidas, lo cual ha dado lugar a la reducción, de las abejas silvestres, lo que obligó a los agricultores a depender del alquiler de colonias de abejas para la polinización (E Mussen, comunicación personal, 1996).

2.4 La alambrada: un ejemplo de transición tecnológica entre los tipos de aprendizaje desde el capital natural

La tecnología de la alambrada es ilustrativa de un proceso de transición a lo largo del tiempo entre los distintos tipos de aprendizaje desde la naturaleza (bioinspiración, biomimética y bioutilización). Los inicios de esta tecnología se remontan al uso por parte de los agricultores de especies vivas de algunas plantas como barrera natural contra el peligro que representaban amenazas externas a los cultivos, como por ejemplo los daños que eventualmente pudiera causar el tránsito de ganado sobre áreas cultivadas:

“Una de las alternativas de más éxito, bien conocida en Europa pero no utilizada desde entonces en Norteamérica, era la fila de seto. En una región en la que el ganado libre amenazaba los pastos, la efectividad de las filas de seto aumentaba cuando se utilizaban para formarlas plantas con espinos. Se plantaban zarzas, cactus, rosas y falsas acacias, pero el naranjo Osage parecía ser la mejor planta para fines de cercado” (Basalla 1991: 75)

Desde el punto de vista técnico, todas las plantas usadas como cercos naturales dentro de su morfología presentan espinas. La funcionalidad de las espinas ha sido documentada en diversos estudios. El argumento más común respecto de la función que cumplen las espinas indica que son un mecanismo de defensa para disuadir a los animales herbívoros de comer sus tejidos (Grubb 1992, Cooper y Ginnett 1998 y Young y Okello 1998 entre otros).

El uso generalizado de plantas como barrera natural constituye un ejemplo de la utilización directa de especies naturales como componente principal de una tecnología humana (el cercado de cultivos), representando por lo tanto una primera etapa de la tecnología humana de la alambrada asociada a la bioutilización. La etapa biomimética en la trayectoria de esta tecnología, aparece debido a los inconvenientes asociados al uso de estos cercos naturales puesto que no podían moverse fácilmente, constituían un refugio para malas hierbas, parásitos e insectos; entre otras razones. Tras diversos intentos por sustituir los materiales naturales por materiales artificiales tales como el alambre liso, los cuales fracasaron, en el año de 1868 se produjo una mejoría sustancial a la tecnología de la cerca de alambre gracias a la creación del primer modelo de alambre de púas por parte de Michael Kelly, inspirado en el seto de espino, lo cual queda expresado claramente en su patente:

“Mi invención consiste en otorgar al alambre de cercado un carácter que lo aproxima al seto de espino. Prefiero designar la cerca así producida como “cerca espinosa” (Kelly 1896: 2)

Adicionalmente a su característica bioinspirada, el invento de la alambrada de Kelly constituye el comienzo de un aprendizaje de tipo biomimético, que tiene un impulso definitivo con Joseph Glidden, quien aportó el diseño moderno más exitoso desde el punto de vista de su difusión comercial (Glidden 1874). La trayectoria de esta tecnología es una muestra de la manera en que es posible transferir principios contenidos en la naturaleza a través de un proceso de mejoras continuas del tipo “ensayo y error”, pero que finalmente consigue la consolidación de un análogo artificial de la forma y función que cumplen las espinas en las plantas como respuesta natural al problema que representan los depredadores, para ser utilizada de manera eficiente como barrera contra elementos perjudiciales para el desarrollo de la agricultura humana.

El impacto positivo que este invento ha tenido en la productividad de la economía en general y de la agricultura en particular ha sido mostrado por autores como Hornbeck (2010), quien plantea que a partir de la invención y el uso intensivo de la alambrada, el desarrollo de la agricultura en Estados Unidos se aceleró entre los años 1880 y 1900. Según el autor esto se debe al hecho de que los agricultores tenían una mayor capacidad de proteger sus cultivos de la invasión, es decir que, se experimentó una disminución del riesgo de sufrir daños por la aparición de ganados no compensados por parte otros; lo cual representa para los agricultores incrementos en la producción, mejora del suelo, aumento en el valor de la tierra y aumento en la productividad. Esta tecnología es ejemplo de una trayectoria de aprovechamiento de los conocimientos de la naturaleza a través de los tres tipos de aprendizaje en una secuencia en la que la bioinspiración (la idea de construir una barrera de protección con espinas copiando la estrategia empleada por las especies naturales), la bioutilización (hacer de las plantas una barrera para cumplir propósitos económicos en la agricultura), y finalmente biomimética (con la réplica de forma y función de las espinas en la alambrada de púas). Nos permite evidenciar, igualmente el solapamiento que suele ocurrir entre esos procesos.

