



RE-DESCUBRIENDO EL MUNDO NATURAL LA BIOMIMESIS EN PERSPECTIVA

(SEGUNDA EDICIÓN)

**Carlos Hugo Sierra
(Editor)**

**Hernando Bernal Zamudio
Nicolás Jiménez Iguarán
Santiago S. Hernando
María Elena López
(Coordinadores)**

Rector

Jaime Alberto Leal Afanador.

Vicerrectora Académica y de Investigación

Constanza Abadía García.

Vicerrector de Medios y Mediaciones Pedagógicas

Leonardo Yunda Perlaza.

Vicerrector de Desarrollo Regional y Proyección Comunitaria

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres.

Vicerrector de Servicios a Aspirantes, Estudiantes y Egresados

Edgar Guillermo Rodríguez Díaz.

Vicerrector de Relaciones Internacionales

Luigi Humberto López Guzmán.

Decana Escuela de Ciencias de la Salud

Myriam Leonor Torres

Decana Escuela de Ciencias de la Educación

Clara Esperanza Pedraza Goyeneche.

Decana Escuela de Ciencias Jurídicas y Políticas

Alba Luz Serrano Rubiano.

Decana Escuela de Ciencias Sociales, Artes y Humanidades

Sandra Milena Morales Mantilla.

Decano Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Claudio Camilo González Clavijo.

Decana Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Julialba Ángel Osorio.

Decana Escuela de Ciencias Administrativas, Económicas, Contables y de Negocios

Sandra Rocio Mondragón.

Re-descubriendo el mundo natural. La biomimesis en perspectiva (segunda edición)

Editor: Carlos Hugo Sierra

Coordinadores:

Hernando Bernal Zamudio

Nicolás Jiménez Iguarán

Santiago S. Hernando

María Elena López

Red internacional de Estudios sobre Biomimesis (RI+3 Biomimicry Network)
Núcleo Internacional de Pensamiento sobre Epistemología Ambiental (NIPEA)

Traducción: Carlos H. Sierra

Gao, R. *et alii*. (2018) Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system. *Building and Environment*, 129, 130-141.

Blok, V. & Gremmen, B. (2016). Ecological Innovation: Biomimicry as a New Way of Thinking and Acting Ecologically. *J Agric Environ Ethics*, 29, 203–217.

Fiorentino, C. & Montana-Hoyos, C. (2014), The Emerging Discipline of Biomimicry as a Paradigm Shift towards Design for Resilience. *The International Journal of Designed Objects*, 8 (1), 2-15.

Imagen de portada:

Borelli, *De motu animalium*, 1734.

Credit: Wellcome Collection.

Entidades colaboradoras:



ISBN: 978-958-651-736-2

e-ISBN: 978-958-651-737-9

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA)

Grupos de Investigación: GIGASS, COBIDES & CIDAGRO

©Editorial

Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 sur No. 14-23

Bogotá D.C

Diciembre 2019

Índice

Prólogo	11
Introducción	15
Ecología política de la adaptación y biomímesis en el Antropoceno <i>Nicolás Jiménez Iguarán & Omar Ramírez Hernández</i>	19
Biomimesis y consumo responsable <i>Unai Tamayo Orbegozo & Gustavo Vargas</i>	39
Desarrollo de superficies hidrodinámicas laminares basadas en el diseño de la piel de tiburón <i>G. Díez, J. Martínez, M. Soto, J. M. Blanco et alii</i>	63
De la arquitectura ecológica a la biomimesis <i>Alex Mitxelena Etxeberria & Enkarni Gomez Genua</i>	89
Biomimesis: respuestas a algunas objeciones <i>Jorge Riechmann</i>	109
La Agroecología, cultura cafetalera y ética para la vida <i>Armando Contreras</i>	133
La emergencia de la economía biomimética <i>Roberto Bermejo</i>	155
Modelo de optimización combinatoria para bioflujos del transporte Área metropolitana de La Paz y El Alto <i>Vania Susana Calle Quispe</i>	189
Innovación ecológica: la biomimesis como una nueva forma de pensar y actuar ecológicamente <i>Vincent Blok & Bart Gremmen</i>	211
“Yachay Tinku”: Una contribución indígena desde el choque entre saberes... <i>Joseba I. Arregi</i>	231

Innovación, biomimesis y organizaciones. De las metáforas hacia la aplicación	
<i>Álvaro Pío Gómez Olaya</i>	255
La disciplina emergente de la biomimesis como cambio de paradigma hacia el diseño para la resiliencia	
<i>Carlos Fiorentino & Carlos Montana-Hoyos</i>	277
Biomimesis para la innovación social y la regeneración medioambiental	
<i>Manuel Quirós</i>	299
Introducción a la biomimesis. Aprendiendo de la naturaleza desde las formas, los sistemas y los procesos	
<i>Daniel Edgardo Vedoya, Claudia Pilar et alii.</i>	315
Conducto en T biomimético para reducir la resistencia local de un sistema de ventilación y aire acondicionado	
<i>Ran Gao, Kaikai Liu, Angui Li, Zhiyu Fang et alii</i>	339
Biomimesis: la nueva cultura de la sustentabilidad para el desarrollo humano	
<i>Hernando Bernal Zamudio</i>	365
Biomimética y ciencias de la complejidad: fundamentos para el desarrollo regenerativo	
<i>Javier Collado-Ruano & Antonio Malo-Larrea</i>	391
Biomimética de las plantas o cómo nos inspira el reino vegetal	
<i>Gustavo Vargas-Silva</i>	411
Imaginarios sobre ecología y tecnociencia. El trasfondo epistemológico de la Biomimesis	
<i>Carlos Hugo Sierra</i>	437

PRÓLOGO A LA PRIMERA EDICIÓN

La más antigua y, a su vez, la más temeraria misión del *homo-investigador*, ha sido siempre comprender la naturaleza e inspirarse en sus formas, modelos y dinámicas. La biomímesis, como nuevo campo operativo en la praxis tecnocientífica basada en la bioinspiración natural, se convierte en una ventana sin límites para la innovación disruptiva aplicada a las disciplinas humanas y, especialmente, a las de vanguardia como, por ejemplo, la biotecnología, la ecoarquitectura, la nanotecnología, la biomedicina, la óptica, la farmacología, la ingeniería de materiales y energías renovables que son, entre otros, los campos naturales objeto de esta novedosa aproximación. Desde este punto de vista, esta obra busca convertirse en un instrumento que introduzca al lector en la estructura básica propia de los estudios biomiméticos.

Gestar un libro de biomímesis desde Colombia aporta un marco de sentido especial. Colombia es el primer país del mundo en biodiversidad por metro cuadrado de superficie y el segundo, después de Brasil, en biodiversidad por área total. Esta realidad extraordinaria se evidencia a través de las cifras aportadas por el Instituto Humboldt (2017), en su informe sobre el estado y las tendencias de la biodiversidad de Colombia: 1.921 especies de aves, 803 de anfibios, 537 de reptiles, 22.840 de plantas con flor y más de 1400 de peces dulceacuícolas. Con una estimación final de 56.343 especies, sin considerar los microorganismos, Colombia se presenta como todo un universo insuficientemente explorado, pero absolutamente dispuesto para la creación biomimética.

Re-descubriendo el mundo natural. La biomimesis en perspectiva es, sin duda, una obra pionera de la literatura científica en lengua hispana que busca recrear conceptualizaciones y alcances propios del paradigma biomimético. Siendo una ciencia emergente, la insuficiente producción intelectual, no sólo en aportes al nuevo conocimiento, sino también a nivel contextual, justifican sobradamente la realización de esta obra. Y en esta iniciativa concreta, han sido los integrantes de la Red Internacional de Estudios sobre Biomímesis (*RI+3 Biomimicry Network*) los que han sido llamados a dinamizar la compilación y co-autoría de esta obra colectiva. Esta red se gesta en el año 2016, como resultado de la iniciativa conjunta de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia (UNAD), la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) y la organización Amassunu.

En este estado de cosas, emerge desde las esencias misionales de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, como actual coordinadora de la Red (junto a la UPV / EHU), la necesidad y el compromiso de generar una obra introductoria

a los estudios biomiméticos. La UNAD es la primera mega-universidad pública del estado colombiano al contar con más de 100.000 estudiantes y hace presencia, como dispositivo estatal instalado en las regiones, en 1071 de los 1122 municipios existentes en el país. Este alcance y la particular estructura poblacional de la Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medioambiente de la UNAD, con más del 44% de sus estudiantes habitando en la Colombia rural y más del 95% pertenecientes a los estratos socioeconómicos 1, 2 y 3, se convierten en una potente motivación socio-cultural para la presente obra.

Este libro aporta en esencia al lector las primeras bases para el abordaje académico e investigativo de la biomímesis. De la mano de más de 40 autores de 13 países, el lector iniciará una inmersión en la multiplicidad de abordajes de las formas, sistemas y procesos biomiméticos. Y en adelante, desde cada una de las ciencias y artes, podrá orientarse hacia la creación y la innovación a partir de la observación de las propias dinámicas naturales. Esperamos entonces que, con esta obra, pueda contribuirse a la consolidación de las bases que cimientan la investigación e innovación de vanguardia. En este contexto, las palabras de Marshall McLuhan, “*nuestra edad de la ansiedad, es en gran parte, el resultado de intentar hacer las tareas del hoy con las herramientas del ayer*”, encuentran nuevos sentidos bajo el paradigma biomimético y la ancestral sapiencia de la naturaleza.

Julialba Ángel

Decana de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)

PRÓLOGO A LA SEGUNDA EDICIÓN

La publicación de la segunda edición de este libro en tan breve espacio de tiempo respecto a la primera (que salió a la luz a principios de 2019), responde, a todas luces, al inusitado interés suscitado en determinados espacios académicos y de investigación, así como en el público castellanohablante en general por conocer, en sus diferentes y variados aspectos, los múltiples planteamientos y perspectivas que orbitan en torno al enfoque biomimético.

Siendo así, se ha optado, y así queremos hacerlo constar, por no llevar a cabo modificaciones substanciales, de índole formal, de estilo o en relación con los contenidos, que pudieran alterar en demasía la obra hasta el punto de convertirla en un trabajo distinto. No se ha cambiado, por tanto, su esencia y su pretensión original. Pero se ha considerado de interés, por parte del editor y de los coordinadores, incorporar tres artículos más (concretamente, el de Joseba Iñaki Arregi Orue et alii. -de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea-, el de Gustavo Vargas -de la Angelo State University- y el de Jorge Riechmann -de la Universidad Autónoma de Madrid-). Con esta significativa adición consideramos que se amplía, un poco más si cabe, el horizonte reflexivo en torno a la problemática de la biomimesis y, al mismo tiempo, los campos a los que esta disciplina emergente se está vinculando en los últimos tiempos.

Por lo que a esta segunda edición respecta, en definitiva, es nuestro deseo que obtenga, al menos, la misma notoriedad que la precedente y que, con ello, sirva para conformar en el lector, trascendiendo confusos retoricismos o sugestivos reclamos de mercadotecnia, una visión precisa y sagaz del naciente universo biomimético.

El Editor

Introducción

La idea de divulgar al gran público esta obra colectiva tomó cuerpo con la pretensión de reunir algunos de los más destacados trabajos de reflexión teórica y de investigación aplicada llevados a cabo por diversos miembros de la *RI+3 Biomimicry Network (Red Internacional de Estudios sobre Biomímesis)* en los últimos tiempos. Como tal, la red se gestó a finales del mes de abril de 2016, en el marco de la celebración, en Colombia (Bogotá y Leticia) y Brasil (Tabatinga), de un simposio internacional dedicado principalmente a la biomimesis, con las miras puestas en tratar de repensar, más allá del paradigma discursivo dominante, la naturaleza y los potenciales escenarios para su preservación. Es por ello que, desde la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibersitatea (UPV / EHU), la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y la Asociación Amassunu, se convocó a investigadores, expertos, estudiosos, pensadores y activistas de diversas partes del planeta para intercambiar ideas, reflexiones y propuestas sobre las estrategias de la tecnociencia contemporánea para promover y servirse de la inspiración en la naturaleza. Nuestro empeño fue favorecer un escenario teórico propicio para repensar el presente y el futuro de nuestro planeta y con ello, el “puesto” del hombre en el mismo. El resultado ha sido una fusión heteróclita de múltiples miradas, perspectivas y proyectos, no siempre coincidentes en su forma o en su esencia, que han ido madurando colectivamente durante estos dos años. Este volumen supone, en definitiva, el corolario de este fructífero recorrido.

No es lugar éste para trazar con exhaustividad los contenidos desarrollados por cada uno de los autores en esta obra, dejamos plena libertad al lector para que se interne como mejor desee en sus páginas. Pero si por algo hay que destacar este volumen, es por el hecho de que deja patente y pone encima de la mesa los desafíos, problemas y retos más sobresalientes a los que se enfrenta hoy en día el enfoque biomimético. *Redescubriendo el mundo natural. La biomímesis en perspectiva*, más que un libro monográfico, es en realidad un compendio de ideas, retazos, experiencias, debates, reflexiones y propuestas, aún inacabadas y en proceso de construcción. Los 17 capítulos que componen este trabajo abordan temas específicos a partir de una combinación de metodologías y perspectivas de diversa índole. Esta variedad inherente constituye su riqueza y su principal aporte al campo de la biomímesis, cuya elocuencia argumentativa ha permitido su repentina inclusión en el meollo de los debates académicos y políticos sobre medio ambiente, desarrollo, sustentabilidad, tecnología y diseño durante, al menos, los últimos veinte años.

Con todo, no debemos llamarnos a engaño. La biomímesis no supone un hito

novedoso en el apresamiento definitivo de una supuesta mirada desnuda, “especial” y genuina sobre la naturaleza. Ciertamente, mucho antes de que Janine Benyus publicara su obra, *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, considerada por algunos como el detonante del movimiento biomimético, ya se había traído como objeto de atención los graves efectos provocados por la desadaptación del ser humano en relación con su entorno. Los desajustes producidos por las mediaciones tecnocientíficas modernas, por los modos de representar y producir la naturaleza y por el modelo socioeconómico actual, han suscitado la acuciante necesidad de concebir alternativas teóricas y prácticas que puedan viabilizar un reajuste estructural para superar la colisión, que hoy se intensifica a marchas forzadas, entre los sistemas socioeconómicos y los sistemas naturales.

No afirmamos nada que no se haya advertido antes cuando señalamos que, en el centro de esta funesta oposición, se encuentran los procesos de reificación y mercantilización de la naturaleza mediados por una sustracción ontológica del animal humano del conjunto de la biosfera. Pues bien, esta sustracción está produciendo una ruptura metabólica tan contundente que algunos científicos han considerado admisible denominar la actual época geológica con el término de *Antropoceno*. Otros, por otra parte, prefieren hablar de crisis civilizatoria. Ambos casos manifiestan un hecho evidente que sólo puede ser negado por la “razón cínica” más abnegada que guía tanto los regímenes totalitarios como las democracias representativas occidentales, herederas de una biopolítica instrumental predominante que somete la vida a incesantes y traumáticos procesos de dominación y destrucción. El hecho, como lo ha demostrado el *Programa Internacional Geosfera-biosfera* (IGBP por sus siglas en inglés), es que “las actividades humanas están alterando, significativamente, el medio ambiente a escala global” (IGBP, 2004, p. 5, traducción propia). La temperatura, la concentración de CO₂, los flujos de nitrógeno y azufre, la cobertura terrestre, y otros tantos indicadores de la actividad planetaria, están modificándose abruptamente conforme avanza la expansión extractiva del modelo de producción actual.

Esta circunstancia ha motivado cumbres, conferencias y encuentros locales y globales de diversa índole con el propósito de tratar asuntos vinculados, como la educación, el ordenamiento urbano, la agricultura y el modelo de desarrollo. Desafortunadamente, la perspectiva desde la que se aborda dicha problemática está limitada por un sesgo político que impone una frontera normativa desde la que se incentiva la domesticación o la cooptación de toda crítica contra el actual modelo de producción. Afortunadamente, determinados movimientos socioecológicos contemporáneos han llamado la atención, de forma clara y tajante, sobre el inminente riesgo que representa el metabolismo social predominante. En el complejo Sistema Tierra, dentro del cual están incluidos los sistemas sociales – ¡y no al revés! –, se están expandiendo modalidades de desarrollo desigual que afectan

a ecosistemas, animales y comunidades humanas. No es, como sugieren algunos, una deficiencia de la especie humana, una maldición divina o una inevitabilidad del destino; se trata, ante todo, de un problema de gran calado que desde la óptica biomimética se dirime en la cuestión del diseño.

Commoner (1975) advirtió, hace ya varias décadas, que vivimos en dos mundos: el mundo natural, creado por procesos físicos, químicos y biológicos desde hace más de cuatro mil quinientos millones de años, y el mundo creado por nosotros mismos, colmado de casas, vehículos, edificios, carreteras, industrias, vestimentas sintéticas, comida procesada, libros, música y poesía. Pero la idea más sugerente del biólogo norteamericano es que, si bien aceptamos la responsabilidad por los eventos que tienen lugar en “nuestro” propio mundo -la tecnosfera-, no hacemos lo mismo con lo que acontece en el mundo natural -la ecosfera-. De ahí que nuestros diseños se tornaron incompatibles con ésta última: hemos olvidado que somos parte de ella y que es posible establecer una relación sinérgica y cooperativa.

En todo este imaginario sobresale una representación prototípica que marca profundamente nuestra interpretación del proceso metabólico, precisamente en términos de divergencia, que se genera entre el (sub)sistema social y el sistema Tierra, del incesante flujo de materia y energía involucrado en el desarrollo de las fuerzas productivas desatadas por la sociedad capitalista y los ecosistemas sobre los que recaen estos flujos. De hecho, ésta es, justamente, la cesura (con toda su trasfondo epistemológico, político y ético), en la que se instala la reflexión biomimética: la aparente separación entre el “mundo natural” y el “mundo social”. Y a ella, de una u otra forma, hacen referencia los artículos aquí presentes.

Para quienes no estén familiarizados con el término, este libro es una oportunidad para adentrarse en sus complejas y variadas acepciones. Quienes ya lo conocen, encontrarán en cada uno de los capítulos aquí incluidos aportes teóricos y prácticos novedosos y abiertos al debate. Para todos aquellos lectores que, en fin, se aproximen a su lectura, deseamos que este libro inspire reflexiones, enriquezca discusiones y propicie diálogos y prácticas que permitan adentrarse con solidez en nuestra compleja y problemática situación socioecológica.

Carlos Hugo Sierra
Nicolás Jiménez Iguarán

Ecología política de la adaptación y biomímesis en el Antropoceno

Nicolás Jiménez Iguarán

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Omar Ramírez Hernández

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Somos seres sensoriales en una relación metabólica con el mundo circundante. Modificamos ese mundo, y al hacerlo, nos transformamos a través de nuestras actividades y trabajos.

David Harvey, 2000

La biomímesis no puede ser reducida al rol que juega impulsando la acumulación de capital. De hecho, el abordaje de la biomímesis de incorporar principios no humanos a la producción tecnológica puede ofrecer una base conceptual, e incluso técnica, en tanto nos disputamos un metabolismo ecológico, social y político más liberador con la naturaleza, a través de la naturaleza y en tanto naturaleza.

Jesse Goldstein y Elizabeth Johnson, 2015

Biomimicry is indeed a revolutionary concept. However, it is still relatively philosophically under-developed, descriptive and ad hoc in its approach and accordingly piecemeal in its results. Moreover, critical ambiguities lurk in this concept. Until these are brought to light and resolved, biomimicry remains vulnerable to co-optation by as powerful an anthropocentric mentality as that which launched the original industrial revolution and ravaged, in our time, the living constituency of the biosphere.

Freya Mathews, 2011

La respuesta social predominante a fenómenos globales como el cambio climático (particularmente, a nivel institucional, corporativo y estatal), suele estar anclada en principios y metodologías de acción propias de los procesos socioeconómicos que dieron origen y alentaron dichas problemáticas. Esta manía de avanzar desbocadamente por senderos desconocidos de la mano de un discurso desarrollista y de insistir en que nuestra relación con el entorno debe

estar mediada por una mirada mecanicista, ha suscitado hondas cicatrices en los territorios y ha creado las condiciones de lo que hoy se conoce como *Antropoceno*.

El *Antropoceno*, más allá de incentivar entretenidos y nutridos debates académicos, es un concepto que alerta sobre la forma como estamos interviniendo, transformando, ocupando y moldeando los espacios. Los efectos adversos desatados en términos ecológicos, económicos y sanitarios, lejos de ser atribuidos a fuerzas metafísicas o a designios religiosos, se asocian directamente con causas antropogénicas. Por lo tanto, es en el propio devenir político, social y económico donde se ha de asumir un nivel de responsabilidad, tanto en lo que respecta a las problemáticas enfrentadas como en el planteamiento de posibles soluciones. Esto último no significa que las alternativas deban surgir de las dinámicas políticas y económicas hegemónicas, por el contrario, intenta señalar que la definición de la hoja de ruta a seguir demanda amplios debates políticos donde se discuta, entre otras cuestiones, los ajustes del modelo económico.

El cambio climático, como tantos otros fenómenos medioambientales de grandes proporciones, exige asumir una mirada autocrítica del camino recorrido como civilización. Esto conlleva, inevitablemente, la adopción de mecanismos de acción para reducir y controlar los inminentes (y algunas veces irreversibles) escenarios nocivos característicos del *Antropoceno*. Hoy en día, este conjunto de iniciativas se conoce con el nombre de *adaptación*. Este concepto reconoce la existencia de cambios biofísicos de amplio impacto ante los cuales la sociedad, en su conjunto, debe adaptarse con el propósito de reducir sus niveles de vulnerabilidad. Pero este proceso de adaptación no hace referencia a simples ajustes tecnológicos. Parte del proceso reflexivo del camino recorrido implica aprender de los errores, lo que involucra alejarse de las falsas promesas cortoplacistas y repeler aquellas salidas cosméticas que, bajo miradas simplistas, esquivan la complejidad de las problemáticas. Por esta razón, no sorprende que las estrategias de adaptación que reciben actualmente mayores incentivos políticos y económicos se limitan a promover intervenciones exclusivamente tecnológicas, las cuales no logran generar cambios socioeconómicos profundos, capaces de restaurar la resiliencia ecológica del planeta.

En este texto nos reapropiamos de la idea de adaptación en el marco de la ecología política. Esto con el fin de repensar, críticamente, el principio de biomimesis como una estrategia capaz de aportar a la construcción de una sociedad sustentable, en una época plagada de efectos adversos generados por el sistema socioeconómico. La sustentabilidad, en este sentido, se entiende como una práctica emancipadora que atañe a sistemas ecológicos, económicos, tecnológicos, energéticos, culturales y, particularmente, políticos. El apoyo conceptual de lo que hemos denominado *ecología política de la adaptación*, permite entender los procesos de adaptación en clave de los compromisos políticos que los promueven y de los

objetivos normativos que orientan su planificación, organización y legitimación a través de proyectos de desarrollo.

Desde una perspectiva diferente a la del *adaptacionismo genómico* (Leff, 2014), la *adaptación elitista* (Cano, 2017) y la *adaptación tecnocrática o empresarial* (Taylor, 2015), proponemos unos criterios de adaptación que permitan *rediseñar* la tecnósfera para frenar los choques entre los procesos biofísicos del planeta y el desarrollo social. Estos criterios no sólo tienen el propósito de aportar soluciones al *problema del diseño*, es decir, al desajuste en el metabolismo social, sino también de promover la superación de los desarrollos geográficos desiguales y el cinismo con el que se está enfrentando el cambio global.

En este orden de ideas, el presente artículo pone en cuestión los intereses en juego de los procesos dominantes de adaptación, denunciando la lógica instrumental y corporativa del capitalismo como factor detonante de un metabolismo social que soslaya permanentemente las fronteras ecológicas planetarias. Esto supone reconocer la responsabilidad histórica y deliberada del *Antropoceno*, al margen de posturas totalizantes que delegan dicha responsabilidad a la totalidad de la especie humana.

Al final del texto presentamos algunas ideas, a manera de conclusión, que ilustran un abordaje alternativo de la biomímesis en el marco de la ecología política de la adaptación. Así, señalamos la importancia de reorientar las acciones adaptativas para contener la degradación ambiental y la necesidad de rediseñar la tecnósfera bajo principios de justicia social y ecológica.

El Antropoceno: ¿Qué está en juego?

Recién iniciado el siglo XXI, el climatólogo holandés y premio Nobel de química Paul Jozef Crutzen introdujo, en una discusión del Comité Científico del *Programa Internacional Geosfera-Biosfera* (IGBP por sus siglas en inglés), un término para definir nuestra época: el *Antropoceno*¹. El término surgió con el propósito de explicar los cambios que se estaban produciendo en el planeta como resultado de las actividades antrópicas. Si bien su estatus científico como *época geológica* continúa en debate, lo cierto es que ha funcionado como un catalizador de discusiones sobre el alcance y la escala de los impactos producidos por la especie humana en el planeta Tierra (Crutzen & Stoermer, 2000; Brondízio & Syvitski, 2016).

El *Antropoceno* indica, en términos generales, que “las actividades humanas empezaron a afectar el medio ambiente a escala global” (Steffen, Crutzen & McNeill, 2007, p. 616). De acuerdo con este concepto, los seres humanos nos hemos convertido en una fuerza tan potente en el planeta que estamos generando alteraciones muy profundas, incluso a nivel geológico. Steffen, Crutzen & McNeill (2007,

p. 614) advierten, en este sentido, que estamos siendo empujados a una especie de *terra incognita* en la que nunca antes habíamos estado. Los riesgos ambientales son cada vez mayores, lo que aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas y, en consecuencia, la proliferación de desastres. Hemos alterado profundamente nuestros espacios vitales y, si no cambiamos de estrategia, nuestra supervivencia, como la de muchas otras especies, se verá gravemente comprometida.

Ahora bien, el IGBP publicó, en 2004, un informe sobre el *Cambio global y el sistema Tierra* (Steffen *et al.*, 2004)², donde se describe al planeta como un *sistema autorregulado*, dentro del cual la *biósfera*³ cumple funciones primordiales. Esta perspectiva sistémica (Odum, 1953; von Bertalanffy, 1969) ha provocado cambios importantes en la forma de analizar nuestras interacciones con el mundo no-humano y ha resaltado una idea central: vivimos en un planeta vivo del que formamos parte. Esto fue advertido de forma temprana por diversos pueblos ancestrales al referirse al planeta como *Pacha Mama* (Valencia, 1999) o *Madre Tierra* (Wermus, 2002), y más recientemente por autores como Capra (1996) y Lovelock (2007), quienes trabajaron los conceptos *Trama de la vida* e *Hipótesis Gaia*, respectivamente.

Si bien es cierto que la biósfera posee una gran capacidad de resiliencia, incluso cuando la pérdida de biodiversidad es significativamente alta, los impactos antropogénicos están amenazando fuertemente su estabilidad (Zalasiewicz *et al.*, 2015). Esto es resultado, en buena medida, del predominio de la visión mecanicista del mundo que redujo teóricamente la complejidad del planeta. Whitehead (1978, pp. 208-215) identificó el triunfo de esta visión en la separación conceptual que se produjo entre el *mundo físico* y el *mundo vivo*. Desde esta perspectiva, la naturaleza y todos sus organismos se convierten en *objetos disponibles*. En palabras de Horkheimer y Adorno (2009, p. 60) “lo que los hombres quieren aprender de la naturaleza es a servirse de ella para dominarla por completo”. El conocimiento se convierte en un mecanismo de poder y control que media los procesos de intercambio entre la especie humana y la naturaleza.

Uno de los resultados adversos del predominio de la visión mecanicista es la expansión (dimensión espacial) y la intensificación (dimensión temporal) de las alteraciones ecológicas, las cuales sobrepasan la capacidad de recuperación de la biósfera. Como afirma Latour (2017: versión Kindle),

Un día es el ascenso de las aguas; otro, la esterilización de los suelos; por la noche es la desaparición acelerada de los bancos de hielo; en el resumen informativo de las 20, entre dos crímenes de guerra, nos enteramos de que miles de especies van a desaparecer incluso antes de haber sido debidamente clasificadas; cada vez las mediciones del CO₂ en la atmósfera son peores, más aún que las del desempleo; cada año que pasa, nos dicen que es el más cálido desde la inauguración de las estaciones meteorológicas; el nivel de los mares no hace sino ascender; la franja costera está

cada vez más amenazada por las tormentas de primavera; en cuanto al océano, cada campaña de medición lo encuentra más ácido.

Para explicar estos acontecimientos, que no son otra cosa que un conjunto de procesos de intercambio entre la especie humana y la naturaleza, acudimos al concepto de *metabolismo*, el cual hace referencia a la apropiación social de materia y energía que luego se deposita en forma de desecho en los espacios naturales (Toledo, 2013, p. 47). Se trata de un circuito de intercambio que tiene sus ritmos, sus intensidades y sus contenidos particulares dependiendo del tiempo y el espacio en que se desarrolle. Este intercambio, hoy conocido como *metabolismo social*, está determinado por los niveles de transformación espacial, las necesidades humanas, las relaciones sociales de producción y las formas en que se *produce* la naturaleza (Toledo, 2013).

De esta forma, la actual magnitud de la huella ecológica del ser humano no es una regla inquebrantable, ni mucho menos un proceso reducido a un estímulo natural. Es, siguiendo a Moore (2014), el resultado de un modo particular de *producir* la naturaleza y *producirnos* a nosotros mismos como especie. Así, el proceso de apropiación de materia y energía de la naturaleza (*input*) y su posterior deposición en espacios naturales en forma de desechos y residuos (*output*), está determinado, según Toledo (2013, p. 51), por “instituciones, formas de conocimiento, cosmovisiones, reglas y acuerdos, saberes tecnológicos, modos de comunicación y de gobiernos y formas de propiedad”. Dicha apropiación puede darse de tres formas: a) aquella que se realiza sin producir cambios sustanciales en los ecosistemas; b) aquella que «desarticula» o «desorganiza» los ecosistemas; c) y aquella en las que los ecosistemas son conservados para proteger determinadas especies, patrones o procesos (Toledo, 2013, pp. 55-56). La segunda forma de apropiación es la que define mayoritariamente a nuestra sociedad contemporánea. Los sistemas socioeconómicos que hemos diseñado nunca antes habían estado tan desarticulados de la biósfera como lo están hoy en día. Riechmann (2006, p. 73) captó este problema y lo formuló en términos de una *tecnósfera mal diseñada*.

En este punto es pertinente hacer una aclaración: al hacer referencia a la dicotomía *sociedad / naturaleza* para problematizar la actual situación ecológica, tenemos que dejar claro que no estamos afirmando que la especie humana esté *por fuera* de la naturaleza. Por el contrario, somos agentes activos embebidos (*embedded*) en un sistema o trama de vida. A esto hace referencia la noción de metabolismo, en tanto “concepto biológico que se refiere a los procesos internos de un organismo vivo” (Fischer-Kowalski & Haberl, 2000, p. 21). Por eso es importante entender que los impactos socioambientales suponen *pretender separar* a la especie humana del conjunto del sistema Tierra. En el libro *Elementos fundamentales para la crítica de la economía política* (Grundrisse), Marx (2001, p. 449) identificó este

problema de la siguiente forma:

Lo que necesita explicación, o es resultado de un proceso histórico, no es la unidad del hombre viviente y actuante con las condiciones inorgánicas, naturales, de su metabolismo con la naturaleza [...], sino la separación entre estas condiciones inorgánicas de la existencia humana y esta existencia activa, una separación que por primera vez es puesta plenamente en la relación entre trabajo asalariado y capital.

Es así como en un tiempo muy corto pasamos de un metabolismo relativamente orgánico a un metabolismo tecno-industrial que, sobre la base del paradigma tecnocientífico, desata notorios y significativos impactos sobre la biósfera (Hamilton & Grinevald, 2015), lo que impone desafíos importantes para la sustentabilidad de la sociedad (Riechmann, 2006, p. 148). Como afirma McKenzie Wark, el *Antropoceno* no es solo una forma particular de metabolismo, sino un conjunto de *rupturas metabólicas*, “donde una molécula tras otra es extraída por medio del trabajo y la técnica para producir cosas funcionales a la sociedad, pero donde los desechos no retornan para que el ciclo se renueve por sí mismo” (Wark, 2015. Versión Kindle. *La traducción es nuestra*).