Resulta conveniente, una vez expuestos estos casos, resumir las lecciones que nos deja el estudio de las trayectorias de los naturfactos:

- a. Existen tres tipos de aprendizaje (bioinspiración, biomimética y bioutilización) desde la naturaleza que caracterizan el proceso de transferencia de conocimiento tecnológico desde los ecosistemas naturales hacia el sistema económico humano.
- b. Estos tipos de aprendizaje con frecuencia se presentan de manera simultánea (se superponen) en el desarrollo de tecnologías, productos, y/o servicios.
- c. Los tipos de aprendizaje aparecen en secuencias que no guardan siempre el mismo orden; por ejemplo: unas veces aparece la bioinspiración seguida la biomimética (Eastgate Centre), otras la bioutilización está seguida de la biomimética (alambrada), etc.
- d. Las aproximaciones biomiméticas constituyen un subconjunto de la bioinspiración, en el sentido que toda emulación de la naturaleza se produce porque se observan ciertas características naturales deseables para el desarrollo de la tecnología humana.

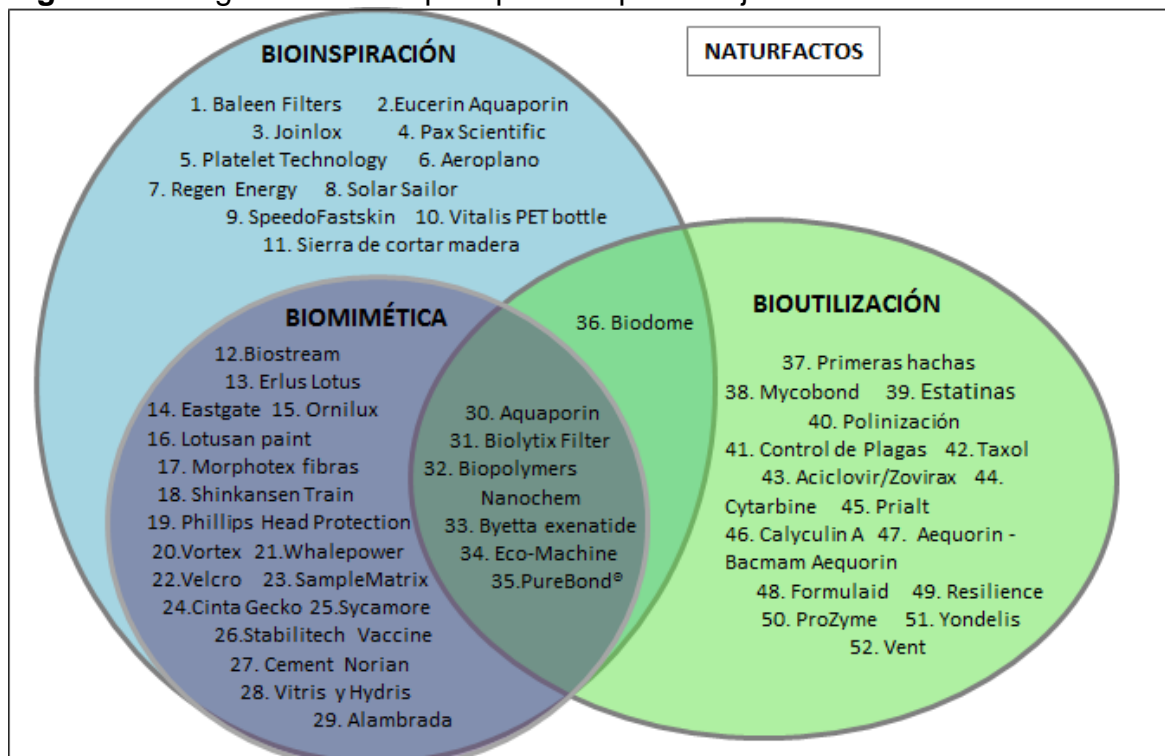
2.5 El Diagrama de Venn: una herramienta de clasificación de los procesos de aprendizaje desde el capital natural

Una manera útil de clasificar las tecnologías humanas dentro de estas tipologías de aprendizaje, considerando las características señaladas, es a través del diagrama de Venn, propuesto por Rawlings et al (2012). Debido a que este diagrama permite representar las relaciones de intersección (tecnologías que se superponen en distintos tipos de aprendizaje) e inclusión (todas la tecnologías biomiméticas son bioinspiradas).

Desde el punto de vista de la valoración de la importancia del aporte de la naturaleza en los desarrollos tecnológicos humanos, el diagrama de Venn puede representar grados diferentes de aporte de la naturaleza a los procesos económicos de innovación, los cuales eventualmente deberían ser recompensados en relación a la dependencia que el sistema económico ha desarrollado respecto al ecosistema natural; mayor en aquellos en los que se superponen los tres tipos de aprendizaje y menor en los que se superponen dos, uno o ninguno. Por ejemplo, el hecho de tomar ideas de la naturaleza es diferente al hecho de replicar sus procesos y mecanismos, puesto que esta última modalidad guarda mayor dependencia con la naturaleza.

El diagrama de Venn contiene tres conjuntos que representan los tipos de aprendizaje desde la naturaleza: bioinspiración (óvalo azul), biomimética (óvalo violeta) y bioutilización (óvalo verde). Dentro de estos conjuntos se encuentran las cincuenta y dos (52) tecnologías humanas analizadas respectivamente para estos tipos de aprendizaje natural. Cuando existe intersección entre los conjuntos, las tecnologías incluidas suponen la interacción simultánea entre dos o más tipos de aprendizaje desde la naturaleza. Por ejemplo, como se mencionó anteriormente, la biomimética es un subconjunto de la bioinspiración, por eso el óvalo violeta está dentro del óvalo azul. Así también, puede observarse que, en el caso del Bio-dome se considera al producto simultáneamente bioinspirado y bioutilizado, sin llegar a ser biomimético (por ello se encuentran en la intersección entre el óvalo azul y el verde). Finalmente, existen ciertas tecnologías que presentan los tres tipos de aprendizaje como es el caso de: Aquaporin, Biolytix Filter, Purebond® technology, entre otras; éstas tienen una mayor dependencia o interacción con los sistemas biológicos (ver figura 1).

Fig 1. Tecnologías humanas por tipos de aprendizaje desde la naturaleza.



Fuente. Elaboración del autor basado en Rawling et al (2012).

3. Hacia la incorporación del “aprendizaje desde el capital natural” en la disciplina económica

En este apartado, se presentan conceptos que permiten caracterizar el papel desempeñado por las tecnologías naturales en el proceso económico de innovación, a través del concepto de "Aprendizaje desde el Capital Natural". Se proponen tres referentes que permitirían construir una explicación más satisfactoria, más completa del proceso de aprendizaje del capital natural: el marco conceptual de la denominada “Learning Economy” (de Lundvall y Johnson, Segura); el trabajo de Kenneth Boulding, como precedente de gran relevancia que integra las variedades de “conocimiento” económico con el contexto medioambiental, constituyéndose en un pionero en la comprensión teórica de la interacción entre el subsistema económico y los eco-sistemas naturales. Finalmente, las nociones de capital natural y, especialmente, la de función ecosistémica, la cual debe ser ampliada o modificada para reconocer plenamente la conexión existente entre la innovación y los ecosistemas naturales, los cuales deben ser considerados como fuente de progreso tecnológico.

En el contexto de la teoría de los sistemas de innovación, Lundvall y Johnson han incorporado las nociones de “conocimiento” como recurso (Stock) y “Aprendizaje” 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), a los cuales puede agregarse una forma de conocimiento adicional (conocimiento del capital natural o “Knowledge from natural capital” y un proceso de aprendizaje (el aprendizaje del capital natural o “Learning by natural capital” (Segura 1999). La tabla 5 sintetiza la evolución de los conceptos relacionados con los tipos de aprendizaje que finalmente conducen a la formulación de las nociones de “learning by natural capital” en el contexto de la disciplina económica y de “learning from nature” en el contexto de las ciencias naturales y la ingeniería, los cuales fundamentan el de “aprendizaje desde el capital natural propuesto en este trabajo.