Es esto, justamente, lo que necesitamos pensar en el *Antropoceno*: el proceso de *ruptura* que desata el metabolismo social que hemos adoptado y que avanza violentamente contra las fronteras ecológicas planetarias. Esto nos obliga a construir estrategias para adaptarnos a esas fronteras ecológicas, con el fin de reinsertar nuestros sistemas en ellas, pero también para *ajustarlas* a «nuestros intereses» como organismos constitutivos de la biósfera (Jiménez & Ramírez, 2016). La especie humana no sólo debe adaptarse a su medio, el medio también se ajusta a nosotros en el proceso mismo de la vida⁴.

Lo que está en juego no es nuestra capacidad para «alterar la naturaleza», como lo sugieren conceptos como el de *Gaia* y *Trama de la vida*. Lo que verdaderamente demanda nuestra atención son los *intereses sociales* que promueven, sustentan y perpetúan el metabolismo contemporáneo y su materialización concreta en la construcción de la tecnósfera. Bruno Latour expone el problema de forma sencilla, de la siguiente manera: “cada organismo manipula intencionalmente lo que lo rodea ‘para su propio interés’: todo el problema consiste, desde luego, en definir ese interés” (Latour, 2017. Versión Kindle). Los ecosistemas también son producidos por los organismos que los habitan y, en este orden de ideas, no hay una estructura ecológica trascendente que imponga criterios absolutos de adaptación, especialmente cuando de sistemas humanos se trata.

Si el *Antropoceno* es el resultado de los sistemas que hemos diseñado y de los intereses que los inspiran, ¿cómo rediseñar una tecnósfera que permita desacelerar las rupturas metabólicas en aras de un metabolismo social sustentable? ¿Qué teoría resulta ser la más adecuada para llevar a cabo esta tarea? ¿Qué tipo de *ruptura*

epistemológica debemos promover para contrarrestar la proliferación de rupturas metabólicas nocivas para el sostenimiento de la vida en el planeta? ¿Qué principios orientan la forma en que nos reapropiamos socialmente de la naturaleza? Estas preguntas son las que le dan sentido a una *ecología política de la adaptación*. Como afirmábamos en otro lugar, “abordar el problema de la adaptación desde la ecología política es clave porque introduce un factor de contingencia, según el cual los niveles de degradación ambiental pueden acentuarse o minimizarse conforme a los intereses sociales que guían las estrategias de adaptación” (Jiménez & Ramírez, 2017, p. 58).

Ahora bien, este factor de contingencia no solo resalta el *carácter histórico* de la degradación ambiental: devela también las *relaciones de poder* que la producen. Quienes estamos comprometidos con la ecología política no podemos aceptar, como sugiere el *Antropoceno*, que la responsabilidad de esta crisis caiga sobre la totalidad de la especie humana. Tal como señalan Carril, Cardoso & Marcellesi (2017, p. 4) en el número 53 de la revista *Ecología Política*, “detrás de la revelación ontológica del concepto de Antropoceno [de ser *todos* responsables] parece haber un engaño, un tejido intencional en el lenguaje que construye una realidad adaptada a través de la transformación de un concepto en un discurso”.

En este orden de ideas, y antes de abordar la cuestión sobre la tecnosfera a la luz de la ecología política de la adaptación y del concepto de biomímesis, queremos hacer un breve comentario sobre la vigencia de lo que el filósofo alemán Ernst Bloch llamó *el principio esperanza*. Hoy en día resulta imprescindible volver a creer en la posibilidad de construir un orden social que reivindique la justicia social y ecológica. En otras palabras, recuperar la esperanza en que es posible construir proyectos colectivos diversos, capaces de modificar el actual metabolismo social de forma concreta.

¿Cinismo o esperanza?

[L]a esperanza fraudulenta es uno de los mayores malhechores y enervantes del género humano, mientras que la esperanza concreta y auténtica es su más serio benefactor.

Ernst Bloch, *El principio esperanza*, 1977

En la novela distópica, *1984*, George Orwell (2013) describe una sociedad caracterizada por una forma de *engaño consciente* que consiste en pensar, al mismo tiempo, en dos opiniones mutuamente contradictorias. A diferencia de la *falsa conciencia*, donde el sujeto actúa *sin saber* lo que está haciendo, esta forma de autoengaño procede de manera contraria: “*negar* la existencia de la realidad objetiva sin dejar de saber, ni por un instante, que existe esa realidad que se niega”

(Orwell, 2013). En su *Crítica de la razón cínica*, Sloterdijk (2013) analiza un proceso similar. Según el filósofo alemán, la *ideología* no tiene ya la forma de falsa conciencia, sino de una reacción cínica donde el sujeto es plenamente consciente de estar falseando la realidad. Como señala Žižek (1989, pp. 25-26), “se conoce la falsedad muy bien, se es consciente del interés particular escondido detrás de una universalidad ideológica, pero aun así *no* se renuncia a ella”.

ExxonMobil es un ejemplo de este cinismo. Siendo una de las compañías petroleras más grandes y poderosas del mundo, lleva más de 28 años financiando *Think tanks* con el propósito de refutar y deslegitimar el cambio climático. Si no fuera porque sabe perfectamente que el cambio climático es una realidad no destinaría tanto tiempo y tantos recursos para negarlo. Lenny Bernstein, quien trabajó para la empresa durante 30 años, afirmó que “Exxon sabía, años atrás [1981], que el cambio climático era una realidad; una realidad que aceptaban en lugar de negarla como lo habían hecho públicamente” (Johnston, 2015).

Pero hay quienes llevan el cinismo mucho más lejos. No es una casualidad que los sectores económicos más poderosos del mundo, que otrora rechazaron las problemáticas ambientales, sean hoy los grandes promotores del «desarrollo sostenible». Para el Banco Mundial, por ejemplo, el cambio climático pudo haber sido una carga incomoda, pero hoy es una «oportunidad de desarrollo». Los momentos de crisis financiera, social y ambiental se convierten, así, en oportunidades para impulsar procesos innovadores de crecimiento económico (The World Bank, 2013; Smith, 2006).

En *La doctrina del shock: el auge del capitalismo del desastre*, Naomi Klein recurre a la siguiente observación de Milton Friedman para explicar cómo los sectores que dominan la economía mundial aprovechan los momentos de crisis para imponer su ideología: “sólo una crisis -real o percibida-”, observa Friedman, “da lugar a un verdadero cambio [para hacer que] lo políticamente imposible se vuelva políticamente inevitable” (Klein, 2007, p. 27). El *shock*, o la crisis, produce *periodos maleables* que el capitalismo aprovecha para imponer sus ideas sobre “un tapiz en blanco, limpio y amplio” en el que se pueda reconstruir el mundo a su imagen y semejanza. “En esos periodos maleables”, señala Klein, “los artistas de lo real sumergen sus manos en la materia dócil y dan principio a su labor de remodelación del mundo” (Klein 2007, p. 46). Así, la *producción* de la naturaleza está determinada por estos mecanismos.

El mantra neoliberal con el que se satura la realidad social, «*there is no alternative*», se reactualiza permanentemente para mantener vivo el mito del crecimiento económico y la imposibilidad de construir otro modelo diferente al capitalista. Si este mito no tuviera un impacto real en el metabolismo social, no tendríamos que preocuparnos por él. ¿Dejaremos, entonces, que el cinismo y una falsa ingenuidad continúen definiendo el destino del planeta? ¿No tenemos acaso la responsabi-

lidad de alimentar la esperanza en otro futuro y afirmar que sí hay alternativas?

Ecología política: el rediseño de la tecnosfera

Tenemos la excepcional tarea de desafiar el negacionismo y lo que Leff (2014) denomina el *adaptacionismo genómico*, para incluir otros acuerdos sociales sobre la forma en que queremos vivir. Desafortunadamente, y a pesar de las evidencias científicas sobre los límites biofísicos del planeta, la premisa del crecimiento económico «ilimitado» sigue orientando el ritmo del metabolismo social en nuestra época. El modelo económico actual opera *desconociendo* que es un subsistema del sistema natural finito. Pese a todos los avances que han tenido las ciencias naturales durante los últimos 60 años, es muy poco lo que aun sabemos acerca de la naturaleza. Nos hemos servido de ella para explotarla, dominarla y destruirla, pero también para justificar el egoísmo y edificar sociedades injustas y desiguales (Singer, 1999). Feyerabend (2005, p. 17), en su libro *Adiós a la razón*, señala que la tarea del conocimiento en la actualidad tiene que estar en función de la supervivencia de los seres vivos y de la paz entre los seres humanos y entre éstos y el conjunto de la naturaleza. Esto nos impone el reto de disputarnos tanto un proyecto de sociedad que nos permita reestructurar nuestras relaciones metabólicas, como el mismo concepto de sustentabilidad que debe actuar como derrotero de nuestras intervenciones.

En este sentido, la ecología política (en tanto campo de acción social multidimensional) ha ido comprendiendo la importancia teórico-práctica que tienen las experiencias concretas de los movimientos sociales y de los individuos en la búsqueda por transformar la realidad. David Harvey utiliza la figura del *arquitecto insurgente* para explicar al sujeto de esa transformación. De acuerdo con el antropólogo y geógrafo inglés, “el arquitecto lucha para abrir nuevos espacios de posibilidad para futuras formas de vida social [...], en un mundo lleno de contracciones, de múltiples oposiciones [...] y de desarrollos geográficos desiguales” (Harvey, 2000, p. 119).

En este orden de ideas, líderes sociales como Mariátegui, Chico Mendes y Berta Cáceres (solo por mencionar algunos ejemplos del contexto latinoamericano) son arquitectos en ese preciso sentido. Sus vidas fueron el resultado de circunstancias concretas muy injustas ante las cuales respondieron con vocación crítica y transformadora. El *Ayllu* incaico, la necesidad de orientar el progreso sin destrucción y el llamado a construir sociedades capaces de coexistir de manera justa, digna y por la vida, pueden ser interpretados como esfuerzos arquitectónicos por *rediseñar tecnosferas mal diseñadas*.

Ahora bien, estas experiencias concretas son la razón para que algunos repre-

sentantes de la ecología política afirmen que este campo se caracteriza más por los compromisos que asume, que por su objeto de estudio o por los criterios socio-espaciales con los que opera. Siguiendo a Perreault, Bridge y McCarthy (2015, pp. 7-8) son tres los compromisos que caracterizan a la ecología política:

- a) un *compromiso teórico* con la teoría crítica social y la teoría post-positivista, desde las cuales se abordan las diferentes formas en que es apprehendida y construida la naturaleza por diversos esquemas de conocimiento y organización social;
- b) un *compromiso metodológico* con la investigación cualitativa, la observación directa y la investigación-acción participativa, sin dejar de lado los métodos cuantitativos y el análisis de documentos;
- c) y un *compromiso político* con la justicia socioambiental y la transformación política estructural. La ecología política tiene un carácter normativo explícito que intenta comprender los conflictos socioambientales y ecológico-distributivos, así como las luchas de los sectores marginados y excluidos.

En ese sentido, y parafraseando a Marx, la ecología política no sólo pretende entender el mundo, sino transformarlo.

Hacia una ecología política de la Biomímesis

Una de las cuatro leyes de la ecología propuestas por Commoner (2014) es que *la naturaleza sabe hacer las cosas mejor*. Bajo este referente conceptual, en los últimos años se ha venido posicionando con fuerza un campo del conocimiento que pretende incorporar enseñanzas “extraídas” de la naturaleza en diferentes campos del diseño. A esta *ciencia*⁵ se la conoce con el nombre de biomímesis [*Biomimicry*].

En términos generales, la biomímesis busca estudiar los modelos de la naturaleza para imitarlos y resolver problemas humanos (Benyus, 1997). En la década de los noventa, la biomímesis estuvo asociada a la robótica, contribuyendo significativamente a la construcción de artefactos y máquinas encargadas de desarrollar funciones específicas. Con el tiempo, el interés en esta disciplina fue extendiéndose a diferentes campos de la ciencia aplicada como el perfeccionamiento de materiales (Tatman *et al.*, 2015), el mejoramiento de la movilidad (a partir de la optimización de la cinética de movimiento y la eficiencia energética) (Lurie, 2014), el diseño arquitectónico (Zari, 2010), la hidrodinámica marina (Chu, 2016), la ingeniería de tejidos (Fernandez-Yague *et al.*, 2015), entre otras.

Autores como Benyus (1997), Commoner (1992) y Riechmann (2006) han insistido en la necesidad de que la sociedad aprenda de la naturaleza para incorporar en

los sistemas humanos principios que permitan adaptarse de manera más eficiente y sustentable. El punto de partida es la interpretación de la naturaleza como un *modelo*, a partir del cual se obtiene información útil que puede ser aplicada a *diseños humanos* con el propósito de solucionar determinados problemas. Nuestro planteamiento en este texto es que no todos los diseños que aplican el principio de biomímesis son necesariamente sustentables ni conllevan indefectiblemente a prácticas transformadoras del metabolismo actual. Esto se explica, como se desarrollará a continuación, porque algunos diseños biomiméticos están orientados por criterios de eficiencia económica y, por lo tanto, operan bajo la lógica del mercado, sin interpelar las lógicas que alimentan la insustentabilidad del *Antropoceno*.

¿Terra incognita o terra economica?

¿Cómo se construye la naturaleza *desde* la biomímesis? El libro de Janine Benyus, *Biomímesis: innovaciones inspiradas en la naturaleza*, es uno de los trabajos más representativos en el campo de la biomímesis. En este libro, Benyus (1997, p. 2) cuestiona la lógica instrumental de la naturaleza y propone que, en lugar de pensar en aquello que podemos *extraer* de ella, pensemos en aquello que podemos *aprender* de ella. Algunos consideran que se trata de un libro revolucionario “que dispara la imaginación con la excitante posibilidad de tomar los mejores diseños del almacén de invenciones de la naturaleza para aplicarlos al desafío de construir un futuro creativo y sustentable” (citado en Benyus, 1997).

Esto supone entender a la naturaleza como un *modelo*, una *medida* y un *mentor*. De los ecosistemas y los organismos vivos que en ellos habitan, podemos extraer conocimientos prácticos que nos permitan resolver problemas humanos. Esta es una práctica que siempre ha acompañado a la humanidad de una u otra forma, pero lo que propone Benyus es la apropiación consciente de este principio para *enverdecer* la economía: “en efecto, [la biomímesis] puede colocar un pulgar verde en la mano invisible del capitalismo propuesta por Adam Smith” (Benyus, 1997).

Esto coincide con las proyecciones que los organismos de cooperación internacional hacen en relación con las nuevas tecnologías. La Estrategia de Crecimiento Verde de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), por ejemplo, incorpora la biomímesis y la biotecnología como instrumentos útiles para depurar los procesos de degradación ambiental que se derivan del crecimiento económico (OCDE, 2001). Sostienen que un *cambio de paradigma* tecnológico y productivo, inspirado en los procesos naturales, es necesario. De acuerdo con la OCDE, la biomímesis es “el nombre acuñado para este abordaje en el cual los sistemas de producción industrial imitan la naturaleza” (OCDE,

2001, p. 10). Desde esta perspectiva, la biomímesis busca construir una industria verde que obtenga los beneficios de la naturaleza, sin destruirla (Goldstein, y Johnson, 2015, p. 73).

Al igual que la bioeconomía, la biomímesis es optimista en las soluciones que el mercado pueda ofrecer a los problemas ambientales. Desde la década de los 90 del siglo pasado, la biomímesis se ha posicionado como un instrumento de innovación verde que responde a la necesidad de producir nuevas fuentes de riqueza económica y, al mismo tiempo, de promover la conciencia ambiental. Los niveles de productividad alcanzados con la biomímesis, en diversos sectores de la industria, son notables. La organización liderada por Benyus, *Biomimicry 3.8*, es un ejemplo de la rentabilidad que puede alcanzarse imitando la naturaleza. En el marco de una economía de mercado, donde impera la competitividad empresarial y los derechos de propiedad sobre la naturaleza, esta organización se encarga de identificar procesos biológicos que sirvan de inspiración para emprender proyectos rentables. Así entendida, la biomímesis se inscribe en la lógica de la productividad económica.

Desde esta perspectiva, la naturaleza nos provee de nuevos conocimientos y materiales, de forma tal que surgen innovadores insumos y se obtienen novedosos diseños. Sin embargo, en una lógica mercantil y de metabolismo social acelerado, estos eventos recrean los procesos de emplazamiento de la naturaleza, dando forma a nuevas técnicas de instrumentalización. De esta manera, la sustentabilidad ambiental queda subordinada a los designios del desarrollo económico (OCDE, 2001). Allison Bennett & Cas Smith (2011), consultoras en diseños estratégicos, señalan que,

La biomímesis ofrece una ventaja estratégica para el diseño, la investigación y el desarrollo de productos sustentables [...] La biomímesis está impactando una multitud de industrias, y está expandiendo mercados alrededor del mundo.

En este orden de ideas, podríamos decir que *la biomímesis es una estrategia de acumulación de capital*. De acuerdo con Neil Smith (2006, p. 25),

El mercado ha retomado y recolonizado las prácticas ambientalistas. El irreconciliable antagonismo [naturaleza/capital] es reemplazado por la colaboración financiera: “lo que es amable con la naturaleza es también amable con las ganancias” [...] la comodificación y financiarización de la naturaleza, “en su conjunto”, marca una nueva fase de producción de la naturaleza.

Podríamos afirmar que la biomímesis subordina todos los procesos de investigación y producción del conocimiento al mercado, tomando la naturaleza como una fuente de inspiración inmaterial e ilimitada. El acceso a la naturaleza, enten-

dido como la apropiación de un conjunto de saberes que potencialmente pueden ser transformados en capital, depende del éxito de su proceso de privatización intelectual. Goldstein y Johnson (2015, p. 76) advierten que “cualquier promesa que sugiera que la producción biomimética va a generar más ‘relaciones simbióticas, mucho más mutualismo, [y] mucha más cooperación’ no parece factible, ya que los procesos y productos biomiméticos están incrustados e implementados como propiedad privada”.

La industria biomimética se está convirtiendo en un factor de cambio económico al conjugar el conocimiento biológico con la ingeniería comercial. En el año 2010, el *San Diego Zoo Global* publicó un informe en el que señalaban que, a partir del 2025, el campo de la biomimesis podría llegar a representar alrededor de \$300 billones de dólares anuales en el PIB de Estados Unidos (San Diego Zoo Global, 2010).

Podríamos hablar, entonces, de una *biomimesis corporativa*, en tanto parte del supuesto de que el crecimiento económico y la sustentabilidad ambiental no tienen que ser opuestos. Desde esta perspectiva, la biomimesis se enmarca en el metabolismo tecno-industrial al que hacíamos referencia anteriormente. En lugar de introducir principios que nos permitan ajustar el metabolismo material e inmaterial de nuestras sociedades para reconciliar nuestros excesos cuantitativos, la biomimesis los profundiza creando *nuevas naturalezas* susceptibles de ser explotadas y privatizadas a través de formas «novedosas», «innovadoras» y «creativas».

En este orden de ideas, la biomimesis busca incrementar la rentabilidad y, paradójicamente, ayudar a mejorar el medio ambiente. Sin embargo, lo verdaderamente paradójico es que la oposición entre crecimiento económico y sustentabilidad parece haberse diluido. La *ingenuidad humana* funciona muy bien, ya sea para negar o afirmar los problemas humanos. Hoy en día, los problemas ambientales no son un problema para el *establishment*. Al contrario, representa un factor de crecimiento y acumulación de capital muy rentable. El capitalismo se adapta a las crisis que él mismo produce; por eso la llamada crisis ambiental parece representar un nuevo dominio de inversión económica.

Así las cosas, Goldstein (2012) sostiene que la naturaleza producida por la biomimesis queda configurada como *terra economica* siempre disponible para ser utilizada como mercancía. Quizá la *terra incognita* a la que nos empujan las actividades humanas no sea tan desconocida después de todo. Llevamos más de cinco siglos bajo una lógica de *economización del mundo* (Leff, 2005) de la cual no nos hemos liberado aún pero que conocemos muy bien.

Conclusiones: la biomimesis como estrategia de adaptación

¿Podemos imaginar una economía que responda a nuestros anhelos de justicia social y que, al mismo tiempo, deconstruya la infraestructura de la catástrofe ambiental que hemos instaurado? ¿Qué formas de conocimiento debemos movilizar para continuar el proceso de construcción y reconstrucción de los sistemas humanos?

Jesse Goldstein y Elizabeth Johnson, 2015

Las relaciones dialécticas y metabólicas que tenemos con la naturaleza y, a través de ella y de manera particular, con la naturaleza humana (con sus cualidades y significados especiales), debe ser el fundamento de lo que nosotros, como arquitectos de nuestro futuro y destino, podamos y queramos lograr.

David Harvey, 2000

El problema es saber de qué forma se va a vivir de aquí en adelante sobre este planeta, en el contexto de la aceleración de las mutaciones técnico-científicas y del considerable crecimiento demográfico.

Félix Guattari, 2000

Hay una contradicción evidente entre la aplicación de la biomimesis que abordamos anteriormente y la idea de sustentabilidad ambiental. Como afirman Jesse Goldstein y Elizabeth Johnson, “la biomimesis pone a funcionar a la naturaleza como un participante activo en el negocio del desarrollo social y económico, haciendo que la reproducción de la vida sea equiparable a la expansión del capital” (Goldstein & Johnson, 2015, p. 73). Mientras la biomimesis funcione bajo los criterios del mercado no podrá contribuir significativamente a la construcción de una tecnosfera sustentable. Aprender de la naturaleza para hacer negocios no contribuye, en ningún sentido, a producir un metabolismo social sustentable. Pero hay otras posibilidades desde las cuales podemos aplicar este principio.

En efecto, así lo han expuesto Lewis Mumford (1992) y Barry Commoner (1992) y más recientemente Jorge Riechmann (2006) y Jesse Goldstein (2012), entre otros. Estos biólogos, sociólogos, ecólogos y filósofos, en su mayoría de orientación marxista, han señalado la importancia de *imitar* a la naturaleza a la hora de reconstruir sistemas humanos. La «economía centrada en la vida» que propuso Mumford (1992, p. 324) es un claro ejemplo de esto.

Ante la aparición del *Antropoceno* como una nueva época geológica, aún no confirmada, pero por lo pronto muy sugestiva en tanto concepto sociológico, es necesario repensar los criterios desde los cuales estamos *haciendo* el mundo. La ecología política nos puede orientar en la tarea de encausar la biomimesis como una estrategia para *(re)hacer* el mundo bajo criterios de sustentabilidad que satisfagan los parámetros de funcionamiento ecológico del planeta.

El binomio *bio-mimesis* hace referencia a la vida o naturaleza, *bios*, y a la acción

de imitar, *mimesis*. Lo que cabe señalar es que ambos conceptos están determinados histórica y socialmente. Con esto no estamos sugiriendo que la naturaleza sea una construcción social carente de realidad objetiva. Lo que estamos señalando es que la sociedad, al estar embebida *en* la naturaleza, interactúa permanentemente en ella alterando física y conceptualmente los demás elementos que la componen. De manera que, para nosotros como especie humana, la «naturaleza» no siempre significa lo mismo. Su significado depende del contexto social, de las relaciones de poder, del paradigma científico dominante, de las relaciones sociales de producción, etc.

En este orden de ideas, problematizar el concepto de «naturaleza» construido desde la biomimesis corporativa, implica cuestionar la matriz ideológica, epistemológica y política que le confiere sentido. La «naturaleza», en tanto *terra economica o banco de ideas*, está sometida a ciertas lógicas “cuya fértil potencialidad acaba siendo materializada en un sistema procedimental de diseño e innovación para ser introducida, posteriormente, dentro de la lógica competitiva del mercado” (Sierra & Kuiru, 2014, p. 92). El *diseño* de la tecnósfera está subordinado a las formas en que se construye y sistematiza la naturaleza y a las relaciones de poder que las sustentan y promueven. Las explicaciones dominantes sobre la relación sociedad / naturaleza tienen un carácter político que casi siempre se oculta bajo una supuesta «neutralidad».

La llamada crisis ambiental es el síntoma de contradicciones políticas que no se pueden observar tan fácilmente y que, por esa misma razón, son ignoradas en la mayoría de los casos. De cómo identifiquemos y cuestionemos los *poderes* detrás de los supuestos «consensos» a los que hemos llegado como sociedad, dependerá la posibilidad de superar eficazmente la crisis ambiental que hoy estamos viviendo. En este sentido, el principio de biomimesis puede jugar un papel importante, ya no en función de los procesos de acumulación de capital, sino en la construcción de una economía realmente sustentable. *La racionalidad alternativa* de Mariátegui, por ejemplo, nos invita a reivindicar economías más orgánicas que nos puedan servir como modelo para construir sistemas humanos adaptados a las condiciones ecológicas y a los desafíos sociales, políticos y éticos existentes.

Por otro lado, es necesario replantear la metodología desde la cual opera la biomimesis corporativa enfocada en extraer conocimientos de la naturaleza para hacerlos funcionales a los intereses del mercado. Orientar los resultados de la biomimesis a un objetivo social colectivo depende de los métodos con los que se aborde la realidad y los propósitos que guíen la investigación. Sin un compromiso metodológico para comprender la complejidad de las relaciones simbióticas entre sociedad y naturaleza e identificar sus tensiones, contradicciones y contingencias, nuestra perspectiva continuará inscrita en la mera instrumentalización económica (Jiménez & Ramírez, 2016).

Así las cosas, la biomímesis corporativa no da lugar a nuevas prácticas políticas. Al contrario, intensifica la violencia de las ya existentes. La sustentabilidad requiere una renovación de las prácticas políticas que nos permita disputar otros proyectos de sustentabilidad basados en una comprensión del metabolismo y en una caracterización de la realidad que tenga en cuenta su complejidad. Hay que reconocer que los problemas de deterioro ambiental son causa y efecto de conflictos políticos, pero también inspiran marcos interpretativos de la naturaleza y orientan el despliegue de diseños estructurales que impulsan procesos metabólicos con el potencial de producir cambios cualitativos en la naturaleza.

Esto nos ubica en la definición que Riechmann (2006, p. 201) hace de biomímesis como “una estrategia de *reinserción de los sistemas humanos dentro de los sistemas naturales*”, para ajustar los primeros a las condiciones del sistema Tierra y así reconstruir ecológicamente la economía. Esto supone una reflexión profunda sobre qué tipo de acciones tenemos que llevar a cabo para generar este proceso de ajuste y reinserción.

NOTAS

¹ El término fue utilizado anteriormente en el siglo XX por el geólogo soviético Aleksei Petrovich Pavlov (1922) y por el biólogo marino estadounidense Eugene Stoermer (1980), pero sólo con Crutzen logró posicionarse con fuerza. Hasta la fecha, se han publicado libros y artículos, novelas e incluso trabajos musicales sobre el tema.

² El informe está publicado en inglés como *Global Change and Earth System: A Planet Under Pressure*.

³ Vladimir Vernadsky utilizó este término para referirse a la superficie de la Tierra donde se produce y habita la vida. Incluye la litosfera, la hidrosfera y la troposfera.

⁴ El concepto de «naturaleza» usualmente hace referencia a aquello que es contrario a «la cultura» o a «lo humano». Esta definición es común en los círculos del ambientalismo conservacionista y preservacionista de principios del siglo XX.

⁵ En el trabajo de Janine Benyus se hace referencia a la biomímesis como ciencia. Sin embargo, para nosotros es un tema muy debatible, por lo que preferimos entenderla como un campo, una estrategia o un principio.

BIBLIOGRAFÍA

- BENYUS, J. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by Nature*. Nueva York: Harper Collins Publishers.
- BERNETT, A. & SMITH, C. (2015) Nature and Business: Developing a Sustainable Society Together. *Biomimicry Institute*. Obtenido de https://biomimicry.org/nature-business/#.V_wLUvnhBD8 (consultado en agosto del 2017).
- BLOCH, E. (1977). *El principio esperanza*. Madrid: Aguilar.
- BRONDIZIO, E. & SYVITSKI, J. (2016). Editorial: The Anthropocene. *Global Environmental Change*, 39, 316-317.
- CANO, O. (2017). Capitaloceno y adaptación elitista. *Ecología Política*, 53, 8-11.
- CAPRA, F. (1996). *The web of life: a new scientific understanding of living systems*. New York: Anchor Books.
- CARRIL, L., CARDOSO, A., & MARCELLESI, F. (2017). Editorial. *Ecología Política*, 53, 4-6.
- CHU, Y. (2016). A new biomimicry marine current turbine: Study of hydrodynamic performance and wake using software OpenFOAM. *Journal of Hydrodynamic*, 28(1), 125-141.
- COMMONER, B. (1992). *En paz con el planeta*. Barcelona: Editorial Crítica.
- COMMONER, B. (2014). *The closing circle: Nature, Man, and Technology*. Knopf Books: Kindle Edition.
- CRUTZEN, P., & STOERMER, E. (2000). The «Anthropocene». *Global Change News* 1., 41, 17-18, International Geosphere Biosphere Program (IGBP).
- ERNST, B. (1977). *El principio esperanza*. Madrid: Aguilar.
- FERNANDEZ-YAGUE, M., ABBAH, S., MCNAMARA, L., et al. (2015). Biomimetic approaches in bone tissue engineering: Integrating biological and physico mechanical strategies. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 84: 1-29.
- FEYERABEND, P. (2005). *Adiós a la razón*. Madrid: Editorial Tecnos.
- FISCHER-KOWALSKI, M. & HABERL, H. (2000). El metabolismo socioeconómico. *Ecología política*, 19, 21-34.
- GOLDSTEIN, J. & JOHNSON, E. (2015). Biomimicry: New Natures, New Enclosures. *Theory, Culture, Society*, 32(1), 61-81.
- GOLDSTEIN, J. (2012). Terra Economica: Waste and the Production of Enclosed Nature. *Antipode*, 45(2), 357-375.
- GUATTARI, F. (2000). *Las tres ecologías*. Valencia: Pre-Textos.
- HAMILTON, C. & GRINEVALD, J. (2015). Was the Anthropocene anticipated? *The Anthropocene Review*, 2(1), 59-72. Publicación en línea. DOI: 10.1177 / 2053019614567155 (consultado en agosto del 2017).
- HARVEY, D. (2000). *Spaces of Hope*. Edinburg: Edinburg University Press.
- HORKHEIMER, M. & ADORNO, T. (2009). *Dialéctica de la Ilustración*. Madrid: Editorial Trotta.
- JIMÉNEZ, N. & RAMÍREZ, O. (2016). Biomímesis: una propuesta ética y técnica para reorientar la ingeniería por los senderos de la sustentabilidad. *Gestión y Ambiente*, 19(1), 155-166.
- JIMÉNEZ, N. & RAMÍREZ, O. (2017). Biomímesis y adaptación tecnológica en el Antropoceno: Una lectura desde la ecología política. *Ecología Política*, 53, 56-60.
- JOHNSTON, I. (2015). Did oil giant ExxonMobil know about climate change in 1981? *In-*

- dependent*. Obtenido de <http://www.independent.co.uk/environment/climate-change/did-oil-giant-exxonmobil-know-about-climate-change-in-1981-10376666.html> (consultado en enero de 2018).
- KLEIN, N. (2007). *La doctrina del shock: el auge del capitalismo del desastre*. Barcelona: Paidós.
- LATOUR, B. (2017). *Cara a cara con el planeta: Una nueva mirada sobre el cambio climático alejada de las posiciones apocalípticas*. Buenos Aires: Siglo XXI Editores.
- LEFF, E. (2005, Octubre). *La geopolítica de la biodiversidad y el desarrollo sustentable: economización del mundo, racionalidad ambiental y reapropiación social de la naturaleza*. En Seminario Internacional REG GEN: Alternativas Globalizaçã. UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Rio de Janeiro, Brasil.
- LEFF, E. (2014). *La apuesta por la vida. Imaginación sociológica e imaginarios sociales en los territorios ambientales del sur*. México D.C: Siglo XXI Editores.
- LOVELOCK, J. (2007). *La venganza de la tierra, la teoría de Gaia y el futuro de la humanidad*. Barcelona: Editorial Planeta.
- LURIE, E. (2014). Product and technology innovation: What can biomimicry inspire? *Biotechnology Advances*, 32(8), 1494-1505.
- MARX, K. (2001). *Elementos fundamentales para la crítica de la economía política* (Vol. 1). Buenos Aires: Siglo XXI Editores.
- MATHEWS, F. (2011). Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry. *Organization & Environment*, 24(4), 364-387.
- MOORE, J. W. (2014). Toward a Singular Metabolism: Epistemic Rifts and Environment Making in the Capitalist World-Ecology. *New Geographies*, 6, 10-19.
- MUMFORD, L. (1992). *Técnica y civilización*. Madrid: Editorial Alianza.
- OCDE, (2001). *The application of biotechnology to industrial sustainability*. Obtenido de <https://www.oecd.org/sti/biotech/1947629.pdf> (consultado en agosto de 2016).
- ODUM, E. (1953). *Fundamentals of ecology*. Philadelphia: W. B. Saunders Company.
- ORWELL, G. (2013). 1984. Houghton Mifflin Harcourt. Kindle edition.
- PARTRIDGE, E. (2001). *Perilous optimism*. University of California. Obtenido de <http://gadfly.igc.org/papers/cornuc.htm> (consultado en diciembre de 2017).
- PERREAULT, T., BRIDGE, G. & MCCARTHY, J. (2015). *The Routledge Handbook of Political Ecology*. New York, NY: Routledge.
- RIECHMANN, J. (2006). *Biomímesis: Ensayos sobre imitación de la naturaleza, ecosocialismo y autocontención*. Madrid: Editorial Catarata.
- SAN DIEGO ZOO GLOBAL, (2010). Global Biomimicry Efforts: An Economic Game Changer. *Fermanian Business & Economic Institute*, November.
- SIERRA, C & KUIRU, N. (2014). Biomímesis: nuevos horizontes de sostenibilidad y tendencias globales de la praxis tecno-científica en el mundo contemporáneo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(2), 85-98.
- SINGER, P. (1999). *Una izquierda darwiniana, Política, evolución y cooperación*. Barcelona: Editorial Crítica.
- SLOTERDIJK, P. (2013). *Crítica de la razón cínica*. Madrid: Siruela.
- SMITH, N. (2006). Nature as Accumulation Strategy. *Socialist Register*, 16-36.
- STEFFEN, W., CRUTZEN, P., MCNEILL, J. (2007). The Anthropocene: Are Humans Now

- Overwhelming the Great Forces of Nature? *Ambio* 36(8), 614-621.
- STEFFEN, W., SANDERSON, A. & TYSON, P., et al. (2004). *Global Change and the Earth System: A Planet under Pressure*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
- TATMAN, P., GERULL, W., SWEENEY-EASTER, S., DAVIS, J., GEE, A. y KIM, D. (2015). Multiscale Biofabrication of Articular Cartilage: Bioinspired and Biomimetic Approaches. *Tissue engineering, Part B*, 21(6), 543-59.
- TAYLOR, M. (2015). *The Political Ecology of Climate Change Adaptation*. New York: Routledge.
- THE WORLD BANK. (2013). *Risk and Opportunity: Managing Risk for Development*. Washington: The World Bank.
- TOLEDO, V. (2013). El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones*, 136, 41-71.
- VALENCIA, N. (1999). *Pachamama, revelación del Dios creador*. Quito: Ediciones Abya-Yala.
- VON BERTALANFFY, L. (1969). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York: George Braziller Inc.
- WARK, Mc. (2015). (Social) Theory for the Anthropocene. En *ISA*. Versión digital: <http://futureswewant.net/mckenzie-wark-anthropocene/>.
- WERMUS, D. (2002). *¡Madre Tierra! Por el renacimiento indígena*. Quito: Ediciones Abya-Yala.
- WHITEHEAD, A. N. (1978). *Process and reality*. New York: The Free Press.
- ZALASIEWICZ, J., Waters, C., Williams, M., et al. (2015). When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary International*, 383, 196-203.
- ZARI, M. (2010). Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation. *Architectural Science Review*, 53(2), 172-183.
- ŽIŽEK, S. (1989). *The sublime object of ideology*. New York: Verso.