Tabla 5. Procesos económicos de aprendizaje.

Tipo de Aprendizaje	Efecto	Agente
Aprendizaje mediante la práctica (Learning by doing) (Arrow 1962)	Aprendizaje basado en la experiencia	Productor
Learning by using Aprendizaje por el uso (Rosenberg1982)	Aprendizaje de los usuarios	Consumidor
Aprendizaje por Interacción (Learning by Interacting) (Lundvall y Johnson 1994)	Aprendizaje resultante de la Interacción entre productores y consumidores	Interacción productor - consumidor
Economía del aprendizaje (Learning economy) (Lundvall y Johnson 1994)	El Aprendizaje es un proceso de adquisición de competencias y habilidades	Individuos, firmas, regiones, países
Aprendizaje del capital natural (Learning by Natural Capital) (Segura 1999)	Contacto entre las actividades económicas y la naturaleza	Relación entre el capital natural y el sistema económico
Aprendizaje desde la naturaleza (Learning From Nature)	Tres niveles de aprendizaje de la naturaleza: a. “learning from the results of evolution” b. “learning from the process of evolution” c. “learning from the success principles of evolution”	Firmas

Fuente: Elaboración del autor basado en Lundvall (2004)

Como precedente de gran importancia, debe ser considerado el trabajo de Kenneth Boulding. En su trabajo puede encontrarse una reflexión sistemática sobre las características básicas de la interconexión entre sistemas natural y económico. Se refiere a la existencia de procesos de intercambio entre los sistemas naturales y humanos, realiza una identificación de tecnologías y agentes naturales, reflexiona sobre la importancia de los procesos de acumulación de conocimientos y de aprendizaje en la naturaleza y toma la idea de diferentes tipos de conocimiento como stock asociados a procesos de aprendizaje como flujo. Desde el punto de vista de Boulding, existe un proceso general de evolución del que hacen parte los ecosistemas, que evolucionan en estrecha relación con la “Econosfera” –esfera de actividades económicas-, y la

“Sociosfera” o esfera de todas las actividades, relaciones e instituciones humanas. Una de las características sobresalientes de la econosfera, es que permite la aparición del desarrollo económico, un proceso, esencialmente, de aprendizaje. Dicho proceso evolutivo general se produce con la participación de poblaciones de diferentes tipos de especies naturales y humanas (especies químicas, especies biológicas y especies sociales) que provienen de procesos de producción que crean, a su vez, “artefactos naturales” y “artefactos humanos”.

En este sentido, existen dos tipos de artefactos que provienen de dos clases distintas de especies. En su análisis es claro que en primer lugar, existen procesos biológicos de producción (naturales) que producen artefactos biológicos, y después aparecen los humanos. Empleando 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: 122).

Además de exponer la existencia de los “artefactos biológicos” (que pueden ser las especies en sí mismas), Boulding atribuye a éstos la capacidad de adquirir nuevos conocimientos a través de procesos de aprendizaje, especialmente en los grandes mamíferos y pájaros. Su argumentación contiene pues, claramente una comprensión de la existencia de agentes económicos naturales.

Para finalizar, tomemos en consideración el concepto de “funciones ecosistémicas” el cual ha desempeñado un importante rol en la definición de las características del capital natural. Autores como Rudolf de Groot y Robert Costanza han sido decisivos en su especificación. De manera sintética puede decirse que las funciones, bienes y servicios de los ecosistemas naturales y semi-naturales pueden agruparse en cuatro grandes categorías: regulación (de los procesos ecológicos esenciales), hábitat (provisión de refugio y hábitat para la reproducción), producción (de biomasa producto de la transformación de la fotosíntesis y los nutrientes) e información (oportunidades para el desarrollo cognitivo, la recreación, las experiencias estéticas, la reflexión y el enriquecimiento espiritual). Estas categorías, a su vez, están desagregadas en veintitrés funciones, las cuales tienen asociados bienes y servicios específicos (De Groot et al 2002). Es indudable que algunos naturfactos pueden asociarse a funciones ecosistémicas; por ejemplo, las de tratamiento de residuos (9), polinización (10), control biológico (11), recursos genéticos (16), recursos medicinales (17), son representativas de productos propios de la bioutilización. Igualmente, algunas funciones información artística y cultural (21) y ciencia y educación (23) podrían presentar procesos propios de algunos naturfactos asociados a procesos de bioinspiración. Cuando se consideran las tecnologías biomiméticas, algunas de las tecnologías bioutilizadas más complejas o los casos en los que los procesos biomiméticos, bioinspirados y de bioutilización se solapan, se hace evidente la insuficiencia de la clasificación actual, la cual no considera plenamente –aún- la capacidad que los ecosistemas tienen para ser una fuente de tecnologías naturales, bienes y servicios que contribuyen directamente a los procesos económicos de innovación.

Si se consideran los argumentos presentados en esta comunicación, respecto de:

- Los procesos de aprendizaje desde el capital natural en sus tres modalidades (bioinspiración, biomimética y bioutilización),
- Los naturfactos (bienes, servicios y tecnologías),
- Las tecnologías naturales
- El conocimiento acumulado en el capital natural

Quizá se llegué a la conclusión de que es necesaria una reformulación de la caracterización de las funciones ecosistémicas, quizá proponiendo una nueva función ambiental o –incluso- una categoría adicional (análoga a las de regulación, hábitat, producción e información) representativa del conocimiento tecnológico acumulado en los ecosistemas naturales.

Referencias bibliográficas.

Anderson, John (2002): *The Airplane, a History of Its Technology*, Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Baird, George (2001): *The Architectural Expression of Environmental Control Systems*. London: Taylor & Francis.

Bar-Cohen, Yoseph (2006): *Biomimetics Biologically Inspired Technologies*. California: Taylor & Francis.

Basalla, George (1991): *La evolución de la tecnología*, Barcelona: Crítica.

Bhushan, Bharat (2009): "Biomimetics: lessons from nature: An overview", *Philosophical Transaction of the Royal Society* No 367, pp. 1445–1486.

Bonser, Richard (2006): "Patented biologically-inspired technological innovations: a twenty year view" *Journal of Bionic Engineering*, pp. 39- 41.

Boulding, Kenneth (1978): *Ecodynamics: A New Theory of Societal Evolution*, Beverly Hills: Sage Publications.

Carpi, Angelo y Brebbia, Carlos (2010): *Design & Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. Southampton: WIT Press.

Carreck, Norman, y Williams, Ingrid (1998): "The economic value of bees in the UK". *Bee World*, No. 79, Vol. 3, pp. 1-13.

Cooper, Susan y Ginnett, Tim (1998): "Spines protect plants against browsing by small climbing mammals". *Oecologia*, No. 113, pp. 113-219.

De Groot, Rudolf; Wilson, Matthew y Boumans, Roelof (2002): "A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services", *Ecological Economics*, No. 41, pp. 393–408.

Drack, Manfred y Gebeshuberbc, Ille. (2013): "Comment on "Innovation through imitation:biomimetic, bioinspired and biokleptic research". *Soft Matter*, pp.2338–2340.

Environmental Design Research Association EDRA. (2009): A Phenomenological Interpretation of biomimicry in two sustainable Designs. Proceedings of the 40th Annual Conference of the Environmental Design Research Association EDRA, pp. 39-47. Kansas City.

Gallaia Nicola, Salles Jean, Setteled, Josef y Vaissière Bernard (2009): "Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline". *Ecological Economics*, No.68, pp.810–821.

Gibbs, Diana y Muirhead, Ian. (1998): *The Economic Value and Environmental Impact Of The Australian Beekeeping Industry. Maroubra: A report prepared for the Australian beekeeping industry.*

Glidden, Joseph (1874): Patente nº 157124 A. Estados Unidos.

Gordon Jenny y Davis Lee (2003): *Valuing honeybee pollination.* A report for the Rural Industries Research and Development Corporation, pp.1-42.

Grubb Peter (1992): "A positive distrust in simplicity-lessons from plant defenses and from competition among plant and among animals" *Journal of Ecology*, No.80, pp.585-610.

Hank Timothy y Swiegers Gerhard. (2012): The Concept of Biomimicry and Bioinspiration in Chemistry. En G. Swiegers, *Bioinspiration and biomimicry in Chemistry Reverse-Engineering Nature* (págs. 1-14). Hoboken: Wiley & Sons.