Biomimesis y consumo responsable

Unai Tamayo Orbegozo

Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales (UPV / EHU)

Gustavo Vargas

Departamento de Ingeniería Mecánica (UPV / EHU)

El trabajo que presentamos atiende a la necesidad de estudiar la evolución de los procesos generados por la naturaleza para su adaptación y posible integración en el seno de las organizaciones de un modo eficiente. La idea es solventar, en cierta medida, el creciente impacto ambiental y el consumo de recursos por parte de la actividad empresarial y las economías domésticas.

En tanto que consumidores, una de nuestras actividades del día a día es ejercer la labor de compra y de consumo en el hogar. En la mayoría de las ocasiones, ejercemos dicho proceso cotidiano de forma sistemática sin reparar en la complejidad que hay detrás del mismo. Las sociedades modernas nos permiten disponer de productos procedentes de lugares remotos a cambio de unas monedas, un paso de la tarjeta por el lector o un simple *click* en el ordenador.

Generalmente no somos conscientes de las repercusiones sociales o medioambientales que pueda tener la compra, el uso o el consumo de un bien concreto. Tampoco hacemos una valoración de los efectos de nuestros procesos de abastecimiento o consumo de bienes y servicios sobre las personas que habitan el planeta o, aún más allá, de las que lo habitarán en un futuro próximo. Esta es, precisamente la orientación del Informe Brundtland, *Nuestro Futuro Común* (Brundtland *et al.*, 1987), que describe el desarrollo sostenible como aquel “que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Tiene, por tanto, en consideración un horizonte temporal a largo plazo al incorporar los intereses de las generaciones venideras.

Desde la elaboración del célebre *Informe Brundtland* y su difusión en la *Cumbre de la Tierra* en Río de Janeiro en 1992 se repite y casi todo el mundo asume que la ecología es un valor fundamental para la vida humana. En este sentido, el desarrollo sostenible consiste en poner en marcha tres ejes como base del desarrollo sostenible: económico, social y ambiental.

Desde la perspectiva del consumidor, en la mayoría de los casos, ejercer un

consumo responsable no implica grandes esfuerzos, sino un pequeño cambio en nuestros hábitos de consumo. Siempre cabe buscar alternativas que minimicen la explotación de los recursos naturales como, por ejemplo, la reparación de productos defectuosos, compartir un servicio entre varias personas, o dar una segunda vida al producto reutilizándolo o intercambiarlo con otras personas. También podemos incorporar en nuestros actos de compra criterios de tipo social al analizar los beneficios (o evitar los perjuicios) que podamos generar en otros colectivos. Por ejemplo, la compra a productores locales y su consiguiente generación de empleo y riqueza en la comunidad de origen, evitando el transporte de productos y de mercancías desde zonas alejadas.

Desde la perspectiva de la oferta, siempre cabe considerar avances que puedan ir encaminados hacia la minimización en el uso de los recursos o el ahorro energético.

Sistema natural y Sistema de producción y de consumo

Para entender las funciones que cumple el medio ambiente en el ámbito económico es de gran utilidad dejar clara la diferencia entre lo que son los recursos naturales y los recursos ambientales, tal y como se esquematiza en la Figura 1.

- Recursos naturales: son los recursos que proporciona la naturaleza para poder producir. Entre ellos, los más importantes son las materias primas y los recursos no renovables (carbón, petróleo, etc.).
- Recursos ambientales: están relacionados con recursos que permiten mantener un determinado nivel de calidad ambiental que garantice la salud de las personas y un uso racional de los recursos naturales (aire, agua, etc.).

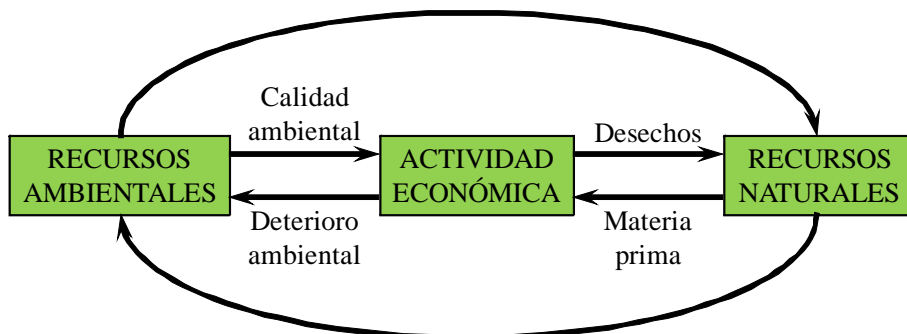


Figura 1. Recursos naturales y recursos ambientales

En cualquier caso, ambos tipos de recursos están estrechamente vinculados,

en tanto que la utilización racional de los recursos ambientales afecta a la calidad ambiental y, del mismo modo, una mayor calidad del medio ambiente garantizará un abastecimiento futuro de recursos naturales. Muchos procesos extractivos, como la tala de árboles, tienen una repercusión directa sobre la calidad de aire y, por tanto, sobre la calidad del medio ambiente. Del mismo modo, una mala calidad del medio ambiente derivada de la contaminación incide en muchos casos sobre el estado atmosférico y pluvial y, consecuentemente, sobre la calidad de los recursos naturales y de los propios procesos de extracción. La utilización que las sociedades modernas están haciendo del medio ambiente redundará en su continuo deterioro, y tiene consecuencias directas sobre la calidad de vida de las personas y sobre la disponibilidad de *inputs* para las empresas.

La consideración anterior sirve para entender mejor las funciones que cumple el medio ambiente en el sistema económico. En este sentido, tal y como indican diversos autores (Common, 1988; Azqueta, 2007) las funciones que el medio ambiente desempeña dentro del sistema económico son de tres tipos:

- Proporcionar recursos naturales, necesarios prácticamente en todos los procesos de producción y consumo.
- Asimilar desechos y residuos generados por la actividad económica, si bien su capacidad de asimilación es limitada.
- Ofrecer servicios para el disfrute de la naturaleza por parte del ser humano, produciendo de esta manera utilidad.

Tradicionalmente, solo la primera de estas funciones ha sido considerada por la ciencia económica, la economía de la empresa y el *marketing*. Ello ha ocasionado los actuales desajustes sociales en relación con problemas de deterioro medioambiental. Cabe representar gráficamente la interacción entre las funciones mencionadas y los procesos de producción y consumo a través de la Figura 2:

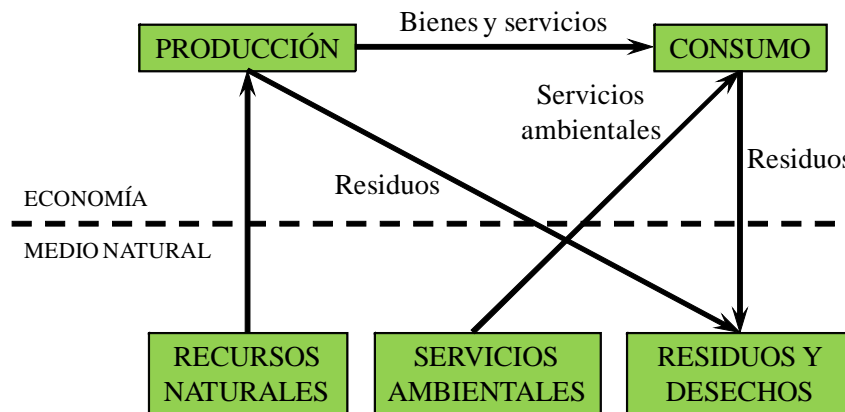


Figura 2. El medio ambiente dentro del sistema económico. Adaptado de Common (1988)

Según Riechmann (2006), el medio ambiente no forma parte de la economía, sino que la economía forma parte del medio ambiente. Ello requiere un cambio de perspectiva en el modelo económico imperante. El principal cambio estriba en reconocer que son los subsistemas económicos humanos los que han de integrarse en el sistema ecológico englobante, y no al revés. Esa es la clave para plantear adecuadamente los problemas de sostenibilidad. Este autor sugiere adoptar las premisas de la geosofía para adentrarnos en el camino de reflexión sobre la relación hombre-naturaleza, incidiendo sobre la idea de trascender los criterios sociológico-científicos de los planteamientos ecológicos en el estudio de la naturaleza y recuperar la dimensión espiritual que le es intrínseca. Es decir, no es sólo cuestión de imitar el aspecto externo de la naturaleza y aprender sólo de las formas del entorno natural, sino de las esencias que vehiculan esas formas y la sutileza con la que están enhebradas.

No es casualidad que economía y ecología sean términos semejantes. Ambos tienen su origen en el aprovisionamiento de bienes y servicios (Weber, 2013). Históricamente las empresas han logrado incrementar sus ingresos empresariales netos utilizando el medio ambiente como recurso gratuito, para eliminar los residuos generados por ellas, trasladando así un coste de la actividad empresarial a la sociedad en su conjunto. Es decir, el modelo de gestión convencional no consideraba al factor medioambiental como un bien y, en consecuencia, no le otorgaba un derecho de propiedad ni un precio. Y tampoco dicho modelo contemplaba los residuos como bienes a gestionar, puesto que funcionaba considerando la aparente gratuidad del factor medioambiental en su función de receptor de residuos y desechos. De hecho, los autores clásicos y neoclásicos no consideraron la variable medioambiental en el ámbito de la toma de decisiones dentro de la empresa, salvo su función como proveedora de *inputs*. Es decir, los impactos derivados de la interacción de la empresa con su entorno natural, en el que desarrolla su actividad y con el que necesariamente interactúa, ha sido considerado durante largo tiempo como algo ajeno al sistema económico (Ludevid, 2000).

No obstante, la situación actual de “colapso” no puede ser interpretada como si los recursos que nos ofrece la naturaleza fuesen infinitos ni puede considerarse a ésta como una alfombra, ya desgastada, bajo la cual se pueden esconder las ineficiencias generadas por el sistema, tal y como se aprecia en la Figura 3. En el documental *Comprar, tirar, comprar* (Danoritz, 2010) pueden verse los desajustes provocados por el sistema de fabricación y consumo occidentales, y sus consecuencias en terceros países, en donde se almacenan los residuos por ellos usados y desechados (ver Recuadro 1).

Cambio de paradigma económico

La realidad plasmada en el apartado anterior pone en cuestión el modelo actualmente imperante y pone en evidencia la necesidad de cambios frente al contexto económico mundial al que hemos de enfrentarnos en el futuro.

Recuadro 1. Documental: Comprar, tirar, comprar. (Danoritz, 2010)

Presenta la historia de una práctica empresarial que consiste en la reducción deliberada de la vida de un producto para incrementar su consumo, así como las consecuencias medioambientales que se derivan de la práctica de la obsolescencia planificada.



*Figura 3. Comprar, usar, tirar...desechos en el río amazonas (Leticia, Colombia).
Foto: U. Tamayo*

Durante muchos años se ha considerado que la evolución tecnológica solventaría los desequilibrios generados por los sistemas de fabricación y consumo humanos. Nada más lejos de la realidad. Más allá de su utilidad para facilitar la conexión a nivel planetario a través de sistemas de movilidad eficientes (con aviones cada vez más rápidos o trenes de alta velocidad), o la apuesta por modernas incineradoras para hacer desaparecer las nocivas consecuencias para la salud pública derivadas por la ingente basura generada en una era de productos de usar y tirar, la tecnología ha de evolucionar hacia modelos más sostenibles.

Si bien es cierto que algunos avances han servido para mitigar los efectos negativos sobre el medio o para aprovechar de un modo más eficiente los recursos

que nos aporta la naturaleza, no hemos conseguido reponer lo que de ella hemos saqueado.

La crisis de la civilización tecnológica postmoderna va unida a una crisis ecológica de dimensiones planetarias a la que acompañan desequilibrios sociales y económicos. De acuerdo con Naredo (2010), la crisis no ha modificado, sino que ha confirmado las raíces económicas del deterioro ecológico y social. A nuestro entender, y siguiendo estas consideraciones, se requiere un cambio radical de modelo.

En consecuencia, ha de ponerse sobre la mesa la necesidad de transformar la relación actual entre la naturaleza y la sociedad, y hacer partícipe del cambio a toda la sociedad, desde las instituciones, las asociaciones, las empresas, los colectivos hasta los individuos a título particular. Todos, en mayor o menor medida, hemos de actuar.

Llevamos años abasteciéndonos de forma gratuita de recursos ofrecidos por la madre naturaleza sin pagar nada por ello. Tras la era industrial, los modelos de producción y consumo siguen apostando por economías basadas en el crecimiento, a sabiendas de que globalmente y a medio plazo estos modelos plantean directrices abocadas al fracaso. Funcionamos, por tanto, con uno modelo económico obsoleto e insostenible.

Es ahora, justo en el periodo en que los indicadores revelan un bajo stock o un agotamiento de los recursos no renovables, cuando la preocupación por la búsqueda de nuevas fórmulas de suministro y/o aprovechamiento de los recursos ha de tomar mayor relevancia.

Para los economistas clásicos, determinados recursos naturales no son valiosos al no ser escasos ni requerir de grandes esfuerzos para su obtención. En consecuencia, consideran que éstos carecen de valor al suponerlos ilimitados e inagotables. Por otro lado, están alejados de su noción de riqueza al tratarse de bienes libres, al no ser susceptibles de *apropiabilidad*, ni de intercambio en sentido estricto, ni de requerir esfuerzo para su consecución. Para García del Hoyo & Jimenez (2015) el valor es una interpretación simbólica y el precio es un resultado de la negociación entre partes, que son dos caras de un mismo fenómeno; una vista desde una perspectiva cualitativa y subjetiva, y la otra como una medida cuantitativa y objetiva. Según estos autores, sólo algunas cosas útiles se consideran bienes económicos que poseen valor o generan utilidad. Como el concepto de necesidad se relaciona con el de utilidad, la esfera de lo útil se extiende de lo objetivo a lo subjetivo y de lo individual a lo social. La cosa útil es un bien cuando se cumplen cuatro condiciones: que haya una necesidad humana, que la cosa útil la satisfaga, que el individuo perciba la relación causal entre la cosa y la satisfacción, y que se pueda disponer de la cosa. Son los individuos quienes estiman la cantidad requerida para satisfacer sus necesidades, que puede ser mayor o menor de la que se dispone.

Cuando el bien es escaso con respecto a las necesidades, tiene un carácter económico o un valor. Si es abundante no es económico y carece de valor. El hecho de no estar disponible se puede deber a factores ecológicos, sociales o jurídicos. Los bienes son, pues, cosas útiles que poseen valor, y éste es proporcional a su disponibilidad relativa. Sin embargo, esta ambigüedad calculada, según Naredo (2010), no pone límites a las necesidades, que pueden ser, por tanto, infinitas.

En consecuencia, las teorías desarrolladas por los economistas clásicos y que sirvieron para establecer las bases del desarrollo de la *Ciencia Económica*, excluyeron de su objeto de estudio los aspectos relacionados con el medio ambiente que no estuviesen directamente vinculados con su función de fuente de recursos. Así, con este enfoque, al desatender las funciones del medio ambiente que no tuviesen que ver con la aportación de recursos escasos se obvió la gestión y estudio de los bienes de acceso libre o acceso abierto como los bienes públicos o comunes (propiedad de un colectivo). Es decir, la utilización por parte de diferentes agentes económicos de ciertos bienes cuya utilización afecta de forma significativa a terceras personas. Este hecho supone la ausencia de incentivos para preservar los recursos naturales, no ya de cara a las generaciones futuras, sino incluso para las generaciones presentes (Martínez, 1999). Esto se traduce en lo que Pigou (1924) y Coase (1937) denominaron como el *problema de las externalidades* o, por otro lado, Marshall (1890) como *deseconomías externas*. Tales externalidades aparecen cuando el comportamiento de un agente cualquiera (consumidor o empresa), afecta al bienestar de otro sin que éste último haya elegido dicha modificación, y sin que exista un precio, una contraprestación monetaria que lo compense (Azqueta, 2007).

A este respecto, Martínez (1999) considera que los bienes ambientales sufren la tragedia de los bienes comunes, que consiste en que, dado su carácter público y la falta de restricciones a su aprovechamiento, el coste de su utilización por un individuo resulta inferior al beneficio que obtiene de dicha utilización, lo que lleva a situaciones de sobreutilización o aniquilación de los recursos. A esa diferencia entre el coste social y el coste privado de la utilización del bien se denomina *externalidad*.

Scharmer & Kaufer (2013) creen que en las sociedades actuales las externalidades positivas suelen afectar generalmente a las élites, mientras que las externalidades negativas afectan, habitualmente a los más débiles. Los recursos naturales, provienen en la mayoría de las ocasiones del sur para abastecer al norte, para favorecer a los pueblos más desarrollados, mientras que los productos tóxicos y los residuos generados por los mismos van en sentido contrario, hacia los países más desfavorecidos. Es decir, los países pobres han sido los que han pagado en mayor medida las consecuencias de los desastres ecológicos provocados por los países más ricos, como se representa en la Figura 4 (Scharmer & Kaufer, 2013).

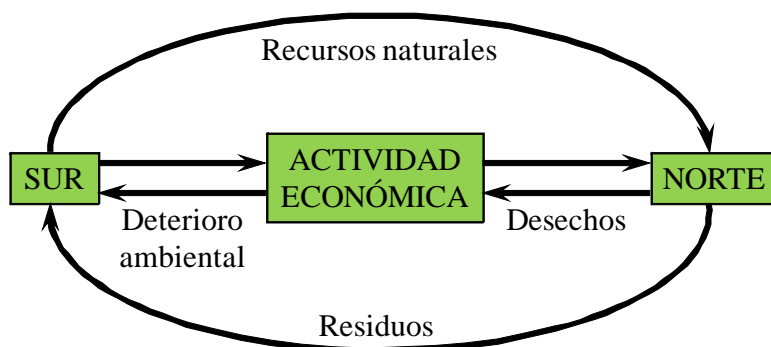


Figura 4. Los flujos económicos y ambientales en las relaciones Norte-Sur

Pero incluso el anteriormente citado *Informe Brundtland* (Brundtland *et al.*, 1987) se hace eco de la visión interesada de los países ricos por la que se alimenta la ilusión de que el crecimiento económico y la preservación de la naturaleza son compatibles, cuando lo correcto sería, como sostiene Martínez Alier (2005), insistir en la idea de que el crecimiento ascendente y constante de la economía conduce a un agotamiento claro de los recursos y al deterioro de los ecosistemas mediante la contaminación de tierras, aguas y aire, lo que en realidad perjudica a los países más pobres del mundo. Mientras persista el modo de producción capitalista, existirá un conflicto manifiesto entre la destrucción de la naturaleza para obtener beneficios y la conservación de la misma para poder sobrevivir.

Todo ello queda racionalizado mediante teorías económicas, como la de la *ventaja comparativa en costes*, que no incorporan el impacto de las externalidades. Ello puede generar lo que Hardin (1968) denominó como la *Tragedia de los comunes* que puede abocarnos a guerras de las partes contra el todo (ver Recuadro 2). No hemos de olvidar que como especie, tenemos que aunar fuerzas por un interés común, que no es otro que nuestra subsistencia en un planeta habitable.

Recuadro 2. *La tragedia de los comunes* (Hardin, 1968)

La tragedia de los comunes es un dilema que describe una situación en la cual varios individuos, motivados solo por el interés individual y actuando independiente pero racionalmente, terminan por destruir un recurso compartido limitado (bien común) aunque a ninguno de ellos, ya sea como individuos o en conjunto, les convenga que tal destrucción suceda. Este ejemplo se utiliza para analizar la relación entre libertad y responsabilidad, y generó el inicio de un amplio debate sobre el análisis del comportamiento humano sobre la gestión de los recursos colectivos de forma general y la relación del ser humano con la naturaleza.

La tragedia de los comunes representa una trampa social en la que podemos caer si no cooperamos como colectivo y en donde se enfatiza un conflicto social derivado del

uso de los recursos comunes. Surge debido a que existe una contradicción entre los intereses / beneficios de los individuos y los bienes comunes / públicos (ver Figura 5).



Figura 5. Contradicción entre los intereses individuales (coches privados) y los bienes comunes (infraestructuras públicas). Atasco monumental de tráfico (Medellín, Colombia). Foto: J. F. Vargas.

En consecuencia, se requiere superar la brecha entre la realidad ego-sistémica en la que los decisores o gobernantes priman intereses particulares por encima del interés colectivo que impulsa el eco-sistema. A este respecto, según Riechmann (2006), es preciso acercarnos a la idea de que no se trata de tener más, sino de vivir mejor; de calidad y no de cantidad. Es decir, buscar los principios de una buena vida dentro de los límites de los ecosistemas.

En estos casos el usuario del bien no paga lo que el bien realmente vale y la hipótesis de la distribución eficiente de los recursos no se cumple para la asignación de este tipo de recursos, dado que no existe un mercado para la distribución de los bienes de propiedad social o comunal (Ramos, 2000). Para corregir este problema varios autores justifican la regulación de las actividades que generan tales externalidades mediante la intervención del Estado, a fin de paliar los efectos negativos sobre el medio ambiente (Pigou, 1924; Coase, 1937; Ruesga & Durán, 1995; Martínez, 1999; Ramos, 2000; Jiménez & Rams, 2002).

Sin embargo, a pesar de excluir la variable medioambiental de los análisis económicos, los autores clásicos y neoclásicos eran también conscientes de que la

naturaleza imponía sus propias restricciones al crecimiento económico. Concretamente, Jevons (1920) sostiene que una demanda creciente de un recurso natural como el carbón podía conducir a un proceso de regresión económica, apuntando la idea de que un uso intensivo de los recursos agotables no permitiría un desarrollo sostenible (anticipándose, por tanto, al actual concepto de desarrollo sostenible).

La manifestación de tales restricciones ha provocado que la teoría económica convencional haya ido perdiendo validez al considerar la actividad económica y, particularmente, las actividades de producción y consumo, como un sistema cerrado e independiente del medio ambiente. García del Hoyo & Jiménez (2015) muestran la necesidad de acercamiento entre las disciplinas de la economía y la antropología para interpretar mejor la complejidad del mundo económico, disciplinas tradicionalmente disociadas debido a diferencias metodológicas y al tema de estudio (por un lado, la economía pone su atención en la maximización del beneficio individual; por otro, la antropología en el bienestar de la sociedad en su conjunto). Estas materias han de conciliarse, dado que cuando los hechos económicos se estudian desde el punto de vista puramente individual, se omite el marco ambiental, cultural e institucional.

Según Weber (2013) este marco de estudio, que fusiona la biología y la economía, ha excluido la vida en el sentido existencial o experiencial, llevándonos una situación en la que la megaciencia bioeconómica predominante es una ciencia de la no-vida. Bajo este enfoque impera una ideología económica de la naturaleza, es decir, una cultura humana en donde prevalece el «gen egoísta» y en el que se define nuestra dimensión humana, encarnada por el *Homo economicus*, como ser egoísta maximizador de la utilidad.

Pero la era del *homo economicus* ha llegado a su fin; es decir, la maximización del beneficio particular sin importar las consecuencias que ello pueda provocar en terceras personas y/o en la sociedad en general (Weber, 2013). Los proyectos realmente sostenibles han de ser propósitos que satisfagan a los participantes de manera multidimensional e integren un abanico amplio de necesidades humanas que van más allá de los intereses propios del *Homo economicus*.

A este respecto, Schamer y Kaufer (2013) consideran que hemos de pasar del yo al nosotros y del ego al eco. Es decir, necesitamos repensar los modelos económicos del futuro, fundados hasta ahora sobre la base del egoísmo individual. Existe la necesidad de co-crear un nuevo paradigma económico que nos ayude a repensar los conceptos económicos de base desde una perspectiva más colectiva. En palabras de Riechmann (2006), no está de más recordar que la huella mundial actual de la especie humana excede la biocapacidad de la Tierra y que, por tanto, se trata de alejarnos de un crecimiento cuantitativo y de producir y consumir distinto. También de producir y consumir menos.

A continuación abordaremos un nuevo enfoque o paradigma en el que el desa-

rollo económico ha de considerar el respeto al medio ambiente como base para poder garantizar, bajo parámetros de equidad y solidaridad interregional, los retos que se nos presentan como especie. En este sentido, el desarrollo sostenible consiste en poner en marcha tres ejes como base del desarrollo sostenible: economía, sociedad y medioambiente (ver Figura 6).

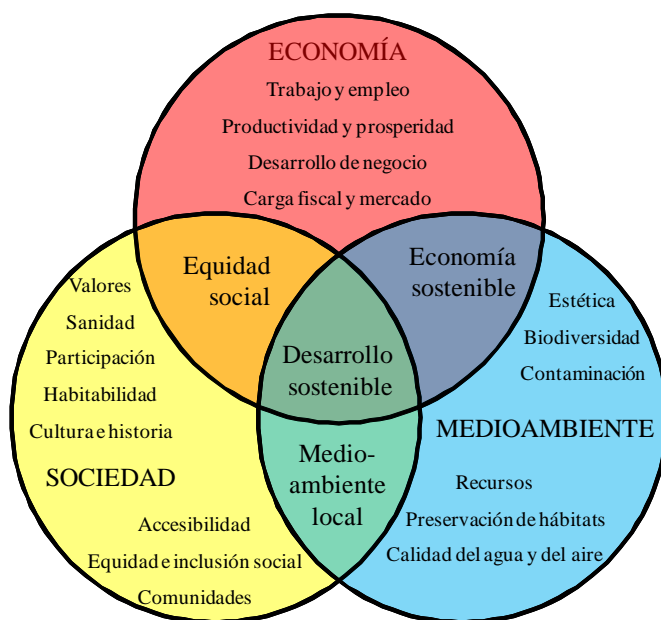


Figura 6. Ejes del modelo de desarrollo sostenible y la Triple Botom Line (elaboración propia).

De acuerdo con la *Declaración oficial de las Naciones Unidas* con motivo de la *Cumbre de la Tierra* de 2002 en Johannesburgo, una de las principales causas de que continúe deteriorándose el medio ambiente mundial son las modalidades insostenibles de consumo y producción, particularmente en los países industrializados. En este sentido las Naciones Unidas hacen un llamamiento a revisar estos modelos insostenibles, recurriendo a paradigmas de fabricación y consumo responsables.

La revolución de la biomímesis

Etimológicamente el concepto de la biomímesis, procede del griego siendo *bios* (vida) y *mimesis* (imitación). En una sociedad acostumbrada a dominar el medio o

a mejorarlo mediante la técnica y la transformación de la naturaleza, la perspectiva biomimética supone un nuevo reto que propone una revolución en el modo de entender y relacionarse con la naturaleza. El enfoque biomimético, en un sentido amplio, exige reconstruir los sistemas productivos humanos con el fin de hacerlos compatibles con las leyes de la naturaleza y de la biosfera.

Según indica Riechmann (2006), cuando nuestros sistemas productivos chocan contra los límites del planeta, no debemos seguir empujando para aumentar la oferta de suministros, sino adaptar mejor esos sistemas humanos a los ecosistemas (biomimesis), lograr mayores eficiencias (ecoeficiencia) y actuar sobre la demanda con medidas de autocontención (gestión generalizada de la demanda), para lo cual es necesaria una reconstrucción de la sociedad.

El término biomimesis y su aplicación al ámbito del diseño industrial ha sido popularizado por Janine Benyus, bióloga, consultora y autora de diversos libros de referencia en la materia. En éstos se la define como una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza y se inspira en ellos para resolver los problemas humanos. “La idea central es que la naturaleza, imaginativa por necesidad, ya ha resuelto muchos de los problemas con los que estamos lidiando: energía, producción de alimentos, control de temperatura, la química no tóxica, el transporte, el envasado...” (Benyus, 1997, p. 12).

En cuanto a la aplicación de la biomimesis en el ámbito económico, consistiría en la emulación de los procesos y ciclos de la naturaleza para el diseño de procesos de producción y consumo y, por extensión, de los propios productos y materiales que los forman.