Hornbeck, Richard (2010): "Barbed Wire: Property Rights and Agricultural Development", *The Quarterly Journal of Economics*, Vol.125, pp. 767-810.

Kelly, Michael (1868): Patente nº 503268 A. Estados Unidos.

Lewin, Roger (1994): *Evolución humana.* Barcelona: Salvat.

Lepora Nathan; Verschure Paul y Prescott Tony. (2013): "The state of the art in biomimetics". *Bioinspiration & Biomimetics*, No.8, pp.1-11.

Losey John y Vaughan Mace (2006): The Economic Value of Ecological Services Provided by Insects *BioScience*, No.56, Vol.4, pp.311-323.

Lundvall, Bengt-Ake (2004): The economics of Knowledge and learning en Jesper L. Christensen and Bengt-Ake Lundvall *Product Inovation, Interactive Learning and Economic Performance* (Research on Technological Innovation, Management and Policy, Vol. 8, Emerald Group Publishing Limited, pp.21-42

Martin, Raúl (2011). *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication.* San Diego: Spie Press.

Morse, Roger y Calderone, Nicholas (2000): "The Value of Honey Bees As Pollinators of U.S. Crops in 2000". *Bee Culture*, No.128, pp.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, Joon y Yoon, Kwang-Joon (2008): "Designing a biomimetic Ornithopter capable of sustained and controlled flight". *Journal of Bionic Engineering*, pp. 39–47.

Pearce Mick. (15 de Octubre de 2013). The Eastgate Centre in Harare – a termite mound in disguise. (David Parr, Entrevistador)

Pimentel, David; Wilson, Christa; McCullum, Christine; Huang, Rachel; Dwen, Paulette; Flack, Jessica; Tran, Quynh; Saltman, Tamara y Cliff, Barbara (1997): Economic and Environmental Benefits of Biodiversity. *BioScience*, No.47, Vol.11, pp. 747-757.

Rawlings, Andrea; Bramble, Jonathan y Staniland Sarah (2012): “Innovation through imitation: biomimetic, bioinspired and biokleptic research”. *Soft Matter*, pp. 6675–6679.

Reed, Emily; Klumb, Lisa; Koobatian, Maxwell; y Viney, Christopher. (2009): Biomimicry as a route to new materials: what kinds of lessons are useful? *Philosophical Transaction of the Royal Society*, No.367, pp.1571–1585.

Richards, Ken (1993): “Non-apis bees as crop pollinators”. *Revue Suisse de Zoologie*, No.100, pp.807-822.

Robinson, Willard; Nowogrodzki, Richard y Morse, Roger (1989): “The value of honey bees as pollinators of US crops: part I”. *American Bee Journal*, pp. 477-487.

Schmitt, Otto (1969): Some interesting and useful biomimetic transforms. *Proceedings of Third International Biophysics Congress*, pp. 297. Boston.

Segura, Olman (1999). Systems of innovation and learning from natural capital. DRUID’s Summer Conference on Innovation Systems, Industrial Dynamics and Innovation Policy, pp 1-25, Rebild: Department of Business Studies Aalborg University.

Southwick, Edward y Southwick, Lawrence (1992): “Estimating the economic value of honey bees as agricultural pollinators in the United States”. *Economic Entomology*, No.85, pp.621–633.

Turner, Scott y Soar, Ruper. (2008): Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building. First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction, pp. 1-18, Loughborough: Loughborough University.

Tzonis, Alexander; Lefaivre, Liane y Stagno, Bruno (2001). *Tropical Architecture: Critical Regionalism in the Age of Globalization*. New York: John Wiley and Sons.

Vincent, Julian; Bogatyreva, Olga; Bogatyrev, Nikolaj; Bowyer, Adrian; Pahl, Anja (2006): “Biomimetics: its practice and theory”, *Journal of the Royal Society Interface*, pp. 471–482.

Vogel, Steven (2000). *Ancas y palancas, mecánica natural y mecánica humana*. Barcelona: Tusquets Editores.

Von Gleich, Arnim; Pade, Christian; Petschow, Ulrich y Pissarskoi, Eugen (2009): *Potentials and Trends in Biomimetics*. Berlin: Springer-Verlag.

Young, Truman y Okello, Bell (1998). "Relaxation of an induced defense after exclusion of herbivores: spine length in *Acacia drepanolobium*". *Oecologia*, No.115, pp. 508-513.