Esta emulación respetuosa del medio constituye un enfoque radicalmente nuevo. Sin embargo, a diferencia de la revolución industrial, la revolución biomimética inicia una era que no está basada en lo que podemos extraer de la naturaleza, sino en lo que podemos aprender de ella. En su aplicación, los autores Eadie & Ghosh (2011) consideran que la relación con el medio natural ha de concebirse desde tres perspectivas:

- La naturaleza como modelo: la biomimesis es una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza para emular o inspirarse en los diseños y procesos biológicos, y así resolver problemas humanos.
- La naturaleza como medida: la biomimesis se vale de un estándar ecológico para juzgar la corrección de nuestras innovaciones. Después de miles de millones de años de evolución, la naturaleza ha descubierto lo que funciona, lo que es apropiado y lo que perdura.
- La naturaleza como mentor: la biomimesis es una nueva manera de contemplar y valorar la naturaleza. Inicia una era basada en lo que el mundo natural puede enseñarnos.

No obstante, aunque lleva poco tiempo reconocida oficialmente como ciencia, la inspiración en la naturaleza es precisamente lo que llevó a Leonardo Da Vinci y algunos de sus contemporáneos a mantener una observación consciente y sistemática de la naturaleza. O, ya más recientemente, a la empresa británica *Round Foresight* a crear un bastón que permite a los invidentes desplazarse de forma más sencilla y segura a imitación del sónar de los murciélagos. Los animales, plantas e insectos en la naturaleza han evolucionado a lo largo miles de millones de años para desarrollar soluciones más sostenibles y a su vez, más eficientes que las desarrolladas por los seres humanos hasta la fecha. Algunas de estas soluciones pueden servirnos a los seres humanos como inspiración para lograr resultados sobresalientes. Por ejemplo, la idea de las redes de pesca puede tener su origen en las telas de araña; la resistencia y la rigidez de la celda hexagonal construida por la abeja puede haber dado lugar a su adopción para su uso en los núcleos de estructuras tipo sándwich en aviones (Eadie & Ghosh, 2011).

Los retos ambientales del comercio

Cada vez es más relevante la preocupación por los impactos ambientales negativos que soporta nuestro entorno ante el continuo crecimiento de las tasas de producción y consumo. Estos impactos ambientales incluyen elementos tan preocupantes como las emisiones de gases efecto invernadero, las emisiones de contaminantes atmosféricos, la generación de residuos, la contaminación de recursos hídricos, la ocupación del suelo, la contaminación acústica y el agotamiento de los recursos no renovables.

En el ámbito de la distribución comercial, la competencia vivida en los últimos años entre los diversos formatos ha sido intensa, siendo el comercio urbano minorista quien se lleva la peor parte, perdiendo progresivamente cuota de mercado frente a las grandes superficies comerciales.

Sin embargo, debido a su posición excepcional entre los sectores de producción y consumo, el sector minorista desempeña un papel muy importante en el contexto de la sostenibilidad en general y en la facilitación de un cambio hacia un modelo de consumo socialmente más responsable.

En este ámbito el reto de la sostenibilidad minorista es tripe:

- Asegurar que las operaciones internas sean sostenibles.
- Ejercer influencia sobre los proveedores para producir de forma sostenible (*ecoinnovación*).
- Concienciar a la clientela de los beneficios de la oferta ambientalmente responsable.

En este contexto, el sector minorista ha de aprovechar su capacidad para aunar los intereses medioambientales que se generan tanto en los puntos de producción como de distribución y consumo. Así, el comercio verde tiene la visión de convertirse en un lugar de encuentro de todos los grupos de interés, relacionados con el comercio urbano, facilitándoles información fiable y relevante para la toma de decisiones relacionadas con aspectos medioambientales. Así, será posible desarrollar un plan de mejora sostenible encaminado a optimizar su rendimiento y demostrar la conformidad de las acciones de mejora ambientales.

En este ámbito, el compromiso del comercio minorista por el medio ambiente tiene que focalizarse, entre otros aspectos, sobre la eficiencia energética, la optimización de los sistemas de distribución, el etiquetado ecológico y el cálculo de la huella de carbono

Será necesario un sistema de comercio y producción en el que todos y cada uno de los actos sean intrínsecamente sostenibles y regeneradores. Los negocios necesitarán integrar sistemas económicos, biológicos y humanos para crear un método sostenible de comercio. Por mucho que pretendamos actuar de manera sostenible en una compañía, no podremos tener completo éxito hasta que las instituciones que rodean al comercio sean rediseñadas (Hawken, 1993).

Los aspectos económicos y medioambientales aparecen muchas veces entrelazados (Fleischmann *et al.*, 1997). La atención a ambas cuestiones puede proporcionar tanto ventajas económicas como medioambientales, como sugiere el concepto de economía sostenible. Podemos, por tanto, concluir que la gestión medioambiental requiere un cambio de filosofía empresarial y que las herramientas de *marketing* se adapten a las demandas medioambientales para poder incorporar el concepto de desarrollo sostenible.

En este sentido, a partir de una revisión reciente de las teorías de la empresa y sus contribuciones a la sostenibilidad corporativa, Lozano *et al.* (2015) han propuesto una teoría orientada a la sostenibilidad de la empresa. Esta teoría puede ser útil ya que proporciona una visión más completa de las obligaciones, oportunidades, relaciones y procesos que una empresa necesita para abordar la sostenibilidad.

La transformación biomimética de la oferta comercial

La empresa ha de ser consciente de que el potencial consumidor estará dispuesto a sustituir los productos convencionales por una oferta que incorpore aspectos medioambientales si ésta se ajusta a sus necesidades y preferencias. No obstante, el carácter sostenible de la oferta no tiene el éxito asegurado si no se cumplen ciertas condiciones. A menudo puede suceder que, a pesar de que el mercado muestre

cierta predisposición a la compra de productos ecológicos o a desarrollar ciertos comportamientos medioambientalmente sostenibles, no llegue a ejecutarlos por la existencia de una serie de factores inhibidores. La empresa deberá salvar dichos obstáculos y ajustar su oferta comercial a las necesidades y preferencias del mercado. Mediante esta estrategia puede llegar a obtener ventajas competitivas basadas en el desarrollo sostenible. A continuación incidimos en los factores que pueden influir de forma directa en el atractivo de la oferta medioambiental (Tamaño, 2009).

Con respecto a las características de los productos, el consumidor valora positivamente la apariencia, la funcionalidad, la facilidad de uso y la comodidad en el empleo de los mismos. Por tanto, si bien puede existir cierta tendencia a adquirir productos innovadores por parte del colectivo más propenso a adoptar prácticas de consumo sostenibles, los productos medioambientalmente avanzados no han de ir en detrimento de ninguna de las variables convencionales anteriormente citadas. Numerosos estudios empíricos (Bañegil & Rivero, 1998; Calomarde, 2000; Ottman *et al.* 2006) desvelan un peor comportamiento de algunos productos ecológicos en cuanto a funcionalidad y aspecto, lo cual está en el origen de la inhibición en numerosos actos de compra. Los consumidores ecológicos no van a comprar o emplear productos por el mero hecho de dañar menos al medio ambiente. En consecuencia, el respeto al medio ambiente deberá integrarse entre las características de la oferta, pero sin perjudicar al resto de variables mencionadas. Así, y con una perspectiva de ciclo de vida y con orientación a largo plazo, los aspectos relativos a la sostenibilidad que podrían aportar un valor medioambiental añadido al producto podrían ser su menor impacto ambiental (tanto derivado del menor uso de componentes como por el menor consumo energético), su mayor durabilidad, su mejor imagen y/o reputación, etc.

En la *Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible* de Johannesburgo de 2002 se reconoció que el comercio responsable de productos naturales puede contribuir a aumentar la diversidad biológica y ayudar a reducir la pobreza. Pero la expansión del comercio de productos de la biodiversidad de países en desarrollo sigue tropezando con grandes obstáculos: información inadecuada y acceso limitado a los mercados, competencias de gestión y exportación insuficientes, valor añadido bajo, ausencia de economías de escala, y dificultades para encontrar financiación y asociados fiables en el sector privado.

Así, el modelo comercial compatible con el modelo de ciudad sostenible parte de la comprensión de aquellas claves que explican la interrelación entre el comercio y la ciudad. A continuación se proponen una serie de claves para la vertebración del sector comercial con base en criterios de sostenibilidad:

Productos verdes y reciclaje

El surgimiento del *marketing ecológico* está motivado por la aparición de un nuevo tipo de consumidor, que se siente preocupado por las consecuencias de aquello que consume y por el modo en que lo hace. Dicho consumidor está sensibilizado por los efectos negativos que el impacto de las actividades humanas tiene sobre el medio ambiente y la salud de las personas. Esta nueva situación, por tanto, ha dado lugar a que el consumidor exprese sus valores a través de su poder de decisión (de compra) en el mercado. El estudio del consumidor es un aspecto esencial para el éxito de las organizaciones. De este modo, el *marketing ecológico* surge como respuesta a las necesidades de aquellos individuos que buscan productos más respetuosos con el medio ambiente.

Una persona con un determinado nivel de preocupación medioambiental, que muestra actitudes favorables a la protección del medio ambiente, puede trasladar dichas actitudes a diferentes tipos de comportamientos, entre los que el consumo de productos con algún tipo de atributo ecológico es uno más, no el único (reducción del consumo, reciclaje, reutilización, utilización de transporte no contaminante, participación en actividades de voluntariado, etc.).

Compra de proximidad

El comercio es el eslabón final de la cadena de valor del sistema económico. Es el punto de encuentro entre la producción y el consumo. Por eso su localización y el entorno donde se ubican los puntos de venta, son factores estratégicos en la configuración de una ciudad que quiera armonizar calidad de vida con la eficacia de su sistema de distribución. En este sentido, modelos que fomenten la compra de proximidad (compra en el barrio o en la localidad de residencia) serán alternativas más sostenibles que modelos en los que prime la compra en grandes centros de periferia que requieran desplazamientos, en muchos casos en vehículo particular.

Movilidad eficiente/sostenible

Favorecer la proximidad de la oferta comercial urbana a los consumidores es otro de los ejes de actuación. Así, para que el comercio siga dando vida a las ciudades, estas deben practicar políticas dirigidas a minimizar la deslocalización del comercio urbano. El ciudadano debe encontrar, en desplazamientos a pie de pocos minutos, la suficiente oferta de bienes cotidianos evitando así los costes de una movilidad excesiva que pueda producir efectos irreversibles sobre la morfología y la funcionalidad de la estructura urbana, el medio ambiente y el cambio climático.

Edificación sostenible

Entre las prioridades de edificación en las ciudades se encuentra la renovación y rehabilitación urbana como línea estructural de la política de vivienda en la que priman los criterios de innovación y eficiencia energética. Este tipo de actuaciones contribuyen a la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y al aumento del ahorro energético. En este ámbito se han de tener en consideración tanto aspectos de cohesión y habitabilidad de los comercios y viviendas como aspectos de índole social relacionados con la política económica, social y ambiental de la edificación.

Vertebración del territorio

El comercio es, más que un servicio urbano, un equipamiento estratégico que contribuye a la vertebración del territorio, que genera impactos y externalidades positivas y negativas susceptibles de análisis, previsión, potenciación o corrección. En esa tarea las administraciones locales tienen una responsabilidad que no pueden obviar. Así, para que el comercio siga dando vida a las ciudades, éstas deben practicar políticas dirigidas a aumentar el atractivo del entorno urbano, potenciando el uso del espacio público más allá de la propia actividad comercial. Así, la ciudad ha de estar pensada para sus diversos usos como espacio para el trabajo, la residencia, el ocio, la compra y las actividades culturales y de ocio.

Concienciación del ciudadano/consumidor

Evidentemente todas estas cuestiones tendrán poco o ningún efecto si no se cuenta con una población sensibilizada y un grupo de consumidores que valoren la oferta comercial que integre aspectos de índole ambiental. En este sentido, desde la administración se debería actuar en materia de formación y sensibilización de la ciudadanía.

Hacia el decrecimiento y el consumo responsable en la nueva era

La situación medioambiental actual ofrece un reto inédito a las empresas productoras y manufactureras a lo largo de todo el planeta. Un desafío en donde el desarrollo industrial y la protección del entorno deberán coexistir simbióticamente.

Por todo ello, tanto las empresas como las herramientas de gestión en general, y de gestión de *marketing* en particular, deberán ser objeto de transformaciones para acomodarse a las preocupaciones medioambientales del mercado. En consecuencia, si se alteran los condicionantes y el objeto de la actividad económica

y social (dirigidos a identificar y satisfacer las necesidades humanas), el propio concepto y filosofía de la disciplina de *marketing* deberá adaptarse a la nueva realidad social, así como sus técnicas y fundamentos. Ello requerirá de una transformación de las empresas, los productos, los sistemas de producción y las prácticas de gestión (Shrivastava, 1995). Por tanto, uno de los retos a los que se enfrenta el *marketing* moderno es la necesidad de trasladar el énfasis puesto en el consumo material hacia un desarrollo más sostenible.

A este respecto, ante la proliferación de ingentes cantidades de residuos generados por las sociedades de consumo de los países desarrollados, varios autores abogan por una gestión empresarial y un *marketing* más responsable (Kotler *et al.*, 1999; Santesmases, 2004). Paradójicamente, tales residuos derivan, en gran medida, de la cultura consumista imperante en las sociedades modernas y del uso indiscriminado de productos de usar y tirar que el *marketing* ha contribuido a estimular. Esta cultura está ampliamente arraigada y es imperante en la sociedad actual (Kotler *et al.*, 1999; Santesmases, 2004). Consideramos que esta filosofía contraviene los principios de eficiencia en la gestión de los recursos escasos, principio en el que se fundamenta el crecimiento sostenible y la gestión empresarial del siglo XXI.

El gran reto del *marketing* se centra en compatibilizar el atractivo de la oferta comercial con la sostenibilidad. Por ello, el medio ambiente se ha convertido en argumento destacado de marketing durante los últimos años (Kotler & Armstrong, 2004).

Al referirnos al consumo responsable estamos haciendo hincapié en la importancia que tiene el consumidor para elegir entre las diversas opciones que le ofrece el mercado de bienes y servicios, teniendo en cuenta otros criterios como son la justicia social, la ética y la solidaridad, así como la protección del medio ambiente.

La ciudadanía tiene, por tanto, herramientas de presión sobre el mercado dado que puede convertir su capacidad de compra en un importante instrumento de presión, exigiendo el cumplimiento de determinadas garantías sociales, laborales y medio ambientales.

En consecuencia, por consumo responsable entendemos la elección de los productos y servicios, no sólo según su calidad y precio, sino también por el impacto ambiental y social generado por su consumo. Es decir, como consumidores, tenemos la capacidad de influir en la conducta de las empresas a través de nuestros actos de compra y consumo, premiando a aquellas que tienen un comportamiento más sostenible y penalizando a las menos proactivas.

El principio fundamental que subyace bajo esta perspectiva es que todos somos responsables de los impactos sociales y ambientales generados por los sistemas productivos, fundamentalmente respaldados a través de nuestros procesos de compra y consumo. En consecuencia, es necesario emprender un cambio social

en torno a nuestros hábitos de consumo, si éstos no se rigen bajo los parámetros anteriormente indicados.

Otra acepción de consumo responsable, un tanto más estricta pero, a su vez, complementaria a la anterior, es aquella que impulsa un menor consumo, avallando directrices que abogan por la austeridad y la gestión rigurosa de los recursos. Es decir, implica consumir menos, eligiendo consumir sólo lo necesario. Esta orientación choca de lleno con los modelos económicos imperantes, fundamentados bajo la tesis del consumo desmesurado como eje para el crecimiento continuo. Latouche (2009) se refiere al término *decrecimiento* al hacer referencia a la insostenibilidad del sistema económico imperante y a la necesidad de volver a otros esquemas de desarrollo. El autor hace referencia a que la mayor causa de la crisis de la civilización actual se debe al crecimiento insostenible y a que el ser humano se ha creído por encima de cualquier otra especie y ha tratado de domar a la naturaleza, aspecto que le ha abocado al fracaso. Ello se debe a que las sociedades actuales se cimentan sobre el paradigma del crecimiento económico, como principio absoluto que rige todas las decisiones de nuestras vidas. En tal sentido, el sistema económico actual es una sociedad de consumo basada en la idea de que no hay límites a nuestras necesidades y esto nos lleva un sistema condenado a crecer *per se* e inmerso en un círculo virtuoso convertido en un círculo infernal; una espiral del que sólo el decrecimiento nos puede sacar.

Otra cuestión que va más allá de la cantidad consumida es la calidad del producto en sí misma, que está directamente relacionado con el proceso productivo que lo avala. Así, por ejemplo, no podemos obviar que detrás de la compra de una bandeja de pechugas de pollo o la rutinaria compra de unos huevos, ha habido que sacrificar a un animal que ha podido tener una vida más o menos digna. En el caso de las gallinas camperas, éstas han podido vivir en libertad, mientras que las gallinas criadas en jaula generalmente han tenido una vida mucho más sacrificada y ello, evidentemente, se ve reflejado en la calidad de la carne, y en el sabor y color del huevo que proveen las gallinas que han vivido de forma libre frente al que ofrecen las gallinas que han vivido enjauladas.

Al referirnos al consumo responsable desde una perspectiva biomimética, estamos haciendo hincapié en la importancia que tiene el consumidor para elegir entre las diversas opciones que le ofrece el mercado de bienes y servicios, considerando los productos que tienen en cuenta la justicia social, la ética, la solidaridad y la protección del medio ambiente. Es decir, hemos de considerar el medio ambiente como soporte de la vida teniendo en cuenta que debemos priorizar el uso de productos con menores impactos ambientales y reducir el consumo de los limitados recursos naturales de que disponemos. Por otro lado, hemos de actuar con criterios de equidad, asumiendo y defendiendo solidariamente la obligación de garantizar los mismos derechos para todas las personas. Pero no solo la especie

humana ha abordado estos procesos. Si nos fijamos en la naturaleza, por ejemplo, la especie animal es inteligente en términos de sostenibilidad y solidaridad. Es curioso, el caso de los Chimpancés de Fongoli, que también basan su modelo de subsistencia en la innovación tecnológica e innovación social (ver Recuadro 3 y Figura 7). He aquí un caso de posible aplicación de la biomimesis en el ámbito económico y comercial.

Recuadro 3. Innovación social de los monos Fongoli (Pruetz et al., 2015)

En la sabana de Fongoli, en el este de Senegal y en el oeste de Malí, se da una innovación social que les distingue del resto de chimpancés estudiados en África: hay más tolerancia, mayor paridad de sexos en la caza y los machos más corpulentos no atropellan tan a menudo los intereses de los demás gracias a su fuerza. Para los investigadores que vienen observando este comportamiento desde hace una década, estos usos además podrían ofrecer claves sobre la evolución de los ancestros humanos. En Fongoli, cuando una hembra o un macho de bajo rango captura una presa, se le permite quedársela y comérsela. En otros sitios, el macho alfa u otro macho dominante suele tomar la presa. Es decir, el respeto de los machos de Fongoli por las presas obtenidas por sus compañeras serviría de incentivo para que estas se decidan a ir de caza más a menudo que las de otras comunidades.



Figura 7. Los monos Fongoli, casi humanos (Roach, 2008). Foto: F. Lanting

Conclusiones

Para terminar cabe indicar que, en términos de sostenibilidad, el contexto actual en el que se encuentran las ciudades es ineficiente. El modelo de ciudad sostenible y de gestión eficiente de las empresas y organizaciones debe tener en consideración, entre otros aspectos, su ubicación geográfica, su contexto social y cultural. Pero, también debe considerar el entorno natural en el que desarrolla su actividad. En este sentido, el enfoque biomimético puede ser de utilidad en la búsqueda de soluciones sostenibles que provean soluciones eficientes a los modelos de gestión del futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- AZQUETA, D. (2007). *Introducción a la Economía Ambiental*. Madrid: Mc Graw Hill-Interamericana.
- BENYUS, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: Harper Collins.
- BUSS, D. (2015). *Evolutionary Psychology. The New Science of the Mind*. Oxford: Routledge.
- COASE, R.H. (1937). The nature of the firm. *Economica* (New series), 4(16), 386-405.
- COASE, R.H. (1960). The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, 3, 1-44.
- COMMON, M. (1988). *Environmental and Resource Economics*. London: Longman.
- EADIE, L. & GHOSH, T. (2011). Biomimicry in textiles: past, present and potential. An overview. *Journal of Royal Society: Interface*, 8, 761-775.
- EGGERMONT, M. (2007). *Biomimetics as problem-solving, creativity and innovation tool*. CDEN/C 2E2. Winnipeg: University of Manitoba.
- FIKSEL, E. (2003). Designing Resilient, Sustainable Systems. *Environmental Science Technologic*s, 5330-5339.
- FLEISCHMANN, M., BLOEMHOF-RUWAARD, J., DEKKER, R., VAN DER LAAN, E., VAN NUNEN, J. & WASENHOF, L. (1997). Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operational Research*, n° 103, 01-17.
- GARCÍA DEL HOYO, J. J. & JIMÉNEZ, M. (2015). Teorías del valor: coincidencias y divergencias en la economía y la antropología social. *Revista de Economía Institucional* 17(33), 109-131.
- HARDIN, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, 162(3859), 1243-1248.
- HAWKEN, P. (2010). *The ecology of Commerce*. New York: Harper Collins.
- HOLBROOK ET AL. (2010). Social insects inspire human design. *Biology Letters*, 6(4), 431-433.
- JEVONS, S. (1920). *Principles of economics and theory of political economy*. London: Macmillan.
- JIMÉNEZ, F. & RAMS, C. (2002). Crecimiento económico en un contexto de desarrollo sostenible. *Información Comercial Española (ICE)*, 800, 47-64.
- KOPNINS, H. & SHOREMAN-OUMET, E. (2015). *Sustainability. Key issues*. London: Routledge.
- KOTLER, P. & ARMSTRONG, G. (2004). *Principios de Marketing*. Madrid: Prentice Hall.
- KOTLER, P., ARMSTRONG, G., SAUNDERS, J. & WONG, V. (1999). *Introducción al Marketing*. Madrid: Prentice Hall.
- LATOUCHE, S. (2009). *Farewell to Growth*. Cambridge: Polity Press.
- LOZANO, R., CARPENTER, A., HUISINGH, D. (2015). A review of “theories of the firm” and their contributions to corporate sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 106, 430-442.
- LUDEVID, M. (2000). *La gestión ambiental de la empresa*. Madrid: Ariel.
- LURIE-LUKE, E. (2014). Product and technology innovation: What can biomimicry inspire? *Biotechnology Advances*, 32(8), 1494-1505.
- MARSHALL, A. (1890). *Principles of economics*. London: Macmillan.
- MARTÍNEZ, J. (1999). *Introducción a la Economía Ecológica*. Madrid: Rubes.
- NAREDO, J. M. (2010). *Raíces económicas del deterioro ecológico y social: más allá de los dogmas*. Madrid: Siglo XXI.
- ROACH, M. (2008) *Fongoli chimps, almost humans*. Obtenido de <http://ngm.nationalgeographic.com/2008/04/chimps-with-spears/mary-roach-text>.
- PIGOU, A. C. (1924). *The Economics of Welfare*. London: Macmillan.
- PUETZ, J. D., BERTOLANI, P., BOYER ONTL, K., LINDSHIELD, S., SHELLEY, M. & WESSLING, E. G.

- (2015). New evidence on the tool-assisted hunting exhibited by chimpanzees (*Pan troglodytes verus*) in a savannah habitat at Fongoli, S negal. *Royal Society Open Science*, 1-11.
- RAMOS, J. L. (2000). *Economía, marco institucional y medio ambiente: la economía de los recursos ambientales desde la perspectiva institucional*. Madrid: Editorial Complutense.
- RIECHMAN, J. (2006). *Biomimesis. Ensayos sobre imitación de la naturaleza, ecosocialismo y autocontención*. Madrid: La Catarata.
- RUESGA, S. M. & Durán, G. (1995). *Empresa y medio ambiente*. Madrid: Pirámide.
- SANTESMASES, M. (2004). *Marketing: conceptos y estrategias*. Madrid: Pirámide.
- SCHARMER, O. & KAUFER, K. (2013). *Leading From the Emerging Future: From Ego-system to Eco-system Economies*. San Francisco: Berrett-Koehler.
- SHRIVASTAVA, P. (1995). The role of corporations in achieving ecological sustainability. *Academy of Management Review*, 20, 936-960.
- TAMAYO, U. (2009). *Un modelo normativo de marketing medioambiental estratégico orientado a la obtención de ventajas competitivas*. (Tesis Doctoral). UPV / EHU, Sarriko.
- WEBER, A. (2013). Towards a fundamental shift in the concepts of nature, culture and politics. *Enlivenment*, 31, 1-70.

Desarrollo de superficies hidrodinámicas laminares basadas en el diseño de la piel de tiburón

G. Díez & J. Martínez

Marine Research Division, AZTI-Tecnalia

M. Soto

Research Centre for Experimental Marine Biology and Biotechnology (PiE-UPV/EHU)

J. M. Blanco & I. Bidaguren

Department of Nuclear Engineering and Fluid Mechanics (UPV/EHU)

P. Fernández-Waid

Scripps Institution of Oceanography (Birch Aquarium), University of California

Los tiburones del género *Isurus* están considerados como unas de las especies de peces marinos de natación más rápida, consiguiendo alcanzar una velocidad de hasta 70 km/h, que es considerablemente más rápida de lo que se podría esperar de sus condiciones fisiológicas y de su capacidad muscular. Esta particular eficiencia hidrodinámica, que marca una diferencia en la natación respecto a otras especies de peces, está estrechamente relacionada con el recubrimiento de su piel formada de minúsculas espículas de particular diseño en cada especie (Mullins, 1997; Carlson *et al.*, 2006). Las espículas actúan rompiendo la capa límite del agua en contacto con la piel, de forma que minimizan las turbulencias sobre el cuerpo y, por tanto, reducen considerablemente la resistencia al avance en la natación (Naresh, 1997; Brian *et al.*, 2010).

En años recientes se han realizado investigaciones en el diseño de revestimientos especiales con propiedades aero-hidrodinámicas y que se han ensayado experimentalmente en aviones y barcos, consiguiendo reducciones de la resistencia cuando se orientan en la dirección del flujo del aire y/o agua y, por lo tanto, ahorros significativos de combustible (Ball, 1999). Estos primeros materiales eran simples superficies provistas de acanaladuras microscópicas (*micro-riblet films*), que, si bien eran eficientes desde el punto de vista aero-hidrodinámico, tenían la desventaja de ensuciarse fácilmente, perdiendo de esta forma sus propiedades (Fig 1).

Estas superficies se utilizaron experimentalmente en competiciones deportivas marinas como la Copa América de vela de 1988. En este caso concreto, el velero “*Stars & Strips*” utilizó un revestimiento en el casco fabricado por la empresa 3M (y basado en este principio) que fue prohibido en posteriores competiciones porque

otorgaba a la embarcación una ventaja “sustancial” frente a sus competidores (Bechert *et al.*, 1997; Mullins, 1997). Este material no fue utilizado posteriormente y tampoco se conoce ningún tipo de producto comercial derivado de él hasta el momento.

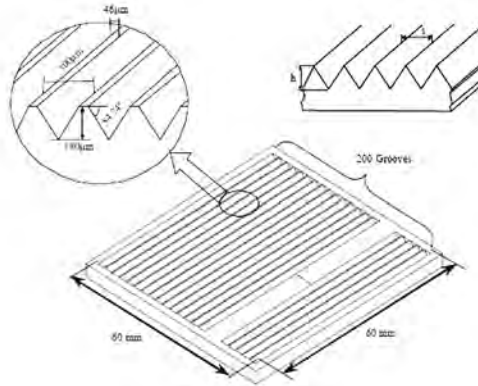


Figura 1. Diseño básico de las acanaladuras laminares desarrolladas para los primeros revestimientos laminares. Fuente: (Lee *et al.*, 2005).

Posteriormente a estas primeras investigaciones, se empezaron a desarrollar de forma todavía incipiente nuevos revestimientos más complejos aplicando el concepto de biomimética, que se basan directamente en el diseño de las espículas de la piel de tiburón con unas geometrías patrón actuantes (Fig 2), tal y como fue presentado por Bechert (2000).

Más tarde, en 2008, 13 de los 14 récords mundiales de natación conseguidos se lograron con la ayuda de trajes de baño de una marca comercial norteamericana. Estos bañadores utilizan en parte tecnología que imita las características de la piel de tiburón y que, según los fabricantes, reducen hasta en un 4% la resistencia en el agua (Britt, 2005).

Actualmente, una compañía japonesa (*Shenzhen B&B Technology Co. LTD*, 2017) está trabajando en el desarrollo de estos tipos de materiales con el fin de sacar al mercado un revestimiento comercial llamado “*shark skin coating*” que definen como un “*polyolefin film*” inspirado en la piel de tiburón para aplicaciones en la industria naval. La ventaja de los materiales diseñados ahora es que, además de ser de gran eficacia hidrodinámica, son capaces de evitar en un 85% el ensuciamiento de las superficies de los cascos por la adhesión de organismos marinos (*fouling*), que son los responsables por si mismos del incremento de la resistencia en el agua hasta en un 15% (Britt, 2005). La eficacia del revestimiento inspirado en la piel del tiburón es tal que en las pruebas de laboratorio las algas tan sólo consiguen adherirse en las zonas donde el revestimiento tiene algún pequeño defecto

de fabricación (Schumacher *et al.*, 2007). Así, las ventajas de este tipo de materiales en el ámbito naval son varias; por una parte, aumentan la eficacia hidrodinámica de los cascos de los barcos reduciendo el consumo, reducen los costos de mantenimiento (auto-limpieza) de los cascos de las embarcaciones, y a su vez evitan el uso de pinturas “*antifouling*” muy contaminantes por su alto contenido en TBTs, Cu o Zn (Brady, 2000; Callow, 2002; Hoipkemeier-Wilson *et al.*, 2004).



Figura 2. Modelo de revestimiento para análisis de la reducción de la resistencia aerodinámica basado en el diseño de las espículas de tiburón. Fuente: (Bechert *et al.*, 2000)

Si bien hasta el momento, animados por las ventajas que podría generar este revestimiento, se están realizando prometedores trabajos de investigación en este campo, todavía no se ha conseguido fabricar ninguno de estos productos de forma comercial. Parece, por lo tanto, una buena oportunidad para dedicar esfuerzos a la investigación básica y dar los primeros pasos en esta línea con el objetivo de situarse en una posición favorable de cara al nuevo y amplio mercado que se espera para estos materiales en un futuro cercano.

El capítulo se plantea como un estudio interdisciplinar entre cuatro entidades que vienen trabajando de forma conjunta desde hace más de 10 años y que aportarán, con su personal y equipos, la experiencia que poseen en diferentes áreas de conocimiento necesarias para conseguir los resultados planificados. En este sentido, la *Unidad de Investigación Marina de AZTI Tecnalia* posee el conocimiento contrastado de numerosos estudios de biología de especies marinas y la experiencia en el diseño, pruebas e implementación de nuevas tecnologías en el ámbito naval pesquero. El *Grupo de offshore de mecánica de fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la UPV/EHU* es un centro experto en la simulación de modelos hidrodinámicos de flujos mediante software especializado y salas de simulación. El *Laboratorio de Biología Celular y Toxicología Ambiental (BCTA) de la UPV-EHU (Estación Marina de Plentzia)*, junto con el *Birch Aquarium de Scripps*

Institution of Oceanography (UC San Diego), aportará su amplio conocimiento de las técnicas para el análisis ultraestructural de tejidos mediante sus equipos de microscopía electrónica tanto de transmisión como de barrido, y el análisis mediante microscopía confocal.

Objetivos

Los objetivos específicos que se describen a continuación tienen relación directa con el enfoque biológico y tecnológico implícito en un estudio de esta naturaleza.

- El primer objetivo pretende correlacionar la forma, el tamaño, la densidad y la distribución de las espículas de la piel de un tiburón con las cargas hidrodinámicas que se producen en su cuerpo durante la natación. La morfología de las espículas de tiburón está descrita para varias especies ya que se utiliza en algunos casos como criterio para su correcta identificación taxonómica (Compagno, 1984). Desde hace tiempo se conoce la responsabilidad de las espículas en la eficacia de la natación. Sin embargo, no se ha descrito en ninguna especie de tiburón el diseño, tamaño, densidad y la distribución de las espículas en la superficie del cuerpo ni se han correlacionado estas variables con las cargas hidrodinámicas del cuerpo de ninguna especie.
- El segundo objetivo es realizar mediante software de simulación un estudio teórico de las cargas hidrodinámicas en un modelo de tiburón. Se comparará la eficacia del modelo básico con otro que incorpore en su diseño las características aprendidas del modelo tiburón (Becherd *et al.*, 1997), simulando en el proceso la aplicación de superficies laminares hidrodinámicas diseñadas en función de los resultados obtenidos en el primer objetivo.

Metodología

Se van a describir a continuación las cuatro tareas que se han llevado a cabo en este estudio.

Obtención de las muestras

Se capturaron tres tiburones pelágicos de la especie marrajo (*Isurus oxyrinchus*) por encargo de AZTI a una embarcación de palangre con base en el puerto de Ondarroa (País Vasco). Los tiburones se pescaron con la piel en perfectas condiciones, ya que para ello el barco estaba provisto de fundas de lona para proteger

al tiburón durante su manipulación en cubierta y almacenamiento en la bodega. Inmediatamente después de su recepción en puerto, los tres ejemplares se transportaron al centro de AZTI en Sukarrieta, y se almacenaron congelados a -20°C sobre unos soportes aislados del suelo para mantener su forma y protegerlos individualmente con una envoltura de plástico. Con ello se ha logrado mantener a los especímenes con la estructura lo más similar posible a su estado natural y con la piel intacta, que era el objetivo más importante de esta tarea.

Caracterización de las proporciones y formas del escualo

Sobre uno de los ejemplares congelados se obtuvieron fotografías digitales (*Olympus E-520*) de los detalles de la morfología a tamaño real y de las tres vistas en alzado, perfil, planta con referencias métricas y distancias conocidas para fijar posteriormente las proporciones de forma correcta. Sobre las proyecciones de estas fotografías en un programa de diseño gráfico (*Adobe Illustrator 10*) se anotaron las distancias (mm) de todos los puntos de referencia taxonómicos y se reconstruyó el alzado, perfil, planta con exactitud milimétrica. A partir de estas tres vistas y mediante software de diseño gráfico *3D Studio max 9* se realizó una reconstrucción en tres dimensiones del ejemplar que serviría como base para las proyecciones de los estudios de densidad y orientación de las espículas a lo largo del cuerpo del tiburón.

Estudio de la morfología de las espículas en las distintas zonas -Metodología de análisis de densidad y orientación-

Sobre la mitad izquierda del segundo ejemplar de marrajo se diseccionaron con ayuda de un bisturí 69 muestras de piel de 5×5 cm del cuerpo del tiburón. Las muestras siguieron un esquema de muestreo a lo largo de 6 ejes longitudinales y 15 verticales a través del cuerpo, además de las aletas dorsales, pectorales y caudales. El corte inferior de cada una de las muestras de piel estaba referenciado sobre el eje longitudinal del tiburón que va desde la nariz hasta la quilla de la aleta caudal. Para la corrección de la desviación del ángulo de corte respecto al eje de referencia nariz-quilla el corte de referencia en la muestra de piel se realizó con la ayuda de un inclinómetro digital de dos ejes (*LD-2M Level Developments*). Las muestras de piel se conservaron en placas de Petri individuales correctamente identificadas y congeladas a -20°C .

En un microscopio *Olympus zoom estereo SZX12* y sobre una plantilla transparente de 1 cm^2 cuadrículada cada mm^2 que se colocó sobre cada muestra se hizo el recuento directo de la densidad de espículas por mm^2 . Sobre cada muestra se realizaron 30 recuentos en 30 de los cuadrados de 1 mm^2 elegidos al azar en

la plantilla. De esta forma, se obtenía el promedio y la desviación estándar de la densidad (n° espículas/ mm^2) en cada muestra de piel.

Para el análisis comparativo de la densidad de espículas, los 6 ejes longitudinales se agruparon según su altura respecto al cuerpo: 1 dorsal (L1), 1 lateral superior (L2), 1 lateral inferior (L3), 1 ventral (L4) y 1 central (L5) y ventral superior (L6) y los 3 ejes verticales; anterior (V1), medio (V2) y posterior (V3) (Figura 3). Se estimó la variación de las diferencias en la densidad de cada grupo de muestras mediante el test de comparación de medianas Mann-Whitney (Wilcoxon) en *STATGRAPHICS Plus 5.0*. La densidad obtenida de las muestras de piel de las aletas tuvo un análisis estadístico diferenciado de las muestras del cuerpo.

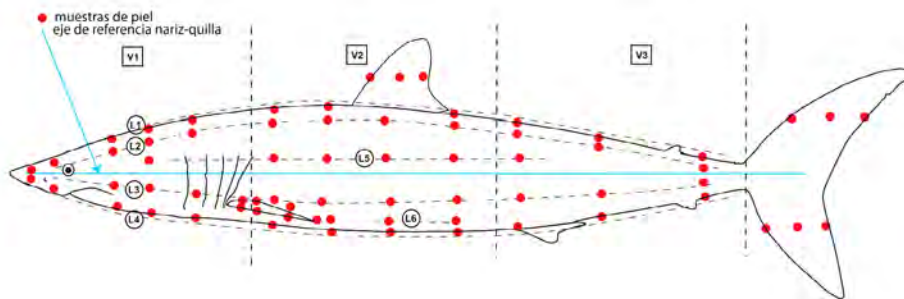


Figura 3. Esquema de la distribución de los ejes longitudinales y verticales y la situación de las muestras de piel analizadas.

Para el estudio de la orientación de las espículas respecto al eje longitudinal del tiburón, cada una de las 69 muestras de piel se fotografió a 32 aumentos con una cámara digital *Olympus C-5050 Zoom* acoplada al microscopio *SZX12* y se importaron en formato .jpg al programa *Adobe Illustrator 10*.

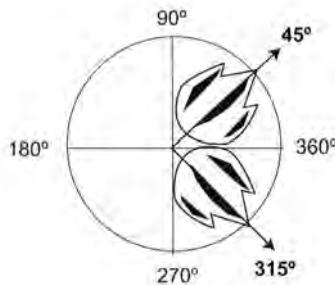


Figura 4. Esquema de la medición de la desviación angular de las espículas respecto al eje horizontal de corte.

El ángulo del corte inferior se ajustó en *Illustrator* de forma que formase un ángulo de 0° respecto a la horizontal del eje referencia nariz-quilla. Posteriormente, mediante la herramienta de cálculo angular del programa se anotaron en 25 espículas elegidas al azar los grados de desviación respecto al eje de referencia nariz-quilla con un segmento que pasaba por el eje postero-anterior de cada espícula. Puesto que la orientación el borde posterior dentado de las espículas se orienta siempre hacía la parte posterior del cuerpo, el ángulo respecto al eje de referencia estará siempre entre el arco que comprenden los ángulos de 90° y 270° (ver esquema de Figura 4).

Metodología de análisis de la morfología y tamaño

Sobre la mitad derecha del segundo ejemplar se diseccionaron, en posiciones equivalentes a las muestras del lado izquierdo, 27 muestras de piel para el estudio de la morfología y tamaño de las espículas.

Se procesaron las muestras de tegumento de tiburón para su observación en el Microscopio Electrónico de Barrido según el protocolo utilizado por el *Servicio General de Microscopía Analítica y de Alta Resolución en Biomedicina* (SGIKER, UPV/EHU) y que se describe a continuación:

- a. Fijar con 2% glutaraldehído en tampón Cacodilato 0.1 M (pH=7.4), durante 1h a temperatura ambiente.
- b. Lavar 3 veces durante 10 min con Tampón Cacodilato + Sacarosa isosmolar con el fijador.
- c. Postfijar con 1% OsO₄ en Cacodilato, 1h en oscuridad a 4 °C.
- d. Lavar 3 veces con Cacodilato, 10 min.
- e. Deshidratar en serie creciente de etanol (30%, 50%, 70%, 90%, 96%, y 2 baños de alcohol absoluto), 10 min en cada baño.
- f. Desechado al punto crítico. Como alternativa, se puede lavar dos veces en hexametildisilazano 10 min y dejar secar.
- g. Colocar las muestras sobre soportes de microscopio electrónico de barrido utilizando cemento conductor.
- h. Recubrimiento metálico con oro en atmósfera de Argon (*Jeol ion sputter JFC-1100*)
- i. Visualizar y fotografiar en un microscopio electrónico de barrido (*Hitachi S-4800*).

Sobre las micrografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido se calcularon las dimensiones máximas (longitud antero-posterior, y anchura) según el esquema de la figura 5. Se cuantificaron ambas dimensiones en, al menos, 10

espículas por zona de muestreo (Total de >300 espículas).

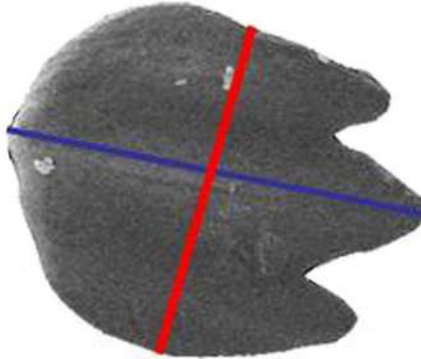


Figura 5. Dimensiones máximas de las espículas de tiburón. En azul la dimensión mayor del eje anteroposterior, y en rojo la anchura máxima.

Estudio de la hidrodinámica del tiburón

El primer paso para el estudio de la hidrodinámica de la piel del tiburón fue la obtención de un modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de uno de los ejemplares de marrajo para su análisis con el Software *ANSYS FLUENT* (2013). Los métodos CFD's constituyen el tercer enfoque en el estudio y desarrollo de la dinámica de fluidos junto con la teoría y la experimentación. Los resultados que aportan los códigos CFD's son análogos a los que se obtienen en el laboratorio con túneles de viento, ya que ambos son un conjunto de datos para una configuración de flujo dado. Este tipo de análisis complejos y con miríadas de datos ha sido posible, por un lado, gracias a la rápida evolución de los ordenadores en cuanto a velocidad y capacidad de memoria, y por otro, al desarrollo de algoritmos numéricos más precisos.

Como paso previo, se realizó una reconstrucción CAD (modelo sólido) en formato STL sobre uno de los ejemplares de tiburón congelados con la ayuda de un escáner laser de operación manual (Modelo *Handyscan*). Posteriormente, sobre el modelo CAD resultante del escaneado se reconstruyó la nube de puntos con software de ingeniería inversa y se obtuvo la versión final del modelo STL mediante superposición de superficies NURBS. El archivo resultante era una estereolitografía a tamaño real del tiburón con una malla compuesta de más de cuatro millones de caras faceteadas.

El segundo paso de tratamiento de geometría consistió en reducir éste número de superficies tratando de perder la menor cantidad de detalle posible. Para ello, se recubrieron estas superficies tan detalladas por otras con longitud de arista

como máximo de 10 mm con la herramienta de mallado ICEM (Figura 6).

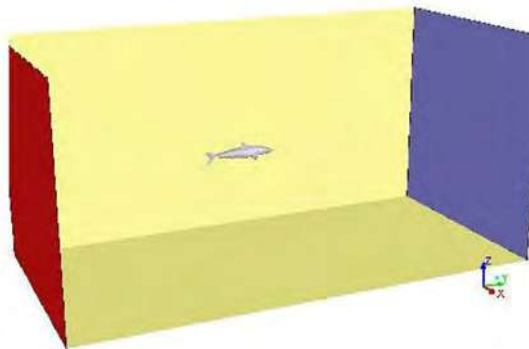


Figura 6. Geometría final escaneada en 3D del cuerpo del tiburón.

En los ojos, la boca, las branquias y la parte posterior de aletas y cola, la simplificación fue necesaria a fin de evitar intersecciones entre caras y así conseguir una superficie global cerrada. Una vez obtenido el perfil de tiburón, se procedió a generar el dominio del estudio o volumen de control. El escualo en tamaño real era de una longitud aproximada de 1,2 m, por lo que se decidió incluirlo en un volumen de agua de $4 \times 4 \times 5,2$ m de largo en la dirección del flujo (dominio).

La discretización de este dominio (volumen de agua + tiburón) se realizó de abajo a arriba, mallando en primer lugar la superficie, el perfil del escualo (Figura 7A). Para mallar esta superficie se tomó un tamaño de elemento máximo de 2 mm, clave para una buena distribución del centroide de los elementos adyacentes a la pared según la teoría y_p^+ . Así, la malla CFD contiene $2'05e^6$ celdas en total, cuyo detalle alrededor del cuerpo del tiburón se puede visualizar en la Figura 7B.

A



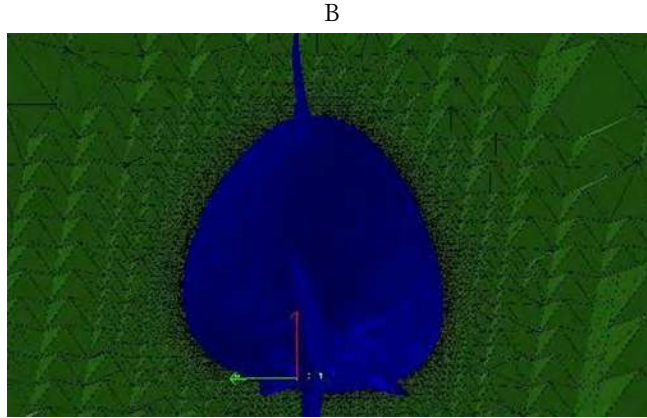


Figura 7. A) Dominio computacional y B) Detalle de la malla alrededor del tiburón.

La turbulencia se podría definir como un fenómeno de inestabilidad intrínseca del flujo y provoca que el fluido pase a comportarse de forma aparentemente caótica. De una manera descriptiva podría hablarse de la formación de torbellinos, más o menos aleatorios, alrededor de la dirección media del movimiento. Surge cuando la velocidad del fluido supera un umbral específico, por debajo del cual las fuerzas viscosas amortiguan el comportamiento caótico. El valor de turbulencia viene dado por el denominado *número de Reynolds* (Re) que es la proporción de fuerzas de inercia a las viscosas:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (1)$$

Siendo ρ y μ la densidad y viscosidad del agua del mar respectivamente, U la velocidad promedio con la que avanza el flujo marino y L , la longitud del escualo.

Este modelo hace que el coeficiente de viscosidad turbulenta (CV) dependa de los parámetros medios de flujo y turbulencia, lo cual ha sido sugerido por muchos autores y está bien fundamentada por evidencia experimental (Lion *et al.*, 1995; Atta *et al.*, 2007) Las ecuaciones del modelo turbulento “Realizable κ - ϵ ” (ANSYS, 2013) vienen dadas por:

$$D/D_t (\rho k) = \left(\partial/\partial x_j \right) \left[\left(\mu + \left(\mu_t \cdot \sigma_k^{-1} \right) \right) \cdot \left(\partial \epsilon / \partial x_j \right) \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$D/D_t (\rho \epsilon) = \left(\partial/\partial x_j \right) \left[\left(\mu + \left(\mu_t \cdot \sigma_\epsilon^{-1} \right) \right) \cdot \left(\partial \epsilon / \partial x_j \right) \right] + C_{g1} \cdot \epsilon \cdot k^{-1} \cdot G_k - \rho \cdot C_{g2} \cdot \epsilon^2 \cdot k^{-1} \quad (3)$$

Siendo G_k la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidades principales, k la energía cinética turbulenta, ϵ el ratio de disipación turbulenta y $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ los números de Prandtl de energía y disipación respectivamente. Para el análisis se considera toda la superficie del tiburón pero con menos detalle en lo que respecta a la piel por el costo computacional que conllevaría (Wu *et al.*, 2010). Así que se plantean tres casuísticas:

1. Superficie lisa: $K_s = 0.001$ mm (caso 1)
2. Superficie de rugosidad media: $K_s = 0.250$ mm (caso 2)
3. Superficie de rugosidad máxima: $K_s = 0.500$ mm (caso 3)

Los coeficientes analizados mediante CFD fueron:

- Coeficiente de Arrastre (C_d) en la dirección del flujo que es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de cualquier objeto dentro de un entorno fluido como el aire o el agua. Comprende los efectos de los dos factores básicos que contribuyen a la fricción dinámica de fluidos: fricción de la piel y arrastre de la forma. Viene dado por la expresión:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho \cdot U^2 \cdot A} \quad (4)$$

Siendo F_d la componente de la fuerza en dirección al flujo y A es el área de referencia.

- Coeficiente de Sustentación (C_l) en la dirección perpendicular al flujo, que es una cantidad adimensional que se utiliza para cuantificar el efecto de elevación sobre cualquier objeto dentro de un entorno fluido como el aire o el agua, debido a la diferencia de presión alrededor de sus caras superior e inferior. Viene dado por la expresión:

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho \cdot U^2 \cdot A} \quad (5)$$

Siendo F_l la fuerza de sustentación en dirección perpendicular al flujo.

- Coeficiente de fricción superficial ($C_{f/2}$) a lo largo de toda la superficie exterior que es una cantidad adimensional que representa la tasa de energía disipada

por las tensiones de pared. Viene dado por la expresión:

$$C_f / 2 = \frac{\tau_w}{\rho \cdot U^2} \quad (6)$$

Siendo τ_w el tensor local de tensiones de las paredes.

Resultados

Descripción de los parámetros morfológicos en las distintas zonas

-Resultados del análisis de morfología; descripción general-

La muestra tomada en la zona del hocico presenta unas espículas de grandes dimensiones (L: >200 μm ; W: >190 μm) sin ningún tipo de estriación anteroposterior (o muy tenue) con una forma muy redondeada (Figura 8A). Esta escama es muy parecida a la marginal de la aleta (ver más adelante).

El resto de las espículas de las diferentes zonas muestran una estriación característica, con una base ancha (que se inserta en el tegumento) y una espina que se proyecta hacia atrás (Figuras 8B-C). Su ordenamiento general es en hileras diagonales, tal y como se aprecia en la vista panorámica de la Figura 8C. En el detalle de la Figura 8B se observa la potente acumulación de fibras de colágeno (*ceratotrichia*) presente en la dermis.

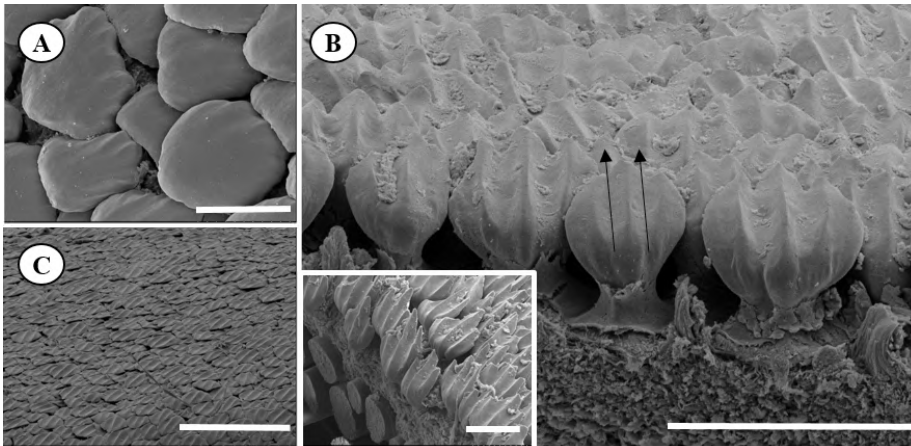


Figura 8. A). Espículas típicas de la zona del hocico (Muestra n° 1). B) Espículas con estriación característica. Detalle de la inserción de la base de la escama en el tegumento. Las flechas indican la entrada de la corriente de agua superficial siguiendo la estriación. C) Panorámica general

superior mostrando el ordenamiento de las espículas. Barras de Escala: A, B= 200 μm ; Detalle en B= 100 μm ; C= 400 μm . Nota: sobre algunas de las espículas se observa la presencia de gránulos correspondientes a la secreción mucosa del epitelio que no pudieron ser lavados durante el procesamiento de la muestra.

Zona Lateral

Los resultados de las tres zonas discriminadas se presentan en la Tabla 1. Así, para la zona lateral superior (L1), en la que se han eliminado los resultados correspondientes a la aleta dorsal, se observa que la zona del hocico presenta las espículas con mayor tamaño y menor estriación.

Tabla 1. Caracterización morfológica (Longitud y anchura, valores medios y sd desviación estándar) de las espículas correspondientes a las zonas de muestreo en los 3 diferentes transectos seleccionados (ver su localización en Figura 3), Zona Lateral Superior (L1), Lateral media (L5) y Lateral Inferior (L4). Los números de las espículas se ilustran en las zonas de las Figuras 9-13.

Z. L. Superior (L1)		Longitud (μm)		Anchura (μm)	
Zona	media	sd	media	sd	
1	229,2	23,6	194,4	23,3	
5	153,0	7,8	135,5	11,1	
14	160,3	12,8	153,5	13,3	
25	167,5	3,3	128,7	7,1	
37	135,0	9,6	109,8	10,1	
Z. L. Media (L5)		Longitud (μm)		Anchura (μm)	
Zona	media	sd	media	sd	
7	168,3	15,3	128,5	20,8	
16	184,5	16,0	164,8	13,2	
27	217,7	9,1	173,7	8,1	
38	115,8	12,8	88,3	9,6	
Z. L. inferior (L4)		Longitud (μm)		Anchura (μm)	
Zona	media	sd	media	sd	
8	166,2	7,1	130,7	7,6	
18	163,8	8,9	118,8	10,8	
29	171,1	9,5	117,0	6,1	
38	115,8	12,8	88,3	9,6	

Sin embargo, en la zona superior de la cabeza (zona 5) se observa una disminución importante tanto del tamaño como de la anchura de las espículas, mostrando

además una estriación suave (no tanto como en la zona 1) que se mantiene hasta la zona 14 (Figura 9).

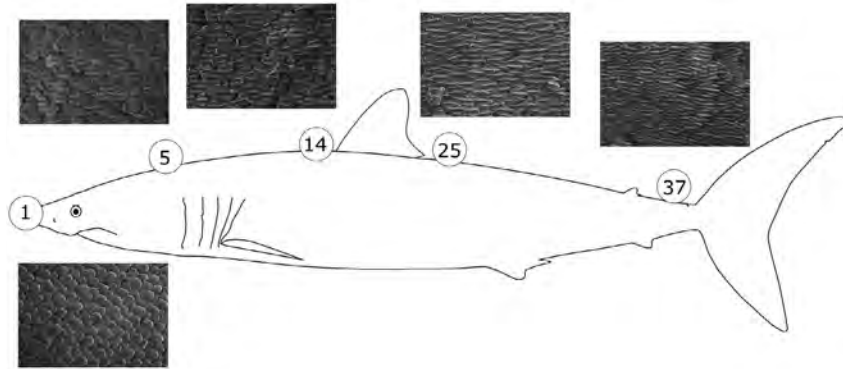


Figura 9. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en el transecto lateral superior (L1).

En la zona lateral media (L5) se observa un patrón similar con espículas de dimensiones reducidas (115 y 88 μm) en la zona 35 (anterior a la aleta caudal) (Figura 10). Es de destacar la marcada estriación de todas las espículas a partir de la zona 16. La zona que presenta las dimensiones mayores (aparte del hocico) es la zona 17 (zona lateral media), aunque con una estriación muy marcada.

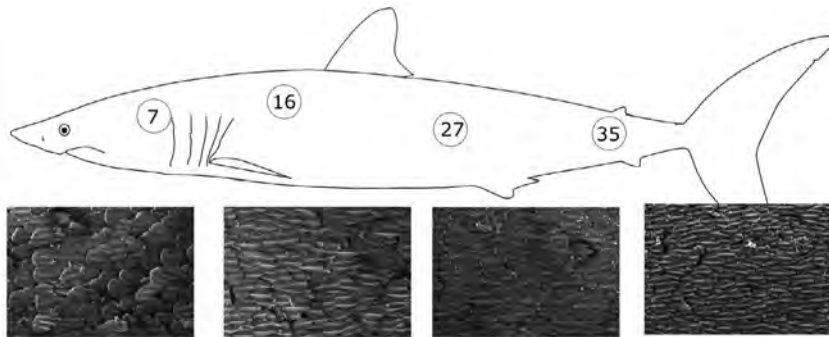


Figura 10. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en el transecto lateral medio (L5).

En la zona lateral inferior (L4) todas las espículas presentan un tamaño más reducido que el resto (dentro de la misma latitud corporal), aunque todas ellas poseen una estriación muy marcada (Figura 11).

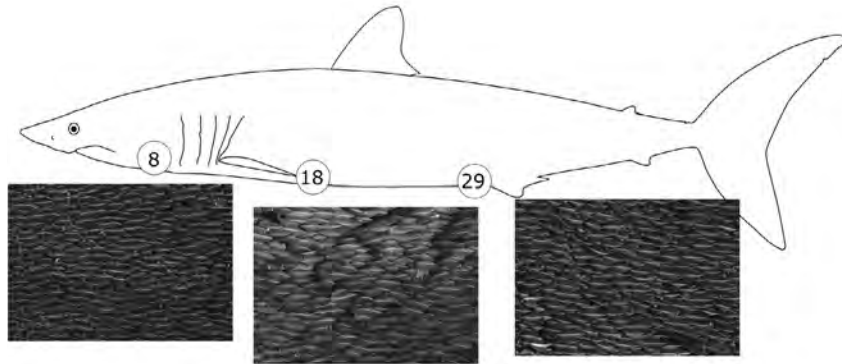


Figura 11. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en el transecto lateral inferior (L4).

En el caso de la aleta dorsal, si se comparan la zona del borde de ataque (zona 19) y la zona posterior de la aleta (21) se observan diferencias importantes (Tabla 2). Así, en la zona de ataque el tamaño (longitud x anchura) es bastante mayor que en la zona posterior, y además la estriación no es tan marcada. Esta estriación es muy evidente en la zona posterior (Figura 12).

En el caso de la aleta caudal, las espículas correspondientes a la zona superior (39) y la inferior (42) presentan dimensiones similares (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización morfológica (Longitud y anchura) de las espículas correspondientes a las aletas dorsal y caudal. Leyenda como en Tabla 1.

Aleta Dorsal		Longitud (μm)		Anchura (μm)	
Zona	media	sd	media	sd	
19	198,5	13,6	153,6	7,4	
21	148,8	9,9	116,0	7,2	
Aleta Caudal		Longitud (μm)		Anchura (μm)	
Zona	media	sd	media	sd	
39	160,3	9,3	132,6	5,6	
42	169,0	7,3	133,2	9,7	
41	172,3	10,1	118,6	12,0	
44	126,7	11,0	91,1	12,6	

En ambos casos (39, 42), sin embargo y a pesar de presentar estrías, tienen una forma más redondeada que las inmediatamente anteriores a la aleta (Figura 13). En la zona posterior a la zona superior (41) las espículas son similares. Sin

embargo, las espículas de la zona posterior a la zona inferior (44) son mucho más reducidas.

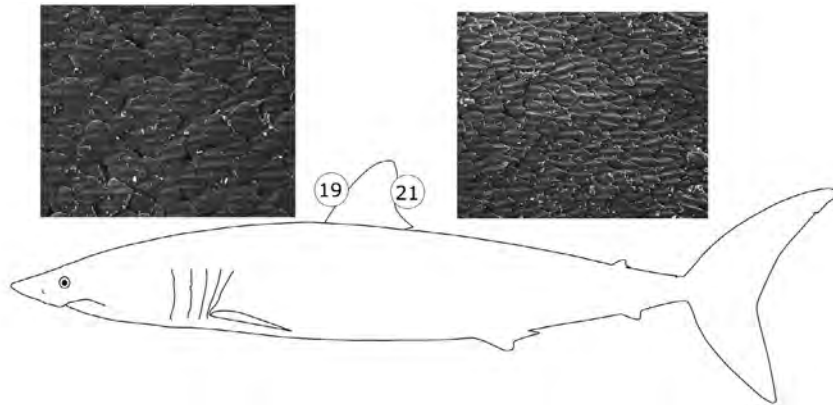


Figura 12. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en la aleta dorsal.

En el caso de la aleta pectoral (Tabla 3), para el borde de ataque de la zona dorsal (46) observamos que las dimensiones de las espículas son mucho más grandes y redondeadas que las de la zona de fuga (47). Además, las de la zona de ataque presentan una estriación muy poco marcada en comparación con las de la zona de fuga (Figura 14).

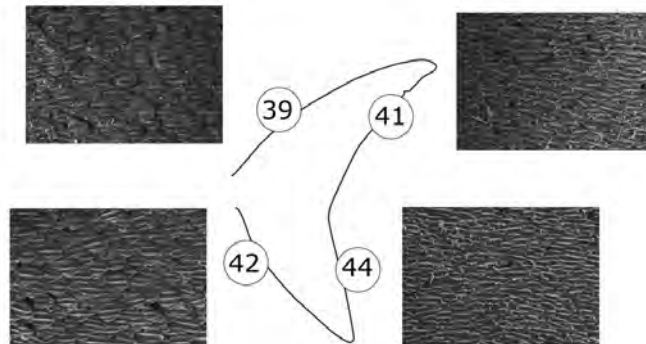


Figura 13. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en la aleta caudal

Tabla 3. Caracterización morfológica (Longitud y anchura) de las espículas correspondientes a la aleta pectoral (zonas dorsal y ventral). Leyenda como en tabla 1.

Zona Dorsal		Longitud (μm)		Anchura (μm)	
Zona		media	sd	media	sd
46		235,9	20,6	214,3	4,7
47		141,6	19,1	113,1	11,2
Zona Ventral		Longitud (μm)		Anchura (μm)	
Zona		media	sd	media	sd
49		139,5	8,0	128,0	6,2
50		128,9	6,4	112,9	4,0

Si observamos la aleta pectoral en su zona ventral (49, 50), observamos que ambas son más pequeñas que las de la zona dorsal, aunque se vuelve a repetir el mismo patrón de estriación: mucho más marcado en el borde de fuga que en el de ataque.

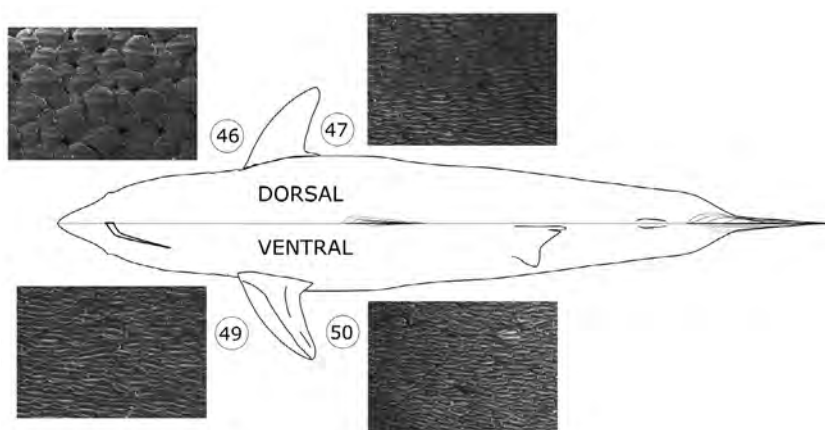


Figura 14. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas dorsal y ventral de la aleta pectoral

Resultados del análisis de densidad y orientación

El análisis de la densidad de espículas por mm^2 en las 69 muestras analizadas indica una clara zonación en sentido longitudinal y vertical del tiburón.

La representación de la densidad en los cinco ejes longitudinales indica que la mayor densidad se encuentra en las zonas dorsales (L1) y ventrales (L4). La densidad disminuye hacia el centro del tiburón (L2, L3) y la menor densidad se

encuentra en la zona central respecto al eje longitudinal (L5) (Figura 15).

El análisis en sentido vertical indica que existe una clara mayor densidad de espículas por mm^2 en la zona superior, disminuyendo a su menor valor en el centro y aumentando de nuevo hacia la parte posterior del tiburón.

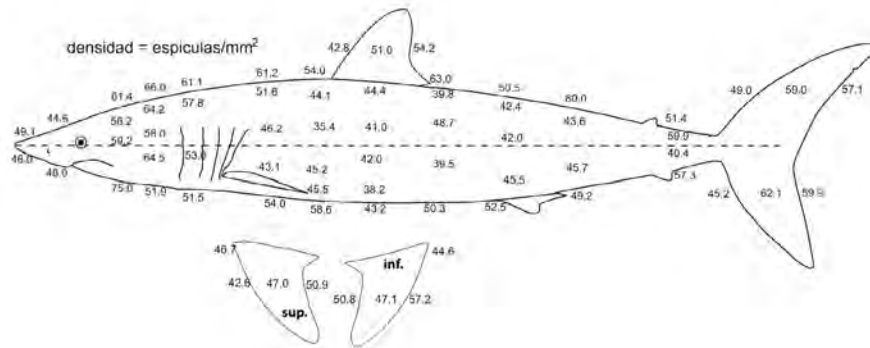


Figura 15. Distribución de la densidad de espículas/ mm^2 en las diferentes zonas del tiburón.

La aleta dorsal y la aleta pectoral en su parte superior presentan un patrón de gradación similar y muy marcado. En ambas aletas la menor densidad se encuentra en la zona más próxima del borde de ataque de la aleta y aumenta progresivamente hacia el borde de fuga. En cambio en la parte inferior de la aleta pectoral la mayor densidad se encuentra en el borde de ataque, siendo los valores de la zona central y del borde de fuga muy similares a los de la zona superior.

En el caso la aleta caudal, tanto en la mitad superior como en la inferior, la mayor densidad se encuentra en la zona central de la aleta, disminuyendo hacia los extremos y encontrándose la menor densidad en la zona próxima al borde de fuga.

El estudio de la orientación de las espículas ha permitido caracterizar que existe una gran variabilidad en la orientación angular a lo largo del cuerpo del tiburón respecto al eje longitudinal. La orientación antero-posterior de las espículas es común a todos los puntos de piel muestreados pero el ángulo parece variar en relación a la dirección dominante del flujo de agua sobre cada zona concreta. Esto último, sin embargo, deberá ser demostrado mediante un estudio que correlacione los parámetros hidrodinámicos estudiados en el modelo CFD con las variaciones angulares descritas en cada zona. Puede observarse una representación visual de la orientación de los ejes longitudinales sobre las vistas del perfil, dorsal y ventral del marrajo en la figura 16.

En esta figura, la vista de perfil muestra variaciones en función de la zona del cuerpo. En la línea L2 las espículas se orientan hacia el centro del cuerpo en la zona anterior pero progresivamente giran hacia una posición angular neutra en el centro y hacia el exterior en la parte final posterior. En la Línea L3, si excep-

tuamos la zona de la cabeza y la parte final posterior, el ángulo que forman las espículas en relación al eje referencia es muy estrecho, con un arco entre 2° y 348° . El ángulo de las espículas en la línea central L5 y la ventral superior (L6) está perfectamente alineado con el eje de referencia, con una amplitud de arco de solo 2° y 4° en toda su longitud respectivamente.

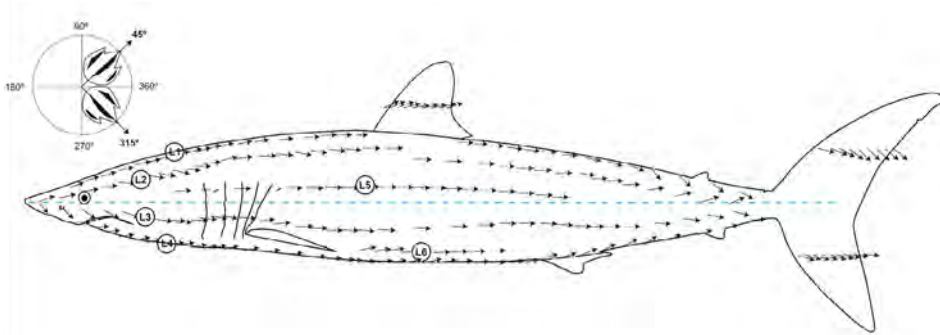


Figura 16. Representación de la orientación angular de las espículas en relación al eje de referencia que pasa por la nariz-quilla.

En las aletas el análisis limitado de muestras indica que en la aleta dorsal el ángulo formado por las espículas en el borde de ataque (25°) es mayor que en la zona central (10°) y que en el borde de fuga (17°).

En la aleta caudal superior el ángulo oscila entre 315° y 346° desde el borde de ataque al de fuga. En la caudal inferior el patrón es similar pero el ángulo es ligeramente mayor y más uniforme en toda la longitud muestreada.

En la vista dorsal en la línea L1 que discurre sobre la parte superior del marrajo la orientación de las espículas en la zona anterior oscila claramente hacia el centro del cuerpo, y con un ángulo pequeño hasta la altura de la aleta pélvica (arco de 0° a 20°), a partir de la cual el ángulo aumenta considerablemente (arco entre 339° y 330°).

En la vista ventral (línea L4) la orientación de las espículas en todo el recorrido antero posterior va desde el centro al exterior con diferentes ángulos dependiendo de la zona.

Descripción de los parámetros hidrodinámicos

Para todos los casos se mantiene la velocidad de natación constante de forma que sólo varía la altura de la rugosidad (o de la espícula).

Coefficiente de Arrastre

La figura 17A muestra el coeficiente de arrastre (C_d) en la dirección del flujo en función de la altura de espícula. Como puede apreciarse, el coeficiente de arrastre aumenta al aumentar la altura de la espícula de acuerdo a los tres casos definidos anteriormente: caso 1, caso 2 y caso 3 respectivamente.

Coefficiente de Sustentación

La figura 17B muestra el coeficiente de sustentación (C_l) en la dirección perpendicular al flujo, en función de la altura de la espícula media. Se puede observar la disminución del efecto de sustentación cuando aumenta la altura de la espícula, lo cual se explica por la rotura de la capa límite que es una de las responsables de la sustentación del animal.

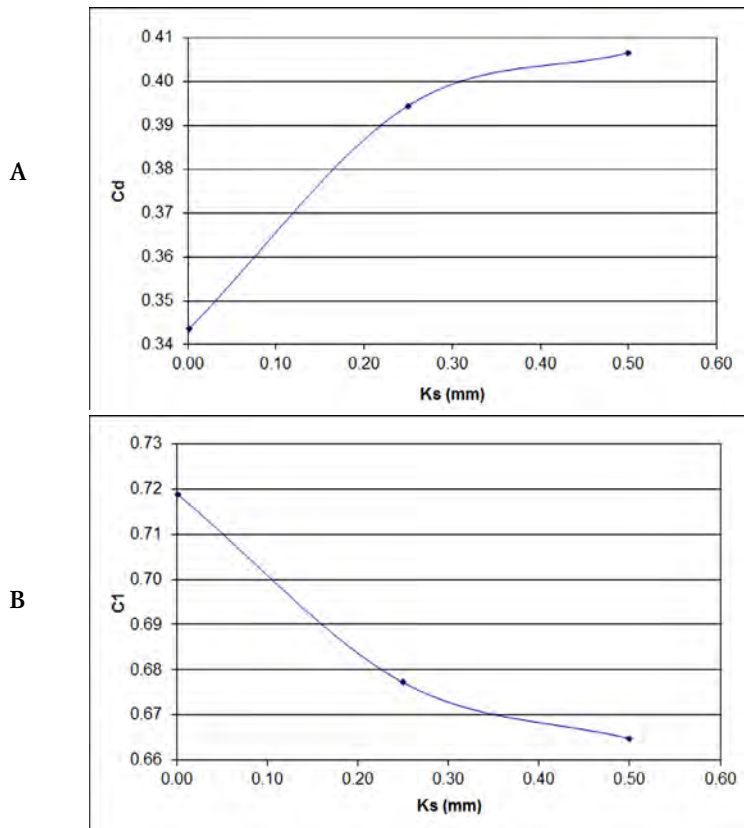


Figura 17. A) Coeficiente de arrastre (C_d) en función de la altura de rugosidad y B) Coeficiente de sustentación (C_l) en la dirección perpendicular del flujo.

Coefficiente de fricción superficial

El coeficiente de fricción superficial ($C_{f/2}$), tal y como ha sido definido anteriormente, es el que caracteriza la energía necesaria para el avance del animal en el medio marino. La figura 18 muestra precisamente la distribución del coeficiente de fricción superficial a lo largo del perfil de tiburón para las tres rugosidades estudiadas. Se observan picos en las zonas de las aletas pectorales, dorsal y trasera que ofrecen una mayor resistencia al flujo, por lo tanto una fricción mayor. Las diferencias no son apreciables entre los dos últimos casos.

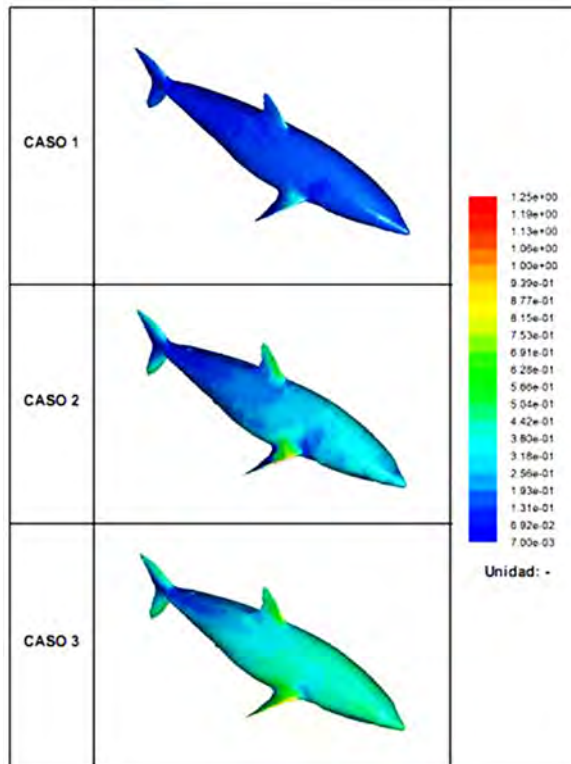


Figura 18. Tabla Comparativa del coeficiente de fricción superficial.

Campos de velocidades

En la figura 19 se muestra cómo la velocidad del fluido que rodea al tiburón disminuye conforme aumenta la altura de la espícula. Ésta, a su vez, hace que aumenten las recirculaciones en la parte posterior de las aletas pectorales, tal y como se ha

señalado para el de mayor altura de espículas.

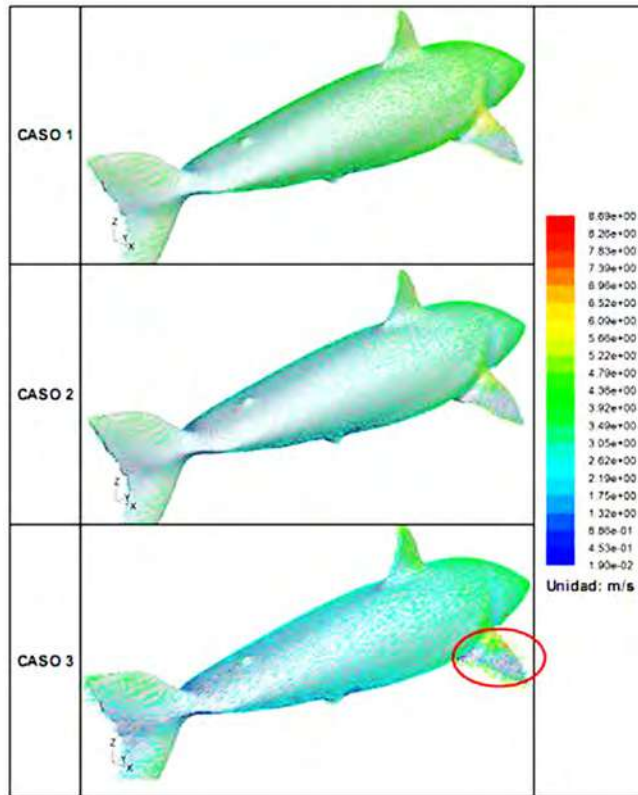


Figura 19. Comparativa de velocidad del agua sobre el perfil.

Conclusiones

Las siguientes conclusiones de este trabajo se detallan a continuación:

- Dentro de un mismo patrón de diseño, la morfología y, en menor medida, el tamaño de las espículas ha mostrado una enorme variabilidad dependiendo de la zona del cuerpo. Esta gran variabilidad parece estar relacionada con las cargas hidrodinámicas. Por ejemplo, la zona del hocico presenta espículas grandes, redondas y sin estriación anteroposterior mientras que en la zona lateral superior las espículas son de mayor tamaño y menor estriación. Las espículas de la zona anterior a la aleta caudal presentan las menores dimensiones de todo el transecto lateral. En la zona lateral inferior las espículas presentan un

tamaño más reducido aunque con una estriación muy marcada. En el caso de la aleta dorsal, existen diferencias entre el borde de ataque y la zona posterior, siendo mayores las primeras que además poseen una estriación débil. En la aleta pectoral las espículas del borde de ataque de la zona dorsal son más grandes y redondeadas que las de la zona de fuga. En la zona ventral de la aleta pectoral las espículas son más pequeñas que las de la zona dorsal.

- La densidad de espículas analizada en las muestras de piel muestra una zonación en sentido longitudinal y vertical a lo largo del cuerpo del tiburón. La densidad disminuye desde la cabeza hacia el centro del tiburón y aumenta de nuevo en la zona caudal. En sentido vertical existe una mayor densidad de espículas en la zona superior e inferior que en el centro.
- La orientación de las espículas respecto al eje longitudinal es muy variable según los ejes analizados. Aún con el limitado número de muestras utilizadas se ha conseguido caracterizar el patrón general de orientación en base a los ejes longitudinales descritos. La laboriosidad de este tipo de análisis aconseja centrarse en zonas concretas de pequeño tamaño y de alta significación con el objeto de obtener una caracterización completa de las zonas más interesantes desde el punto de vista hidrodinámico (aleta dorsal).
- El coeficiente de arrastre aumenta conforme aumenta la altura de la espícula y el coeficiente de sustentación disminuye conforme aumenta la rugosidad. Sin embargo, al duplicar el tamaño de la espícula desde 0.25 mm a 0.5 mm no se observan grandes cambios.
- El coeficiente de fricción superficial aumenta con la altura de la espícula. El tamaño de la misma afecta mucho a éste coeficiente además de cualquier protuberancia que sobresalga del cuerpo del tiburón, como aletas pectorales, dorsal y cola. Sin embargo, la media de éste coeficiente se corresponde más o menos en cada caso con el valor de k_s .
- La velocidad del fluido que rodea al tiburón disminuye conforme aumenta la altura de la espícula o la rugosidad. Ésta, a su vez, hace que aumenten las recirculaciones en la parte posterior de las aletas pectorales.
- De acuerdo a la gran variabilidad encontrada en la morfología y tamaño y el hecho de que la densidad y orientación de las espículas tengan un patrón reconocible en cada zona del cuerpo, se presupone que estos parámetros “biológicos” están relacionados con los parámetros hidrodinámicos estudiados en el modelo CFD y son los responsables de la alta eficiencia hidrodinámica del tiburón.

Los resultados obtenidos aconsejan profundizar en el estudio aplicando las metodologías ya ensayadas en zonas concretas de alto interés hidrodinámico para obtener conclusiones directas sobre los mecanismos implicados en la alta eficiencia hi-

drodinámica que muestran esta especie de tiburones. En concreto, sería deseable estudiar cómo las variaciones de los parámetros biológicos de densidad, tamaño y orientación de las espículas de la piel afectan a los parámetros hidrodinámicos (turbulencia, coeficientes de arrastre y sustentación) en modelos de aletas y cascos de barcos mediante modelos CFD. Los resultados permitirían establecer una comparación del ahorro y la eficiencia energética entre embarcaciones con cascos de superficie lisa y otros que simulen un recubrimiento laminar en el casco que imiten las características hidrodinámicas de la piel del tiburón.

NOMENCLATURA

CFD	Computational Fluid Dynamics
C_d	Coefficiente de Arrastre
C_l	Coefficiente de Sustentación
$C_{f/2}$	Coefficiente de fricción superficial
Re	Número de Reynolds
G_k	Generación de energía cinética turbulenta
k	Energía cinética turbulenta
ε	Ratio de disipación turbulenta
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Números de Prandtl de energía y disipación
C_s	Roughness Constant
C_V	Coefficiente de viscosidad turbulenta
K_s	Roughness Height
y_p^+	Espesor adimensional de la subcapa laminar
ρ	Densidad promedio del agua del mar ($\approx 1,000 \text{ kg m}^{-3}$)
μ	Viscosidad dinámica promedio del agua del mar ($= 1.52 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
F_d	Componente de la fuerza en dirección al flujo
A	Área de referencia
F_l	Fuerza de sustentación en dirección perpendicular al flujo
τ_w	Tensor local de tensiones de las paredes

BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS® Academic Research (2013) Release 15.0, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- BALL, P. (1999). Shark skin and other solutions. *Nature*, 400, 507-508.
- BECHERT, D. W., BRUSE, M., HAGE, W., VAN DER HOEVEN, J. G. T. & HOPPE, G. (1997). Experiments on drag reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, 338, 59-87.
- BECHERT, D. W., BRUSE, M., & HAGE, W. (2000). Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin. *Experiments in Fluids*, 28, 403-412.
- BRADY, R. F. (2000). No more tin. What now for fouling control? *Journal of Protective Coatings and Linings*, 14, 42-48. Obtenido de <http://brennan.mse.ufl.edu/research-areas/antifouling/> (consultado en Oct. 2017).
- BRIAN, D., & BHARAT, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368, 4775-4806.
- BRITT, R. (2005). *Fake Shark Skin Could Make Navy Fleet Faster*. Obtenido de http://www.livescience.com/technology/050715_shark_skin.html (consultado en Sept. 2017).
- CALLOW, M. E.; JENNINGS, A.R.; BRENNAN, A.B. (2002). Microtopographic cues for settlement of zoospores of the green fouling alga *Enteromorpha*. *Biofouling*, 18(3), 237-245.
- CARLSON, J., GHAHEY, S., MORAN, S., ANH TRAN, C. & KAPLAN, D.L. (2006). Biological Materials in Engineering Mechanisms. In Yoseph Bar-Cohen (Ed.). *Biomimetics: Biologically inspired technologies* (pp. 365-380). Boca Ratón: Taylor & Francis CRC Press.
- COMPAGNO, L. J. V. (1984). FAO Species Catalogue. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of sharks species know to date. *FAO Fisheries Synopsis*, 125, 4(1), 650-654.
- HOIPKEMEIER-WILSON, L., SCHUMACHER, J. F., CARMAN, M. L., GIBSON, A. L., FEINBERG, A. W., CALLOW, M. E., FINLAY, J. A., CALLOW, J. A., & BRENNAN, A. B. (2004). Antifouling Potential of Lubricious, Micro-engineered, PDMS Elastomers against Zoospores of the Green Fouling Alga *Ulva* (*Enteromorpha*). *Biofouling*, 20(1), 53-63.
- LEE, S-J., LIM, H-C., HAN, M. & LEE, S. S. (2005). Flow control of circular cylinder with a V-grooved micro-riblet film. *Fluid Dynamics Research*, 37, 246-266.
- LION, W. W., SHABIR, A., SHIH, T. H. & ZHU, J. (1995). A new k-epsilon eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation. *Computers and Fluids*, 24, 227-238.
- MULLINS, J. (1997). Secrets of a perfect skin. *New Scientist*, 153, 28-31.
- NARESH, M. D., ARUMUGAM, V., & SANJEEVI, R., (1997). Mechanical behaviour of shark skin. *Journal of Bioscience*, 22, 431-437.
- SHENZHEN, B. & B Technology Co. LTD, (2017). <http://www.sharkskincoating.com/>(consultado en Oct. 2017).
- SCHUMACHER, J. F., ALDRED, N., CALLOW, M. E., FINLAY, J. A., CALLOW, J. A., CLARE, A. S., & BRENNAN A. B., (2007). Species-specific engineered antifouling topographies-correlations between the settlement of algal zoospores and barnacle cyprids. *Biofouling*, 23(1), 55-62.
- WU, Y. & CHRISTENSEN, K. T. (2010). Spatial structure of a turbulent boundary layer with irregular surface roughness. *Journal of Fluid Mechanics*, 665, 1-37.

De la arquitectura ecológica a la biomimesis

Alex Mitxelena Etxeberria

Departamento de Arquitectura (UPV / EHU)

Enkarni Gómez Genua

Departamento de Física Aplicada I (UPV / EHU)

NOTA ALX LECTORX: Queremos aclarar que en el uso de un lenguaje inclusivo lxs autorxs hemos elegido emplear el carácter “x”. Desde nuestro punto de vista, este carácter tiene la función de incluir a todxs lxs individuoxs posibles, en su diversidad de géneros y sexos ya que, por un lado, es el carácter utilizado como variable matemática de una ecuación que cada unx debe resolver y cuyo resultado siempre es diferente y es, además, el signo de la multiplicación.

El desarrollo económico de los países industriales se basa, en gran medida, en el consumo de recursos, lo que origina una paulatina contaminación mundial. Esta circunstancia resulta insostenible no sólo a largo plazo, sino en el presente también, ya que este modelo está generando el calentamiento global, la desertificación del planeta y otros desequilibrios en los ecosistemas que pueden hacer la vida, en la forma que la conocemos hoy, insostenible.

Conscientes de esta situación y de la necesidad de una rápida respuesta, tras la Segunda Guerra Mundial (o, incluso, con más anterioridad), surgieron movimientos ambientalistas con ideales basados en la “protección medioambiental”. La cuestión consistía en mantener el crecimiento, la vida y la creación pero perjudicando el medio ambiente lo menos posible. Surgieron los términos “ecológico” y “sostenible” y las teorías y las prácticas también se formaron con ellos.

El término ecológico, sin embargo, no significa necesariamente sostenible. La sostenibilidad, no sólo significa no dañar el medio ambiente, sino la posibilidad de mantener el modelo productivo a largo plazo. En principio, la sostenibilidad incluye el concepto de ecología pero amplía su significado. Esto es, lo que no es sostenible no es ecológico. Así, podríamos decir que las ideas de ecología y sostenibilidad son complementarias.

La arquitectura, de hecho, siendo una de las responsables del gran consumo de recursos y emisiones contaminantes, no puede quedarse fuera de este paradigma. La arquitectura, no sólo debe ser también ecológica, sino además sostenible. En este sentido y respondiendo a la alarma y sensibilidad social respecto al medio

ambiente, de la misma manera que han surgido distintos sellos tanto nacionales como internacionales que garantizan que un producto es ecológico (de forma que así lxs consumidorxs puedan elegir teniendo esa información), surgen también los sellos que certifican y catalogan el grado de sostenibilidad y/o eficiencia energética de las edificaciones. Al amparo de estos sellos las edificaciones se catalogan y certifican según su grado de sostenibilidad y eficiencia energética, puesto que ya no resulta ético alejarse del respeto hacia el medio ambiente. El logro de estos sellos y el grado de cumplimiento es sinónimo de calidad y, en cierta medida, son buscados tanto por pequeñxs promotorxs como por grandes corporaciones.

Para lograr un sello determinado hay que cumplir una serie de requisitos que son establecidos por el propio sello, y que no siempre van a ser los mismos, es decir, cada sello establece los suyos. Estos sellos gozan de mayor o menor apoyo de lxs expertxs, pero, desde nuestro punto de vista, los más cuestionados parecen haber sido creados para perpetuar el modelo existente, en lugar de proponer nuevas formas de construir.

A comienzos del siglo XXI, ha surgido un nuevo paradigma: la biomímesis. Esta idea trata de ir más allá respecto al medio ambiente, imitando las técnicas y recursos que nos ofrece la propia naturaleza como solución a los problemas. En este libro precisamente encontramos distintos ejemplos aplicados a diferentes disciplinas, desde la ingeniería a la economía. No olvidando la arquitectura, de la que nos ocupamos en este capítulo.

Como decíamos, este capítulo presenta el camino desde la ecología a la biomímesis aplicado a la arquitectura, y propone una arquitectura basada en los principios de los sistemas naturales, según un mayor respeto, no sólo del medio ambiente, sino también a favor de un nuevo equilibrio entre los seres humanos y la naturaleza, e incluso entre los propios seres humanos.

La relación del ser humano con el medio que le rodea no es sencilla y, sin embargo, su vida depende de esta relación. Las estrategias utilizadas en su relación con el medio han sido diferentes a lo largo de la historia, desde la adaptación hasta la dominación. Dominar el medio ha sido una de las aspiraciones humanas cuyo punto de inflexión se puede situar en la revolución científica del s XVII (Capra, 1982). Entender el mundo como una máquina (paradigma newtoniano) marca un antes y un después, ya que la idea de dominación de la naturaleza se refuerza en detrimento de la adaptación; y la explotación de recursos adquiere una magnitud que con el paso del tiempo y la historia se demuestra insostenible. A pesar de ello, en la actualidad todavía las principales economías mundiales siguen dependiendo de la extracción de recursos naturales y, además, ayudados por las máquinas, lo llevan a cabo de una forma muy agresiva.

En este contexto distintos movimientos sociales de la segunda mitad del s XX se posicionan ante el reto de establecer una relación con la naturaleza más allá de

la dominación y explotación de recursos, creando un nuevo marco en el cual la naturaleza se convierte en un agente más, no un objeto de dominación ni un ente dominante. Así surgen movimientos como el “ecologismo” y conceptos como la “sostenibilidad”. Se trata de encontrar formas de mantener una relación equilibrada, permitiendo un modelo de renovación de los recursos que se pueda extender en el tiempo, (y a nivel ideal, que pueda perdurar eternamente). Surge la idea de legar un planeta habitable para las siguientes generaciones.

La *Organización de Estados Iberoamericanos* y la página web de su programa de acción global publica “un compromiso renovado por la educación para la sostenibilidad”:

El concepto de sostenibilidad surge a principios de la década de los años 80, a partir de perspectivas científicas sobre la relación entre el medioambiente y la sociedad y la publicación de varios documentos relevantes, principalmente la Estrategia Mundial para la Conservación (*World Conservation Strategy*, UICN, 1980, *Primera estrategia global de Desarrollo Sostenible*) y el conocido como *Informe Brundtland* (*Our Common Future*, CMMAD, 1988). Surge como resultado de los análisis de la situación del mundo, que puede describirse como una “emergencia planetaria” (Bybee, 1991) y de larga duración (Orr, 2013), como una situación insostenible, fruto de las actividades humanas, que amenaza gravemente el futuro (y ya el presente) de la humanidad. Se habla incluso de una etapa geológica nueva, el *antropoceno*, término propuesto por el premio Nobel Paul Crutzen para destacar la responsabilidad de la especie humana en los profundos cambios que está sufriendo el planeta (Sachs, 2008), vinculados a lo que Folke (2013) califica como “la Gran Aceleración de la actividad humana”, especialmente a partir de la década de 1950, que amenaza con sobrepasar los límites del planeta¹.

Más allá del ecologismo y la sostenibilidad, el concepto de la biomímesis propone inspirarse en la naturaleza como forma de mejorar el diseño de las creaciones humanas y como forma de buscar soluciones a los problemas. La biomímesis también implica un compromiso ecológico, ya que entiende que la naturaleza lleva milenios desarrollando modelos que resultan sostenibles. Por lo tanto, podemos deducir que las soluciones biomiméticas serán duraderas y reproducibles a lo largo del tiempo, tal y como lo demuestra la naturaleza. Nuestra intención aquí es reflexionar sobre la forma en la que podemos aplicar la biomímesis para la definición de una arquitectura sostenible y ecológica.

Interpretamos que hay dos formas de abordar lo biomimético. La primera consiste en la imitación de las formas y estructuras de la naturaleza de manera descontextualizada. Se espera que el diseño de productos con formas inspiradas en la naturaleza pueda ayudar a optimizar o reducir el uso de recursos y a mejorar los resultados. Sin embargo, ello no implica que estos diseños sean más ecológicos o sostenibles.

La segunda forma de abordar lo biomimético es aquella que se inspira en la naturaleza globalmente, en sus ciclos, en su manera de emplear la energía y los recursos. Esto creará diseños en general y arquitectura, en particular, que respeta los ciclos y la energía y que también emplea materiales ecológicos o sostenibles.

Entendemos que ambas formas de interpretar lo biomimético ayudan en la consecución de los objetivos que nos hemos propuesto. Una idea no contradice a la otra. Al contrario, se pueden complementar perfectamente. La primera forma se centra más en los resultados y en los recursos necesarios para conseguirlos. La segunda definición propone una reflexión general y la revisión de ciertas ideas de base en la génesis de la arquitectura.

En este texto queremos proponer unas primeras ideas que puedan servir de inspiración para desarrollar este paradigma de arquitectura biomimética. Queremos plantear una arquitectura que tenga en cuenta los principios de los sistemas naturales definidos por Benyus (1997) de manera crítica, ecológica y sostenible. Se trata, como decimos, de unas primeras ideas y conceptos, dejando a los lectores la posibilidad de decidir cuáles serán las estrategias o las claves para llevarlas a cabo.

Por lo tanto, proponemos la aplicación de los principios de los sistemas naturales a la arquitectura y el urbanismo. Desde la ideación, el método de trabajo y hasta los resultados obtenidos.

Los principios de los sistemas naturales son:

1. La naturaleza funciona con la luz del sol.
2. La naturaleza sólo utiliza la energía que necesita.
3. La naturaleza adapta la forma a la función.
4. La naturaleza lo recicla todo.
5. La naturaleza premia la cooperación.
6. La naturaleza se beneficia de la diversidad.
7. La naturaleza aprovecha lo que tiene cerca.
8. La naturaleza limita los excesos desde dentro.
9. La naturaleza aprovecha el poder de los límites.

La aplicación de algunos de estos principios será inmediata o fácilmente resoluble. Otros, sin embargo, requerirán de una reflexión más profunda y no encontrarán una sencilla aplicación.

La naturaleza funciona con la luz del sol

La luz del sol es una fuente de energía muy importante a la hora de proyectar

arquitectura. La arquitectura vernácula tiene en cuenta esta forma de energía de forma intuitiva y empírica. Sin embargo, el desarrollo de la electricidad hace que el ser humano experimente el espejismo de poder tener luz a cualquier hora del día y que la fantasía de que la noche se convierta en día pueda ser realizable. Así, a partir del siglo XIX en cierta medida se puede permitir darle la espalda al sol. La toma de conciencia del derroche de medios y energía que esto supone hace que la arquitectura deba de nuevo mirar al sol y a sus posibilidades. Hoy en día no sería ético ni responsable diseñar obviando la fuente de energía y bienestar que supone el sol. Por eso encontramos en la arquitectura actual nuevas propuestas de uso de este recurso.

La casa solar pasiva propone el aprovechamiento de la luz del sol para reducir los costes del calentamiento de los espacios habitables. De la misma forma, propone cerrar o aislar las partes que no reciben radiación solar y son, por tanto, partes que hacen perder el calor interior (AIA Research Corporation, 1978). Además de la apertura de ventanas, existen otras técnicas para aprovechar el calor del sol y otras pautas de diseño para garantizar la ventilación de los espacios sin perder el calor interior. En climas cálidos las estrategias deben ser inversas, esto es, se trata de evitar la exposición directa al sol y proteger de esa forma el frescor de los espacios habitables.

La arquitectura orgánica de comienzos del siglo XX propone otra forma diferente de “aprovechar” la luz del sol: además de recoger la radiación solar, organiza la vivienda según el movimiento del astro. Arquitectos como Frank Lloyd Wright o Hugo Häring exploraron la idea de la casa como espacio que se organiza según el recorrido del sol a lo largo del día.

A comienzos de los años veinte, Hugo Häring comenzó a desarrollar viviendas según una organización fluida y dinámica que se adaptaba a los recorridos de los habitantes y la luz del sol (Blundell Jones, 1999). Las habitaciones de estas casas no son rectangulares, su geometría se define a partir de los movimientos y los recorridos funcionales. Las ventanas y los espacios interiores se organizan para captar la luz del sol. Además, según el tipo de luz que obtenemos del sol, diferente a lo largo del día, se desarrollan diferentes actividades. Por ejemplo, los dormitorios disfrutaban de luz por la mañana para ayudar a comenzar la jornada de forma activa. Y la luz del atardecer parece la más adecuada para iluminar la mesa sobre la que se sientan los habitantes para cenar y concluir el día.

El arquitecto Rudolf Schindler (1934) construyó a mediados del siglo XX casas en Los Ángeles con tejados translúcidos para recrear atmósferas en las habitaciones y unir los espacios interiores con el exterior. Se trata de atraer al interior de los espacios de la casa la luz y la atmósfera exterior. De esta forma, los cambios a lo largo del día y de las estaciones cambiarán también la iluminación de los espacios interiores de la vivienda.

Podríamos considerar como arquitectura biomimética una casa solar que modifique su espacio en relación al sol. El sol, el cosmos y la naturaleza tienen una estructura cíclica y eterna. Una casa iluminada según los ciclos solares, haciendo consciente al habitante del paso del tiempo, de las estaciones, recordando a los individuos su pertenencia a la tierra y al cosmos. Una arquitectura que cambia según la iluminación natural y que permite ser conscientes de las estaciones del año ayudará al bienestar psicológico de los habitantes favoreciendo su sentido de arraigo y su sentido de estar en un espacio y tiempo concretos.

La naturaleza sólo utiliza la energía que necesita

Utilizar sólo la energía necesaria es, sin duda, la primera forma de gestionar recursos de forma responsable y reducida. La forma de optimizar esta energía serán las estrategias que deberemos desarrollar después. La historia está llena de ejemplos de esta optimización, desde la mejora en el uso de combustibles para conseguir una fuente de energía, hasta el aumento de energía conseguido con la misma cantidad de combustible.

Dejando a un lado esos estudios, nuestra reflexión se centra en el cuestionamiento de la propia necesidad, ya que creemos que este estudio es anterior. Esto es, primero analizaremos las propias necesidades e intentaremos reducirlas, para después estudiar la forma de reducir la energía necesaria para alcanzar estas necesidades. Se trata de una doble reducción.

Aplicadas a la arquitectura y al urbanismo la idea de necesidad es compleja, ¿Qué necesita o no necesita el ser humano respecto de la arquitectura? ¿Qué necesidades puede cubrir la arquitectura? ¿Cuáles son necesidades reales y cuáles pueden responder más a deseos? ¿Cómo distinguir unas de otras? ¿Puede incluso ser la arquitectura algo más que un capricho o un lujo? Además, cada sociedad y cultura puede responder a estas preguntas de manera diferente, siendo las respuestas válidas en todos los casos.

Proponemos la aproximación a este punto desde la definición que Artur Manfred Max Neef (1986) hace de las necesidades y, a partir de ahí, hacer una reflexión sobre cuál puede ser la energía necesaria para cumplirlas. Esto es, primero debemos saber cuáles son las necesidades para después tener idea de la energía que será necesaria emplear. Las necesidades humanas básicas clasificadas por Neef (1986) son nueve:

1. Subsistencia
2. Protección
3. Afecto

4. Entendimiento
5. Participación
6. Ocio
7. Creación
8. Identidad
9. Libertad

Estas necesidades son muy amplias y se pueden entender como genéricas. Además entendemos que algunas pueden ser culturales y, por lo tanto, tener una forma determinada en un entorno y otra en otro. Tal vez podrían ser discutidas, pero desde nuestro punto de vista todas son importantes para un desarrollo armónico y completo del ser humano. Evidentemente, entendemos que hay una cierta graduación entre ellas y unas pueden ser más básicas que otras.

Para analizarlas desde el punto de vista de la arquitectura las hemos dividido en tres grupos: las tres primeras corresponden al espacio más individual o privado; las tres segundas a un espacio más abierto como el urbano; y las tres últimas al espacio de la participación y la creación. Estos grupos no pueden entenderse como algo estanco, ya que las necesidades enumeradas pueden pertenecer a varios de ellos.

Como decíamos, las necesidades mencionadas en primer lugar son la subsistencia, la protección y el afecto y pueden relacionarse, en lo que a la arquitectura se refiere, con el espacio más privado e íntimo. La vivienda, con todas sus variantes culturales y espaciales, es sinónimo de protección, necesaria para la subsistencia y el lugar donde suceden los afectos. Deberían diseñarse viviendas de forma conciliadora que ofrezcan espacios en los que sus habitantes, además de satisfacer las dos primeras, tienen en cuenta el afecto como eje de convivencia (Hayden, 1984). Desde nuestro punto de vista, conciliar puede tener distintas acepciones. La primera de ellas tiene que ver con ser capaz de simultanear en un espacio distintos tipos de actividades; pero además, y puesto que el ser humano es un ser social, tiene que ver también con la convivencia armónica entre varios individuos que comparten un mismo espacio y entre los que se producen distintos afectos. Una vivienda conciliadora debe tener en cuenta las distintas actividades realizadas (de ocio, productivas y reproductivas), así como a los distintos usuarios y sus relaciones y afectos. Es decir, la idea principal a la hora de diseñar la vivienda son las personas, sus actividades y los afectos entre ellas. Esto es, la técnica y el diseño deberán estar al servicio de las personas.

El segundo bloque de necesidades, el entendimiento, el ocio y la participación, está más relacionado con el diseño urbano. De nuevo, la perspectiva de género en el diseño urbano nos orientará en la creación de una ciudad en la que el ocio, la vivienda y el trabajo no están separados. Muy al contrario, se buscarán formas

que hagan posible la convivencia de estos usos y permitan su fácil acceso a la ciudadanía. De esta forma, además, se conseguirá un descenso en el consumo de energía. Entendemos la perspectiva de género en el urbanismo desde el punto de vista de la inclusión, teniendo en cuenta que las personas realizan tareas tanto reproductivas como del ámbito de la producción y que para la realización de ambas requieren diferentes recursos. Tradicionalmente, se tienen más en cuenta las tareas de producción descuidando aquellas tareas reproductivas y que han sido históricamente realizadas por mujeres. Como decimos, el diseño de ciudades en cuyo centro se hallen las personas supondrá un ahorro de energía.

Si, además, la creación de estas ciudades se realiza propiciando mecanismos participativos, se garantizará la satisfacción de las necesidades de entendimiento y participación, propiciando el marco en el que cumplir las necesidades mencionadas en último lugar: la creación, la identidad y la libertad.

La medición en forma de energía de estas necesidades es ciertamente compleja. Sin embargo, podemos entender que, dependiendo de la arquitectura y la ciudad que construyamos, se consumirá más o menos energía.

Para que las ciudades y las arquitecturas sean más eficientes energéticamente deberán tenerse en cuenta las necesidades de todas las personas que habitan en ellas. Si se definen los proyectos solo para los sectores más influyentes, aquellos grupos que no se han tenido en cuenta representarán un gasto energético superior. De esta manera, el cómputo general de gasto de energía no se verá reducido. Cuanto más se piense en todas las personas y en sus necesidades, a nivel urbano se diseñará de forma que la realización de las necesidades de todo el colectivo requiera de menos energía. Por ejemplo, un aspecto en el que se debe trabajar activamente y en el que más obvio es el ahorro energético de un buen diseño es el transporte urbano.

La naturaleza adapta la forma a la función

Esta afirmación tiene su origen en la industrialización y en la creencia de que la optimización de los tiempos y la separación de las competencias y las tareas (aspectos que formaron la base del positivismo) son la garantía para conseguir el bienestar social.

Esta idea responde a un momento histórico muy determinado, en el cual la gran acumulación de personas en las ciudades, respondiendo a la llamada de la industria y de la necesidad de mano de obra, supuso un nivel de salubridad muy bajo en los entornos urbanos habitados. La higiene colectiva, en estos entornos urbanos transformados, se encontraba muy lejos de lo que eran los entornos rurales, mucho menos poblados y donde había más espacio para desarrollar la vida.

Así urbanistas y arquitectxs de finales del siglo XIX y comienzos del XX vieron como solución la estandarización y la separación como estrategias para solucionar dos problemas: por un lado, crear entornos más salubres para grandes acumulaciones de personas y, además, reducir los gastos en la producción de productos a través de la fabricación estandarizada e industrializada.

Sin embargo, a lo largo de todo el texto estamos poniendo en cuestión precisamente que la estandarización lleve a una mejor calidad de vida, que es de lo que la arquitectura debe ocuparse. La diversidad de formas en que cada individuo o colectivo realiza una misma función hace que la estandarización pueda no ser útil para ningunx de ellxs, encorsetando y limitando la vida a una sola forma de hacer. La pregunta que surge entonces es entonces, ¿cuál es la mejor forma de hacer una función?

Las funciones pueden estudiarse hasta determinar su forma, pero este trabajo estará condicionado según la manera en la que nos aproximamos a la definición del problema. Por ejemplo, el análisis para definir la cocina funcional realizado en los años 20 en Alemania dio como resultado un laboratorio en el que la preparación de la comida se desarrollaba de manera muy efectiva (Muxi, 2015). Sin embargo, olvidó el aspecto social de esta actividad cotidiana, proponiendo una cocina que aislaba a la persona que desarrollaba de forma solitaria estas funciones. Perspectivas posteriores han mantenido lo funcional, en la medida de lo posible, abriendo este espacio al resto de la vivienda. Sin duda, la aparición de nuevas tecnologías ayuda a conseguir estos objetivos.

Las funciones cambian con las costumbres individuales y sociales. No realiza las mismas tareas una persona en la adolescencia, cuando cuida a sus hijas e hijos o cuando pierde movilidad de forma puntual o permanente. También socialmente surgen nuevas costumbres y necesidades. Por ejemplo, las unidades de convivencia cambian y las relaciones entre las personas que las componen también se ven modificadas de forma que las viviendas en las que estas unidades habitan se adaptan a nuevas demandas. La arquitectura puede permitir estos cambios o puede dificultarlos.

La diferenciación de los espacios es una característica no tan extendida en las culturas como podemos pensar. Las psicólogas Almerico y Pérez López (1998), describen la casa “altamente diferenciada” como aquella en la que cada parte cumple una determinada función y señalan su extensión exclusivamente en las culturas europea y norteamericana. Las culturas nómadas muestran el ejemplo más extremo, debido a que el montaje y desmontaje de la vivienda y su transporte exige que esta sea de dimensiones reducidas, reduciendo en consecuencia los espacios que la componen. La vivienda nómada de un único espacio se compone de “ámbitos” diferenciados según la disposición de elementos como el mobiliario. Al tratarse de elementos que se pueden mover, la vivienda se puede adaptar a cam-

bios fácilmente, respondiendo a necesidades estacionales o temporales.

Antes de la especialización de los espacios domésticos que conocemos, las casas medievales de nuestra cultura constaban de un único espacio multifuncional. Las habitaciones no estaban especializadas, había un único espacio para el hogar y, según los muebles que se empleaban y su disposición, se realizaban diferentes acciones a lo largo del día y según las necesidades de sus habitantes (Mitxelena, 2014). Ciertamente, la propia idea de la privacidad ha cambiado en nuestra cultura, de forma que la vivienda de nuestros antepasados difícilmente se adaptaría a nuestras exigencias actuales.

El arquitecto nipón Sou Fujimoto (2008) propone dos formas antagónicas de dar respuesta a las necesidades funcionales. Según describe, la casa puede crearse según el tipo “nido” o el tipo “cueva”. El tipo “nido” se formaliza según unas necesidades previstas. Por lo tanto, cada función tiene asignado un lugar. Así, el espacio resultante es concreto y definido, ajustado a ciertas funciones. Se trata del modelo más extendido, aquel que responde a las necesidades ofreciendo un espacio concreto para responder a cada una de ellas. Así surge la vivienda, compuesta por espacios concretos para dormir, para estar, para comer, para leer, etc. El espacio “cueva”, por contra, se materializa antes de definir las funciones que se realizarán. Este modelo propone espacios con características diferentes. Será quien utiliza estos espacios quien decida donde se establece en cada momento y dónde realiza las tareas. Esto permitirá realizar las funciones de acuerdo a las características del espacio, pero también según el estado de ánimo o el momento de desarrollarlas.

Las propuestas expuestas nos llevan a la reflexión sobre la creación de una arquitectura que responda de forma puntual a unas funciones concretas. Sin duda, será una arquitectura que no será capaz de adaptarse a nuevas necesidades y nuevos usuarios. El “espacio nido” de Fujimoto es limitado, ya que el habitante no puede modificar sus rutinas, improvisar ni variar sus costumbres. Sin embargo, en el “espacio cueva” el habitante podrá improvisar, podrá variar sus costumbres, adaptar la casa a sus necesidades, sus cambios. En lugar de oprimir funciones, la cueva es un medio de provocación sin restricciones. Tal vez de una forma intencionada, el arquitecto nipón utiliza como referencia, precisamente, el primer espacio habitado por el ser humano.

La naturaleza lo recicla todo

Reciclar significa volver al ciclo. En las sociedades modernas actuales muchas veces utilizamos mal la palabra reciclar, ya que la confundimos con separar. En nuestras viviendas modernas no reciclamos los materiales o residuos, sino que los

separamos, tal vez para ser reutilizados o reciclados pero en la gran mayoría de los casos no ocurre eso y lamentablemente no hay sólo razones técnicas sino políticas detrás de ello.

Mientras, la naturaleza cierra los ciclos utilizando los desechos como nutrientes. Así, las hojas de los árboles al caer nutren el sustrato terrestre que alimenta a los árboles y a otras plantas. Es decir, vuelven al ciclo los materiales que, tras ser utilizados, se convierten en lo que cabe entender como residuos. Tales residuos se convierten, a su vez, en nutrientes elevando su valor. La economía circular propone observar los ciclos de la naturaleza para aplicarlos a conceptos económicos en aras de una mayor sostenibilidad:

La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía,...) se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva economía, circular -no lineal-, basada en el principio de «cerrar el ciclo de vida» de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía².

Llevar este concepto a la arquitectura nos obliga a pensar en edificios o sistemas urbanos que reciclan o reutilizan los residuos. Esto se puede lograr de dos formas diferentes. Por un lado, podemos crear arquitectura que no va a generar posteriormente residuos (una vez demolida por ejemplo) y se pueda maximizar la reutilización de los materiales, en cuyo caso es importante la elección de los mismos. Materiales cuya producción sea lo más ecológica y sostenible posible; que no supongan una sobreexplotación de recursos; que sean ellos mismos, en la medida de lo posible, producto del reciclado o reutilización de otras demoliciones o de residuos.

Además, habrá que tener en cuenta la disposición de los mismos en el sistema constructivo. Disposición que permita un fácil desmontaje y separación, uno de los problemas precisamente a la hora de proceder a las demoliciones.

Más allá del tipo de materiales utilizados y su disposición, podemos hablar de edificios, o sistemas urbanos que reciclan en el día a día. El mero hecho de atender a las necesidades de las personas de manera eficiente tenderá a generar menos residuos. Además, hay que pensar en sistemas adecuados de separación y reciclaje de los mismos que puedan utilizarse como generadores de energía.

En este sentido, hablamos de sistemas de economía circular, o ciudades circulares, cuyo primer llamamiento de adhesión se realizó en París en diciembre del 2015, en la Cumbre por el clima³. A partir de entonces se decidió crear la *Circular Cities Network*⁴, con el objetivo de compartir experiencias en este campo. La *Red de Ciudades Circulares* ofrece una plataforma para compartir conocimiento y

ofrecer herramientas para el cambio de paradigma en el desarrollo de las ciudades. Las primeras ciudades adheridas a esta iniciativa son Austin, Boulder, Copenhague, Londres, Ljubljana, Nueva York, Peterborough, Phoenix y Río de Janeiro. Por lo tanto, debemos pensar en una arquitectura que genere menos residuos y ciudades que también programen la reutilización de los residuos como generadores de energía y como una vía para repensar sus usos.

Reutilizar también puede significar compartir. Espacios en los que se comparten objetos y bienes. Tiene que ver, así mismo, con la colaboración, la cooperación y supone no solo la reutilización o reciclaje, sino la reducción del consumo a través del hecho de compartir. Por ejemplo, las viviendas que fomentan la convivencia favorecen tanto la reducción como la reutilización o el reciclaje de recursos. Sin duda, compartir es una excelente manera de reducir el uso de recursos y energía ya que conlleva un mayor rendimiento.

La naturaleza premia la cooperación

Los sistemas naturales cuidan de las generaciones futuras y recompensan la cooperación, por lo que la arquitectura biomimética también deberá ser facilitadora, conciliadora y recompensará la ayuda mutua de las personas que habitan en ella.

En el punto anterior hemos explicado las ventajas de compartir. Sin duda, compartir es una forma de cooperar. Pero cooperar tiene un significado más amplio ya que implica trabajar conjuntamente, no sólo compartir los recursos, sino desarrollar un trabajo en equipo para obtener un resultado común buscado.

La cooperación no surge de la nada. La arquitectura y el urbanismo deben poner los medios para facilitar el encuentro entre las personas y hacer posible, de ese modo, el surgimiento de la intención de cooperar. Por ello, desde la arquitectura y el urbanismo deben diseñarse espacios de encuentro deseables entre las personas, espacios adecuados de relación.

Los espacios de relación deben diseñarse pensando también en el encuentro, el intercambio y la interacción de las personas que los habitan. Al igual que la naturaleza, necesitamos espacios en los que cuidar a la comunidad y que primen el bienestar de las personas. De esta forma, crearemos una arquitectura pensada para nuestra forma de vida, pero sin olvidar el contexto del que formamos parte. Así, será una arquitectura sostenible, desde el punto de vista energético y social, y también sostenible en el tiempo, gestionable adecuadamente.

El modelo de viviendas cooperativas *co-housing* está formado por una comunidad cohesionada por su forma de entender la relación entre vida privada y vida común. Está formada por viviendas y una dotación importante de servicios comunes. Está planeada y gestionada por sus residentes, según el modelo que ellos

mismos deciden, lo que les permite definir el proyecto según sus necesidades específicas reales. El *co-housing* facilita la convivencia y la cooperación entre los residentes, así como la centralización de equipamientos y servicios, aportando beneficios sociales, económicos y medioambientales⁷.

Las ventajas que ofrecen este tipo de comunidades pueden entenderse desde una doble perspectiva: por un lado, es una forma de conseguir más o mejores dotaciones gracias al acto de compartir. Pero también se trata de una forma de conseguir una forma más conectada con las personas que nos rodean, para alcanzar un mayor arraigo y disfrutar de relaciones personales más ricas e interesantes, lo que conlleva una forma de ofrecer y obtener cuidados y ayudas a muchos y diferentes niveles.

La naturaleza se beneficia de la diversidad

La arquitectura moderna llevó al extremo la idea de la ciudad como red de comunicación y movimiento. Los conceptos expuestos en la *Carta de Atenas* en el año 1941 proponían un acercamiento técnico y aséptico al territorio. Las ideas del funcionalismo habían logrado eliminar al resto de interpretaciones posibles sobre la realidad. Sin embargo, tras la Segunda Guerra Mundial, las nuevas generaciones de arquitectas y arquitectos entendieron que las diferencias existentes en los lugares eran fuente de información para construir entornos adaptados a las características físicas y culturales de cada entorno.

De nuevo, aplicando la perspectiva de género en el diseño urbano se diseñarán ciudades en las que conviven diferentes funciones, haciéndolas más accesibles y en las que la interactividad creará espacios más habitables. Según describe Gea 21 (2007) “La mezcla de usos es clave para el objetivo de la conciliación. Los barrios segregados y especializados obligan a realizar las diferentes funciones de la vida en espacios alejados: residir, comprar, trabajar, divertirse, etc”.

Además, la naturaleza se enriquece por acumulación y también las ciudades han sido construidas a lo largo del tiempo y como resultado de la acumulación. Por ello, el espacio público es ejemplo de acumulación y de diversidad, ya sea en lo relacionado con la arquitectura que lo conforma, en lo que tiene que ver con las acciones y funciones que en ella se realizan o, finalmente, en lo que respecta a los habitantes que nos movemos en él.

Si en la agricultura el monocultivo tiene efectos nocivos para los ecosistemas, en los espacios que construimos, la monofuncionalidad también tiene efectos parecidos. Se pierde diversidad de usos y se pierde la riqueza que sólo la mezcla puede crear. El urbanismo se presenta en demasiadas ocasiones como una disciplina separadora de funciones, lo que no favorece la interacción social. Se acostumbra a

entender la teoría del urbanismo como la separación de las funciones de habitar, trabajar y pasar el tiempo libre. De esta forma, se desarrollan normas que clasifican y califican el territorio según una sola función, imposibilitando la mezcla de funciones cuando estas sean compatibles y deseables. La monofuncionalidad empobrece así la vida, la diversidad cultural y el paisaje urbano.

El urbanismo pensado desde la monofuncionalidad hace que los usos estén separados unos de otros y para la realización de distintas necesidades se requiere de un elevado consumo de energía, que se traduce en una menor eficiencia. El ocio se separa, así, de los lugares de trabajo y éstos, asimismo, de los lugares comerciales y de consumo. El elevado consumo de energía en esta disposición urbana no se refiere tan solo a la energía requerida para el traslado de un lugar a otro, sino al tiempo requerido para ello, creando condiciones que repercuten negativamente en la salud de las personas que habitan en ellas.

Ciudades pensadas en la acumulación y mezcla de funciones hacen que vivir, trabajar, disfrutar del ocio, realizar compras, visitar a las personas dependientes, estudiar..., requieran de menos tiempo y uso de transporte privado. Además son ciudades más seguras, donde se puede ver y ser visto, oír y ser oído. Ciudades más alegres, amigables y diversas.

La naturaleza aprovecha lo que tiene cerca

La arquitectura vernácula es fruto de su medio. Se caracteriza por sus excelentes prestaciones con las fórmulas más elementales. La tradición discreta de la arquitectura popular siempre ha tendido a mantener una relación provechosa y sensata con su medio natural inmediato. También aquí se percibe la idea de lo “sostenible”. La idea consiste en adaptarse al entorno y tomar de él lo que éste ofrezca para poder construir.

Sin renunciar a las ventajas de la industrialización, el aprovechamiento de los materiales locales, unidos a las técnicas de construcción típicas del lugar, pueden dar las claves para desarrollar una arquitectura adaptada al entorno.

La arquitectura vernácula nos muestra que en los lugares en los que existen árboles se hacen columnas con sus troncos y dinteles para poder abrir los huecos de las puertas y sujetar las cubiertas. En las latitudes tropicales, en hábitats lacustres o inundables aparecen los palafitos, con cerramientos y tabiquería de hojas de plantas locales trenzadas. Donde hay piedra, se utiliza para apilarla y hacer paredes, mucho tiempo antes de haber aprendido a tallarla. Sin embargo, donde sólo hay tierra y paja, se hacen adobes o ladrillos.

Así, el diseño de cada construcción se adapta a las condiciones climáticas específicas de cada lugar. El calor del norte de África se combate mediante las

propiedades térmicas del adobe. En el trópico, los trenzados y entramados de estructuras ligeras permiten la ventilación permanente. La fisonomía específica de las construcciones vernáculas es el fruto de una evolución parecida a la de los organismos naturales. Mediante el procedimiento ensayo-error y con los medios que ha proporcionado el entorno, en una evolución de miles de años, se han pulido los tipos que luego se han replicado indefinidamente.

A pesar de que consideramos que la arquitectura vernácula se caracteriza por aprovechar lo que tiene cerca, y construir de acuerdo a los materiales disponibles alrededor, habría que ser cauto en la propuesta de seguir construyendo en el s. XXI como se hacía en el XVII, XVIII o XIX. Al menos, en lo que se refiere a las sociedades occidentales. Debemos considerar hoy en día que ésta sostenibilidad depende básicamente también de la magnitud del uso de los recursos.

De hecho, ¿qué es lo que tenemos cerca hoy en día? Si tenemos que responder a esta pregunta seguramente no lo haremos de la misma manera que en el siglo XVII, periodo en el que construir con materiales cercanos era lo normal. Piedra y madera en algunos casos, hojas de palma, bambú en otros. Ahora bien, como consecuencia de la explotación masiva de estos materiales, la cercanía de los mismos ya no es tan clara. Tal vez sean cercanos en lo que a cercanía física se refiere, pero no tanto en lo que a disponibilidad. Por ello, en la actualidad la cercanía tal vez hay que interpretarla de otra forma y la idea de aprovechar lo que se tiene cerca adquiere otro sentido en lo que a la arquitectura se refiere.

La naturaleza limita los excesos desde dentro

La naturaleza beneficia al sistema porque busca el equilibrio del mismo, pero cuando las sociedades y sus dirigentes generan sistemas que benefician a unos pocos en detrimento de otros aumentan las desigualdades y se pierde el equilibrio. Cuando la naturaleza pierde el equilibrio ejerce el control desde dentro para recuperarlo. Este sistema de control interno se denomina autorregulación. Sociedades autorreguladas serían, por lo tanto, sociedades cuyo control interno lleva a un mayor equilibrio.

La autorregulación es un sistema interno que permite detectar los excesos y crear los mecanismos para no sobrepasar los límites. Se puede entender como una retroalimentación negativa que hace disminuir los excesos, permitiendo el crecimiento estructurado, tanto de los individuos como de los sistemas.

La sociedad, o, más en concreto, los agentes que dirigen la sociedad, regulan la arquitectura. La arquitectura, como producto social, para ser equilibrada depende de los colectivos en los que se crea. Así, las personas, lxs nuevxs arquitectxs, asociaciones de vecinxs, colectivos concienciados con la necesidad de autorregu-

lación pueden ser demandantes de arquitectura autorregulada, equilibrada en sus excesos, en el uso de materiales y tecnología.

Para ello, las propuestas educativas en los centros de arquitectura tienen que tener en cuenta la responsabilidad social de lxs profesionales para que la propia disciplina sea un agente de autorregulación.

La sociedad crece y se alimenta de sí misma. Es importante que profesionales y educadores con conciencia social y medioambiental trabajen en las escuelas de arquitectura haciendo propuestas innovadoras tanto en contenidos como en metodología. Que lleven a cuestionar, en última instancia, los modelos creados desde el exceso. Esto es, modelos creados en la abundancia y desde la abundancia, sin conciencia de los recursos limitados del planeta ni la desigualdad generada en su uso y distribución.

La naturaleza aprovecha el poder de los límites

Este último punto está íntimamente ligado al anterior. Como hemos visto, la naturaleza se limita a sí misma, impone límites internos que evitan los excesos y fomentan la autorregulación. Así, la arquitectura debe limitarse a sí misma, desde la misma profesión. Para ello, también es fundamental la participación de lxs usuarixs.

Además de los límites internos o la autorregulación, la naturaleza aprovecha los límites externos. Así, la piel marca el límite entre el ser y el no ser. El ser humano crece tomando conciencia del exterior a través de la relación con el/x otrx. Por lo tanto, los límites externos también estructuran la propia idea del ser. Hacen comprensible la realidad. Así, la combinación de límites internos y externos es deseable también en arquitectura y urbanismo.

La arquitectura y el urbanismo que tienen en su centro a las personas usuarias, la ciudadanía y el conjunto de la sociedad, contribuyen a la regulación, la estructuración y definen los límites de lo que se construye y cómo se construye. Se entiende de esta manera que los límites son internos. Y los límites internos siempre son más fáciles de respetar que los límites externos o normativos, que son principalmente los que limitan hoy en día la arquitectura y el urbanismo.

Las normativas son necesarias para evitar excesos, sin embargo, un exceso de normativas puede dañar la arquitectura, encorsetando las propuestas y restándole creatividad e imaginación.

Lo deseable es una combinación de los dos tipos de límites: los internos (consensuados por usuarixs, profesionales e instituciones) y los externos (es decir, las normativas que regulan el uso del espacio y dan forma a nuestras ciudades y espacios comunitarios).

Los límites externos ideales serían aquellos con los que se dota una determina-

da comunidad para su funcionamiento, así se confunden los límites internos y los externos. Es decir, en este caso podemos constatar que los límites internos y las normativas son dos aspectos de una misma moneda.

Además existe otro tipo de límites que son realmente externos ya que no dependen de las personas y son los que nos impone la propia naturaleza. En este sentido, el litoral, los montes, los ríos, es decir, la orografía del lugar y su respeto debe de ser un límite que se debe respetar para no volver a cometer errores de otras épocas, en las que la prioridad no ha sido el respeto al medio ambiente.

Conclusiones

Realizar arquitectura que cumpla todas las condiciones de los principios de la biomimesis es tal vez complicado. Sin embargo, creemos que nos podemos acercar a la arquitectura biomimética y sostenible.

La arquitectura vernácula, sin ser biomimética en sí misma, es quizás de entre las formas de arquitectura que conocemos, la que más cumple las condiciones de la biomimesis. De hecho, la arquitectura vernácula es la que más se adapta a las condiciones climáticas del lugar en el cual se construye, a las necesidades de las personas que la habitan. Utiliza recursos próximos sin sobreexplotarlos y materiales del entorno. Así, encontramos palafitos en el Amazonas, caseríos en zonas húmedas de climas atlánticos, iglús en los polos... todos ellos adaptados al entorno natural en el que se encuentran.

Sin embargo, replicar la arquitectura vernácula en sociedades modernas, tal y como se hacía en siglos anteriores tampoco parece la propuesta más adecuada. Sería necesario adaptarla a las necesidades y realidad actuales; ya que la explotación de recursos cercanos puede no ser sostenible hoy en día y tal vez hay que pensar en la utilización de otro tipo de materiales que sean más sostenibles y ecológicos o reciclados y reutilizados. Es decir, se puede pensar en las formas de la arquitectura vernácula y sus funciones con materiales cuya producción y uso no supongan una explotación de recursos naturales que pongan en peligro los ecosistemas. O bien, se puede pensar en maneras de producirlos de manera más eco-sostenible.

Muchos de los sellos que se utilizan para clasificar la arquitectura desde el punto de vista de la ecología y la sostenibilidad, no son adecuados desde nuestro punto de vista. La eficiencia energética se ha convertido en una necesidad. La sociedad está cada vez más concienciada de que los recursos del planeta son, por un lado, limitados y están, por otro, mal repartidos. Sin embargo, se da la paradoja de que las herramientas de las que nos dotamos para medir la sostenibilidad y el grado de eficiencia energética de los productos de uso doméstico y las edificaciones se fijan solamente en los resultados finales de los procesos, es decir en la medición

final del consumo energético única y exclusivamente. Esta perspectiva obvia el hecho de que los excesos de tecnología usada en una edificación ocultan otro tipo de consumos, tanto en su fabricación como en su mantenimiento, además de crear una sociedad plagada de artefactos tecnológicos que son absolutamente prescindibles.

La arquitectura biomimética, entendida como la imitación de las formas de la naturaleza o el empleo de elementos naturales dentro de la arquitectura, no es tampoco sostenible en sí misma. Encontramos muchos ejemplos de arquitectura que puede ser etiquetada falsamente de biomimética y que se basa única y exclusivamente en la imitación de las formas de la naturaleza, dando como resultado edificios que pueden ser bellos en su forma pero que, en ningún caso, pueden ser clasificados por lo que entendemos como una arquitectura que respete los principios de la biomimesis, tal y como lo hemos definido en este texto.

El paradigma de la biomimesis es un paradigma reciente, cuyo desarrollo es desigual en las distintas disciplinas a las que se está aplicando. Desde nuestro punto de vista las posibilidades que ofrece para la arquitectura están aún por explorar en su totalidad. Hay tímidos intentos de realizar arquitectura biomimética que son aún parciales. Muchos de esos intentos parciales, además, se basan en el uso de elementos naturales, como plantas etc., dentro de los edificios para lograr, por ejemplo, una mejor calidad del aire. Esos intentos, siendo interesantes a nivel experimental, no pueden tampoco ser considerados biomiméticos en sí mismos. En ese sentido, podríamos decir que es más fácil hoy por hoy tener claro lo que no es arquitectura biomimética que lo que es.

Finalmente, este paradigma debe contener tanto la idea de ecología como de sostenibilidad. Desde nuestro punto de vista, cualquier copia de la naturaleza tanto en su funcionamiento como en su forma que no sea ecológica ni sostenible no será biomimética, por mucho que se parezca al original. El paradigma de la biomimesis, aplicado a la arquitectura, debe ampliar la visión de la ecología y la sostenibilidad para lograr la integración de ambos conceptos.

NOTAS

¹ <http://www.oei.es/historico/decada/accion.php?accion=1>

² <http://economiecirculaire.org/>

³ https://elpais.com/elpais/2017/05/08/seres_urbanos/1494242952_397202.html

⁴ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/programmes/government/circular-cities-network>

⁵ <http://ecohousing.es/que-es-ecohousing/que-es-cohousing/>

BIBLIOGRAFÍA

- AIA Research Corporation for the U.S. Dept. of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research in Cooperation. 1978. *Regional Guidelines For Building Passive Energy Conserving Homes*. Washington: The GPO Office.
- AMERIGO, M. & PÉREZ LÓPEZ, R. 1998. Ambientes residenciales. In Aragonés, J. I. & Amerigo, M (Eds.). *Psicología Ambiental*. Madrid: Pirámide.
- BENYUS, J. (1997). *Biomimicry. Innovation inspired by nature*. New York: Harper Collins.
- BLUNDELL JONES, P. (1999). *Hugo Häring. The Organic versus the Geometric*. Stuttgart: Axel Menges.
- CAPRA, F. (1982). *El Punto Crucial. Ciencia, Sociedad y Cultura naciente*. Barcelona: Ed. Integral.
- FUJIMOTO, S. (2008). *Primitive Future*. Tokyo: INAX Publishing.
- GEA 21. (2007). *Viviendas que concilian. La perspectiva de género aplicada a las viviendas de nueva construcción*. Madrid: Concejalía de Igualdad y Empleo. Ayuntamiento de Fuenlabrada.
- HAYDEN, D. (1984). *Redesigning the American Dream: The Future of Housing, Work and Family Life*. New York: W. W. Norton.
- MAX NEEF, A. M. (1986). *Desarrollo a escala humana: Conceptos, aplicaciones y reflexiones*. Barcelona: Icaria Editorial.
- MITXELENA, A. (2014). *La Esencia Humana de la Casa*. Bilbao: UPV/EHU.
- MUXI, Z. (2015). Margarete Schütte-Lihotzky 1897-2000. *Un día | una arquitecta*. Obtenido de <https://undiaunaarquitecta.wordpress.com/2015/04/16/margarete-schutte-lihotzky-1897-2000/> (consultado el 9 de julio de 2017).
- PAWLYN, M. (2011). *Biomimicry in Architecture*. London: Riba Publishing.
- RIECHMANN, J. (2006). *Biomímesis. Ensayo sobre imitación de la naturaleza. Ecosocialismo y autocontención*. Madrid: Catarata.
- SCHINDLER, R. M. (1934). *Space Architecture*. California: Dune Forum.

Biomímesis: respuesta a algunas objeciones¹

Jorge Riechmann

Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

Compartís [la burguesía] con todas las clases dominantes que han existido y perecieron la idea interesada de que vuestro régimen de producción y propiedad, obra de condiciones históricas que desaparecen en el transcurso de la producción, descansa sobre leyes naturales eternas y sobre los dictados de la razón.

Karl Marx y Friedrich Engels (1981, p. 41)

Cuanto más preparada esté una ecopolítica para cuestionar su propio discurso sobre la ‘naturaleza’, mayor será su efectividad.

Kate Soper (1995, p. 151)

Desde hace decenios, ecólogos como Ramón Margalef, H. T. Odum o Barry Commoner han propuesto que la economía humana debería imitar la “economía natural” de los ecosistemas. El concepto de *biomímesis* (imitar la naturaleza a la hora de reconstruir los sistemas productivos humanos, con el fin de hacerlos compatibles con la biosfera) recoge esta estrategia, y a mi entender le corresponde un papel clave a la hora de dotar de contenido a la idea más formal de sustentabilidad². Lo expuse primero, en el año 2000, en un capítulo de mi libro *Un mundo vulnerable* (Riechmann 2000, pp. 117-118); lo desarrollé más en 2003 en el capítulo titulado “Biomímesis” del libro colectivo *Industria como naturaleza* (Blount y otros, 2003); y finalmente fue objeto de pormenorizado desarrollo en las dos ediciones de mi libro *Biomímesis* (Riechmann, 2006 y 2014).

El término biomímesis se usó, en los años noventa del siglo XX, dentro de disciplinas como la robótica, las ciencias de materiales, o la investigación cosmética, con un sentido más restringido que el que vengo proponiendo. Así, por ejemplo, cabe estudiar la locomoción de los insectos con vistas a desarrollar robots hexápodos que funcionen correctamente. La idea entre los investigadores de tales disciplinas ha sido más la *imitación de organismos (o partes de estos) que la imitación de ecosistemas* (sin embargo, éste último es el objetivo que a mi entender hemos de

plantearnos primordialmente).

Allende esta biomimética ingenieril, podemos tomar el principio de biomímesis en un sentido más amplio: se tratará, entonces, de comprender los principios de funcionamiento de la vida en sus diferentes niveles (y en particular en el nivel ecosistémico) con el objetivo de *reconstruir los sistemas humanos de manera que encajen armoniosamente en los sistemas naturales*.

Es muy importante reparar en que la biomimética ingenieril se puede integrar sin problemas en las estrategias de acumulación capitalista, y como han observado Jiménez & Ramírez (2019), hoy en día existen empresas dedicadas en exclusiva a hacer asesorías biomiméticas: en el ámbito corporativo se recurre cada vez más a este enfoque para “verdecer” a las empresas. La biomímesis “sistémica” es menos recuperable, pero también cabría imaginar un “capitalismo verde” que recorriese un tramo de camino con estrategias de ecoeficiencia (sobre todo) y biomímesis sistémica (en menor grado). Como he sugerido en otros lugares, son sobre todo los *principios de suficiencia y precaución* los que se oponen de plano a las dinámicas capitalistas³.

Una aplicación generalizada de la biomímesis sistémica sería una condición necesaria para construir economías verdaderamente sustentables, pero de ninguna manera supondría una condición suficiente.

La idea de biomímesis

No es que exista ninguna agricultura, industria o economía “natural”: sino que, al tener que reintegrar la tecnosfera en la biosfera, estudiar cómo funciona la segunda nos orientará sobre el tipo de cambios que necesita la primera. La biomímesis es una estrategia de *reinserción de los sistemas humanos dentro de los sistemas naturales*.

Ya a mediados de los años noventa, la idea de biomímesis había avanzado lo suficiente como para plasmarse en un sólido manual (Benyus, 1997). Janine M. Benyus, la investigadora que lo escribió (popularizando así el término *biomimicry* en el mundo de habla inglesa), destaca que los sistemas naturales tienen las siguientes diez propiedades interesantes:

1. Funcionan a partir de la luz solar.
2. Usan solamente la energía imprescindible.
3. Adecúan forma y función.
4. Lo reciclan todo.
5. Recompensan la cooperación.
6. Acumulan diversidad.

7. Contrarrestan los excesos desde el interior.
8. Utilizan la fuerza de los límites.
9. Aprenden de su contexto.
10. Cuidan de las generaciones futuras.

La naturaleza, “la única empresa que nunca ha quebrado en unos 4.000 millones de años” según el biólogo Frederic Vester, nos proporciona el modelo para una economía sustentable y de alta productividad. Los ecosistemas naturales funcionan a base de *ciclos cerrados de materia, movidos por la energía del sol*: ésta es su característica fundamental, si los contemplamos con “mirada económica”.

Se trata de una “*economía cíclica*”, totalmente renovable y autorreproductiva, sin residuos, y cuya fuente de energía es inagotable en términos humanos: la energía solar en sus diversas manifestaciones (que incluye, por ejemplo, el viento y las olas). En esta economía cíclica natural *cada residuo de un proceso se convierte en la materia prima de otro: los ciclos se cierran*. Por el contrario, la economía industrial capitalista desarrollada en los últimos dos siglos, considerada en relación con los flujos de materia y de energía, es *de naturaleza lineal*: los recursos quedan desconectados de los residuos, los ciclos no se cierran.

Seis principios básicos de sustentabilidad

A partir de la biomímesis, del funcionamiento de los ecosistemas, podemos sugerir seis principios básicos para la reconstrucción ecológica de la economía (aunque no tengo aquí espacio para derivarlos de manera más rigurosa):

1. ESTADO ESTACIONARIO, o con más precisión, HOMEOSTASIS aproximada en términos biofísicos (esto es, en cuanto a los intercambios de materia y energía de los sistemas humanos con sus entornos).
2. VIVIR DEL SOL como fuente energética.
3. CERRAR LOS CICLOS de materiales.
4. NO TRANSPORTAR DEMASIADO LEJOS los materiales.
5. EVITAR LOS XENOBIÓTICOS como COP (contaminantes orgánicos persistentes), OMG (organismos transgénicos)...
6. RESPETAR LA DIVERSIDAD.

Ciclos de materiales cerrados, sin contaminación y sin toxicidad, movidos por energía solar, adaptados a la diversidad local: ésta es la esencia de una economía sustentable. Cuando se trata de producción industrial, suele hablarse en este contexto de producción limpia. No cuesta reconocer que a todos los niveles la biomímesis

parece una buena idea socioecológica y económico-ecológica:

- *ecología industrial*, remedando los ciclos cerrados de los materiales en la biosfera;
- *ecología urbana* para reintegrar armónicamente los pueblos y ciudades en los ecosistemas que los circundan;
- *ecoarquitectura* buscando que edificios e infraestructuras “pesen poco” sobre los paisajes y ecosistemas;
- *agroecosistemas* mucho más cercanos a los ecosistemas naturales que la actual agricultura industrial basada en monocultivos y agrotóxicos;
- *química verde* con procesos que permanezcan cerca de la bioquímica de la naturaleza;
- *biotecnología ambientalmente compatible*, con biomoléculas artificiales donde sea preciso, pero guiándonos por el proceder de la misma naturaleza, etc.

Hay que indicar, por último, que la idea de biomímesis está estrechamente relacionada con el *principio de precaución*: para apartarnos de los “modelos” de la naturaleza necesitamos razones mucho más fuertes, y conocimiento mucho más fiable, que para seguirlos⁴.

Esto implica *sofrenar el optimismo tecnológico* que ha caracterizado la historia de las sociedades industriales, y ser capaces de entender la historia como un aprendizaje al que hay que sacar partido. Sabemos que los privilegiados de este mundo hemos de reducir nuestro impacto ambiental en un factor aproximadamente de diez: es decir, reducir a la décima parte nuestro consumo de energía y materiales, liberando así espacio ambiental para que puedan vivir decentemente los seres humanos del Sur, y el resto de los seres vivos con los que compartimos la biosfera⁵. Una parte de estas reducciones pueden lograrse mediante una “revolución de la ecoeficiencia”, pero no será ni mucho menos suficiente: ha de completarse con una “revolución de la suficiencia”, y eso quiere decir modificar pautas de comportamiento, ideas y valores; nuestro entero sistema de producción y consumo. *Precisamos un “factor diez” ético-político*, además del “factor diez” en ecoeficiencia que ya se formuló como objetivo en los años noventa del siglo XX.

Los peligros del naturalismo acrítico

La propuesta de “imitar a la naturaleza” sin duda hará que más de un lector marxista o más de una lectora feminista se revuelvan inquietos en su asiento (releáanse las palabras del *Manifiesto comunista* que encabezan este artículo). Al fin

y al cabo, la *naturalización de lo social y lo cultural* ha sido una de las armas favoritas de las fuerzas reaccionarias durante milenios, como bien saben los movimientos sociales que han luchado contra el patriarcado, la opresión religiosa, la dominación de clase, el racismo, las tergiversaciones nacionalistas o la represión de las sexualidades divergentes: sobran los ejemplos de construcciones culturales opresivas para grupos sociales específicos que eran legitimadas en virtud de su “naturalidad”⁶. Incluso las políticas más abismalmente malignas -las políticas nazis de exterminio masivo, por ejemplo- han buscado legitimarse apelando a la naturaleza, y así el mismo Hitler -en una conversación con Rauschning que éste anotó- declaraba:

Tenemos el deber de despoblar, lo mismo que tenemos el deber de cuidar adecuadamente a la población alemana. (...) ¿Quiero yo eliminar estirpes enteras de un pueblo? ¡Sin duda alguna! Así aproximadamente, hacia ahí caminamos. La naturaleza es cruel. Por eso, también nosotros podemos serlo (citado en Safranski, 2000, p. 240)⁷.

Un activista gay inquieto ante determinados discursos ecologistas puede insistir en que:

(...) si, en el proceso de ‘recuperar’ la naturaleza, el marxismo o cualquier otro movimiento político ignora la violencia y complejidad ideológica de la naturaleza como concepto cultural, sólo recuperará una naturaleza entreverada con esas ideologías que han contribuido a provocar crisis recientes. Por decirlo en dos palabras: corremos peligro de que mucho pensamiento reaccionario regrese siguiendo a la naturaleza y a aquellos que -con razón- reconocen la enorme urgencia de una política ecológica. Claro que hay distinciones obvias y fundamentales que pueden ayudar a evitarlo: entre la naturaleza humana y la naturaleza destruida por la cultura humana, entre la concepción ecológica y las concepciones ideológicas de la naturaleza... Pero se trata de distinciones que el concepto tradicional de naturaleza no ha solido respetar (Dollimore, 1991, pp. 114-115).

Cautelas como las de Dollimore están justificadas: debemos ser especialmente rigurosos a la hora de invocar la naturaleza (en nuestro caso, a la hora de fundamentar nuestra propuesta de biomímesis). Hay que intentar trazar con nitidez las “distinciones fundamentales” a las que alude, puesto que un naturalismo acrítico puede sin duda prestar apoyo ideológico a los sistemas de dominación que -por otra parte- han desempeñado un papel fundamental en el surgimiento de la crisis ecológica actual. Ya abordé en un ensayo anterior la elaboración conceptual de *naturaleza*, teniendo en cuenta los riesgos y complejidades a los que acabo de aludir; ruego que las reflexiones que siguen se lean sobre el trasfondo de aquel primer texto (Riechmann, 1997).

Más tiempo de rodaje

Observa los fenómenos naturales y encontrarás en ellos un manantial inagotable de normas para el espíritu, escribía Juan Ramón Jiménez hace un siglo (1990, p. 141), recogiendo un consejo que cabría rastrear en la historia de las ideas de lo que llamamos Occidente desde su mismo origen (o más bien una de las fuentes de su plural origen): el pensamiento griego. Por eso, hay una objeción que surge de inmediato frente a las estrategias de biomímesis: ¿estamos de alguna forma reactualizando la viejísima tradición de derecho natural o éticas de cuño naturalista, que pretenden deducir valores del mundo natural o ciertos rasgos del mismo, incurriendo así en falacia naturalista?

No es el caso. Se trata de imitar la naturaleza *no porque sea una “maestra moral”, sino porque funciona*. La biosfera es un “sistema de ecosistemas” perfectamente ajustado después de varios miles de millones de años de rodaje, autorreparación, reajuste darwiniano continuo y adaptación mutua (coevolución) de todas las piezas de todos los complejísimos mecanismos: enseguida insistiré sobre ello. No es estática y está cambiando constantemente, pero se mantiene en una estabilidad dinámica merced a sutiles mecanismos de retroalimentación negativa que los cibernéticos y teóricos de sistemas saben apreciar en su justo valor.

No es que lo natural supere moral o metafísicamente a lo artificial: es que lleva más tiempo de rodaje. Hay una expresión inglesa que dice: “si funciona, no lo arregles” (*if it works, don't fix it*). De alguna forma, esta idea describe el punto de partida de las estrategias biomiméticas. La biosfera funciona: eso es indudable. Es verdad que funciona, en principio, de forma no acogedora o poco amigable para el ser humano: por eso, desde hace decenas de miles de años, hemos ensayado diversas estrategias para sobrevivir y para vivir bien, haciendo reformas en la “casa común” que es la biosfera.

Hacer reformas en esa casa (*oikos* en griego, raíz del vocablo “ecología”) resulta inevitable, al ser nosotros el tipo de animal que somos (con lenguaje articulado, capacidad de simbolización, técnica, etc). La cuestión es qué tipo de reformas hacemos en nuestro *oikos*. Si contrarían la dinámica que ha conducido a esa biosfera que funciona bien, si chocan frontalmente contra sus principios de funcionamiento, entonces tales reformas acabarán volviéndose contra nosotros mismos: el muro se derrumbará encima del albañil imprudente.

Crítica de la “teoría verde del valor” de Goodin

Creo que vale la pena ahondar un poco en la cuestión del valor, en relación con lo natural y lo artificial. Pues más de un pensador ecologista trabaja -explícita o

implícitamente- con una idea de la naturaleza como *prístina otredad de la cultura*, de manera que resulta tanto menos valiosa cuanto más mezclada con la actividad humana. Esto lo ha formalizado el politólogo australiano Robert E. Goodin (que de alguna forma teoriza la filosofía de la *deep ecology*, al menos en alguna de sus versiones) en su “teoría verde del valor”:

Lo que hace valiosos los recursos naturales es precisamente su naturalidad. Es decir, lo que les confiere valor no son atributos físicos o propiedades que podrían exhibir. Más bien es la historia y el proceso de su creación. Según la teoría verde del valor, lo que resulta crucial para hacer valiosas las cosas es el hecho de que han sido creadas por procesos naturales en vez de procesos humanos artificiales.” (Goodin, 1995, p. 26).

Para esta “teoría verde del valor” lo valioso es aquello que ha sido creado por procesos naturales, y no por intervención humana; y Goodin emplea la analogía con las falsificaciones en el mundo del arte para argumentar que un ecosistema restaurado, incluso si fuese idéntico al original, resultaría menos valioso por tratarse de un fruto de la actividad humana.

Hay dos o tres críticas pertinentes que hacer, creo. Veamos la primera. La característica de lo natural que -según Goodin- resulta crucial para explicar su valor es el “formar parte de algo más grande que nosotros mismos/ fuera de nosotros mismos” (Goodin, 1995, p. 45), pues de esa forma “fijamos nuestro lugar en el mundo exterior” y conseguimos “situar el yo, en un sentido psicológicamente profundo que importa enormemente a la gente” (Goodin, 1995, p. 39). La gente necesita como el comer, según Goodin, encontrar su “lugar en el mundo”: y es precisamente la naturaleza -los procesos naturales independientes de la actividad humana- la que puede proporcionárselo.

Si ésta es la razón, parecería que la elección de nuestro teórico verde resulta algo arbitraria. Al fin y al cabo, la sociedad/comunidad humana -con todo su denso tejido de relaciones sociales y toda su dimensión simbólica- es un candidato obvio a ese “algo más grande que nosotros mismos/ fuera de nosotros mismos” que puede dar sentido a la vida humana. ¿Por qué la naturaleza en vez de la sociedad, si de lo que se trata es de dar sentido? Y no es que en este punto falten los candidatos: ¿por qué no la Nación, o la Raza Elegida, o la Única Religión Verdadera? ¿Por qué precisamente la naturaleza? Tenemos una profunda necesidad de situarnos y de orientarnos, es verdad; pero hay muchas maneras de hacerlo, y no se ve por qué habría que privilegiar una de ellas. Se requeriría aquí, como mínimo, una argumentación más afinada.

Una segunda crítica es la siguiente. Puesto que -de acuerdo con esta teoría del valor- basta con pasear por el ecosistema virgen para degradarlo, parece lógico concluir que sería mejor que nunca hubiese existido la especie humana, lo cual

ya es fuerte como conclusión. Pero además podemos preguntarnos: ¿por qué la misma argumentación no debería aplicarse a otros seres vivos, que igualmente hacen uso de los recursos de la naturaleza? ¿Por qué la interacción humana con la naturaleza devalúa ésta, y no lo hace la interacción de otras especies no humanas? De nuevo, parece introducirse aquí una opción arbitraria. Se diría que la posición de Goodin conduce a lo que se ha llamado -en sociología medioambiental y en historia de las ideas- “excepcionalismo humano”⁸, quizá incluso a lo que yo he caracterizado en otro lugar como “tesis del espléndido aislamiento” (Riechmann 2003, pp. 52-58), y en esa medida es (a) ontológicamente poco plausible, y (b) políticamente poco coherente con los objetivos del movimiento ecologista y el movimiento de defensa de los animales.

Mi tercera observación crítica es la siguiente. Para Goodin, la naturaleza alterada por la intervención humana es siempre menos valiosa que la naturaleza prístina. Eso conduce a conclusiones tan absurdas como que una persona curada por una intervención médica es menos valiosa que otra que no ha pasado por semejante cura (o que ella misma antes de beneficiarse de ella). Por ejemplo, un enfermo de cáncer quedaría devaluado después de atravesar una operación quirúrgica y una radioterapia que consiguiesen eliminar su tumor...

Parece por tanto que hay buenas razones para abandonar la “teoría verde del valor” de Goodin (u otras similares). El problema no es que el trabajo humano se “mezcle” más o menos con la naturaleza, alterándola (por emplear el viejo lenguaje de la teoría de la apropiación de Locke, luego desarrollado en la teoría del valor-trabajo de Ricardo y Marx); el problema es que los excesos de la actividad humana dañan las posibilidades de vida buena para muchos seres humanos, y para muchos seres vivos no humanos susceptibles también de vivir una vida buena.

El valor básico, en mi propia teorización, es el *florecimiento de los vivientes* (o si se quiere: la buena vida de los seres capaces de tener una buena vida) (“Capacidades esenciales y florecimiento de los vivientes”, capítulo 4 de Riechmann, 2003). Como se ve, esto no tiene que ver -directamente al menos- con la cuestión natural/artificial. Si una estrategia de biomímesis parece recomendable no es porque nos aproxime a la naturaleza (y esto sea valioso como tal), sino porque nos acercaría -en mi opinión- a un mundo propicio a ese florecimiento de los vivientes (humanos y no humanos). Florecimiento que requiere, como precondition básica, una biosfera con buena salud.

“No se puede ir contra la naturaleza”

Otra objeción podría venir de quienes sostienen, como Fernando Savater, que “si hay razones para considerar rechazables ciertos logros humanos, nada tendrán

que ver desde luego con su mayor o menor ‘naturalidad’, porque ir *contra* la naturaleza es cosa que nadie sabe hacer... al menos en este mundo” (Savater, 1996, p. 244). El pensador donostiarra defiende que, desde una perspectiva materialista, no se puede ir contra la naturaleza porque todo es natural, “el plástico es tan natural como la miel” (Savater, 1996, p. 245). Si así fuera, la misma idea de biomímesis carecería de sentido: todos los sistemas humanos serían igualmente naturales (o antinaturales), y no podríamos distinguir entre ellos según su mayor o menor cercanía a la naturaleza, ni esgrimir características de los sistemas naturales como deseables para los sistemas humanos.

Ya en mi ensayo *La industria de las manos y la nueva naturaleza* critiqué este punto de vista: creo el tipo de materialismo al que apela Savater es demasiado esquemático y reductivo, y sostengo que *podemos ir contra la naturaleza en este mundo en un sentido que es filosóficamente relevante, y que praxeológicamente -en la era de la crisis ecológica global- resulta esencial*. Sin repetir ahora los detalles de mi argumentación, ofreceré al menos algunos ejemplos de uso coherente del término antinatural:

- Antinatural como incompatible con la bioquímica de la vida (en este sentido, el DDT, el lindano o el metilmercurio son antinaturales).
- Antinatural como perturbador de los ciclos de materiales de los ecosistemas (en este sentido, el grueso de la producción industrial actual es antinatural).
- Antinatural como desequilibrador de los grandes ciclos biogeoquímicos de la biosfera (en este sentido, los sistemas energéticos basados en combustibles fósiles son antinaturales).

Aunque “no se puede ir contra la naturaleza”, como dice Fernando Savater, si *naturaleza* se entiende como la totalidad de las cosas existentes (sometidas a las regularidades que estudian las ciencias naturales), *ciertamente sí que se puede ir contra la naturaleza en cuanto biosfera*, y ése es el sentido que resulta más relevante para los debates ecológicos contemporáneos.

Vale la pena, en este punto, recordar la tercera “ley” informal de la ecología que propuso Barry Commoner hace más de treinta años: *nature knows better* (la naturaleza sabe lo que se hace). No se trata aquí de ninguna sustantificación esencialista ni ninguna deificación de “Madre Naturaleza”, sino de una manera muy condensada de transmitir una verdad empírica importante. A saber:

Detrás de cada ser vivo hay dos o tres mil millones de años de ‘investigación y desarrollo’. En todo este tiempo se ha producido una pasmosa cantidad de seres vivos individuales, cada uno de los cuales ha dado oportunidad de ensayar la conveniencia de algún cambio genético al azar. Si este cambio es perjudicial para la viabilidad del organismo, lo más probable es que éste muera antes de poder transmitirlo a las

futuras generaciones. De esta manera, los seres vivos han acumulado una compleja organización de partes compatibles; las posibles combinaciones que eran incompatibles con el conjunto quedaron borradas en el largo transcurso de la evolución. Así, la estructura de un ser vivo actual o la organización de un ecosistema natural actual serán probablemente ‘las mejores’ en el sentido de que fueron despojadas de los componentes perjudiciales hasta el punto de que cualquier forma nueva sería, casi con toda seguridad, peor que las existentes (Commoner, 1973, p. 41).

Commoner explica su principio mediante una analogía mecánica: si uno abre la tapa posterior de un reloj, cierra los ojos e introduce la punta de un lápiz en la maquinaria, *casi siempre* estropeará el reloj. Ciertamente existe una minúscula probabilidad de que el reloj estuviese dañado y que la intervención fortuita del lápiz consiguiese arreglarlo: pero nadie pondrá en duda que se trata de un resultado sumamente improbable. Algo parecido sucede en los sistemas naturales, donde las partes y el todo son recíprocamente coherentes después de casi cuatro mil millones de años de coevolución.

Recuadro 1. Las “Leyes” básicas de la ecología según Barry Commoner

-
1. Todo está relacionado con todo lo demás. La biosfera es una compleja red, en la cual cada una de las partes que la componen se halla vinculada con las otras por una tupida malla de interrelaciones.
 2. Todas las cosas han de ir a parar a alguna parte. Todo ecosistema puede concebirse como la superposición de dos ciclos, el de la materia y el de la energía. El primero es más o menos cerrado; el segundo tiene características diferentes porque la energía se degrada y no es recuperable (principio de entropía).
 3. La naturaleza es la más sabia (o “la naturaleza sabe lo que hace”, traducción del inglés *nature knows better*). Su configuración actual refleja casi cinco mil millones de años de evolución por “ensayo y error”: por ello los seres vivos y la composición química de la biosfera reflejan restricciones que limitan severamente su rango de variación.
 4. No existe la comida de balde. No hay ganancia que no cueste algo; para vivir, hay que pagar el precio. (Extractado de Commoner, 1973, pp. 33-45)
-

En aspectos muy decisivos, *ninguna intervención humana deliberada supera la “sabiduría” que resulta de la coevolución de diferentes sistemas en tiempos largos*, así estemos hablando de las culturas campesinas y los agrosistemas, o del sistema inmunitario humano y los patógenos. El tiempo, es un gran organizador, podríamos decir parafraseando a Marguerite Yourcenar.

En suma, es bien sabido que “natural” y “naturaleza” son términos polisémicos. La tesis implícita en mi defensa de la biomimesis es que, a la hora de hacer frente a la crisis ecológica actual, *el sentido más importante de “natural” es “acorde*

con el funcionamiento de ecosistemas y organismos”: natural como congruente con la biología de los ecosistemas y la bioquímica de los organismos. En este sentido, debemos aspirar a una agricultura natural, una industria natural, unos sistemas energéticos y de transporte naturales, etc.

Recuadro 2. Un edificio como un árbol, una ciudad como un bosque

“Trabajando con un equipo reunido por el profesor David Orr, del Oberlin College, concebimos la idea de un edificio y su entorno que funcionaran del mismo modo que un árbol. Imaginamos distintas formas de que pudiera depurar el aire, crear sombra y hábitat, enriquecer la tierra, y cambiar según las estaciones, eventualmente aportando más energía de la que necesitaría para funcionar. Tendría paneles solares en el tejado, una línea de árboles en el lado norte del edificio para protegerlo del viento y aumentar la biodiversidad, un interior diseñado para cambiar y adaptarse a las preferencias funcionales y estéticas de las personas, con tarimas y moquetas alquiladas, un aljibe que almacenaría agua para el riego, una máquina viviente en su interior y aparte del edificio –que consta de un estanque lleno de organismos y plantas especialmente seleccionados para la limpieza de los efluentes; aulas y amplios espacios públicos orientados hacia el oeste y el sur para aprovechar el sol; cristales especiales en las ventanas para controlar la cantidad de luz ultravioleta que penetrara en el edificio; un bosque restaurado en el lado este del edificio; y una forma de concebir el mantenimiento del paisaje y de los suelos que harían innecesarios los plaguicidas o el regadío. Estas características están actualmente en proceso de optimización –en su primer verano, el edificio comenzó a generar más energía de la que utilizaba–, lo cual hace de él un modesto pero esperanzador comienzo.

Imaginemos un edificio como un árbol, una ciudad como un bosque.” (Braungart y McDonough, 2005, pp. 132-133)

Contra el pansociologismo que niega la distinción entre naturaleza y sociedad

Ya antes distinguimos entre dos de los sentidos importantes del término *naturaleza*: naturaleza como totalidad de las cosas existentes (sometidas a las regularidades que estudian las ciencias naturales), o naturaleza como biosfera (se trata respectivamente de naturaleza-1 y naturaleza-4, con la terminología que propuse en el capítulo 4 de *Un mundo vulnerable* al que hice referencia: Riechmann, 2000). Ahora me importa evocar otro sentido de *naturaleza*, el que está en la base de la importante distinción “natural/ artificial”: se trata de la naturaleza en cuanto conjunto de las cosas que existen o suelen existir sin intervención humana (naturaleza-2, en mi terminología de *Un mundo vulnerable*).

Pues bien: otra de las objeciones que pueden alzarse contra el principio de biomímesis se basaría en la negación de la distinción natural/ artificial. Diría más o menos: ¿imitación de la naturaleza? ¿Imitar qué, si *ya no puede distinguirse*, o quizá nunca se pudo, entre naturaleza y sociedad? En otro contexto (una polémica contra la idea de sustentabilidad fuerte) así lo defiende, por ejemplo, el profesor de la Universidad de Málaga Manuel Arias Maldonado, que investiga sobre cuestiones de democracia y sustentabilidad:

Resulta ya impracticable toda diferenciación entre lo natural y lo social, especialmente si de la consecución de la sustentabilidad se trata. La fusión de sociedad y naturaleza en medio ambiente supone que la sustentabilidad es, sí, ordenación de las relaciones de la sociedad con su entorno, pero que por esa misma razón puede afirmarse que se trata de la auto-ordenación social, u ordenación de un aspecto de lo social: lo medioambiental(Arias Maldonado, 2002).

Es una idea también muy difundida entre los sociólogos ambientales “constructivistas” (abundantes ejemplos en Redclift & Woodgate, 2002). Manuel Medina, siguiendo a Bruno Latour, caracteriza a nuestra época por la *proliferación de híbridos* que embrollan constantemente las supuestas líneas de demarcación nítidas entre ciencia, tecnología, política, economía, naturaleza, derecho¹⁰...Como ejemplos de esta imparable hibridez, Medina sugiere los implantes electrónicos en el cerebro humano, los microprocesadores biónicos, la clonación de animales, los alimentos transgénicos, la congelación de embriones humanos, las píldoras abortivas y poscoitales, el viagra, los psicofármacos como Prozac, los entornos de realidad virtual generados por ordenador, internet, etc. Y señala que “en la época del *Proyecto Genoma Humano* se puede hablar de la naturaleza como de ‘un objeto manufacturado’ (Hess), al mismo tiempo que la ingeniería genética y las biotecnologías están dando paso a una naturaleza ‘extraída del laboratorio y después transformada en realidad exterior’ (Latour)” (Medina, 2000, pp. 37-38).

Ahora bien: hay que darse cuenta de que aquí, en esta suerte de *pansociologismo*, hay disfrazado, so capa de necesidad y evidencia, o una confusión conceptual, o un nada necesario *parti pris* ideológico¹¹. Resulta oportuno reconocer que, a medida que se expandían dentro de la biosfera los sistemas socioeconómicos humanos, a medida que aumentaba el poderío de la tecnociencia y a medida que las sociedades ricas se apropiaban de más y más espacio ambiental, ha ido reduciéndose correlativamente la naturaleza silvestre “incontaminada”. Yo mismo he argumentado en este sentido en muchas ocasiones (véase, por ejemplo, Jorge Riechmann, ‘La crisis ecológica: un desafío para los trabajadores’, en Riechmann & Fernández Buey, 1998, pp. 78-79). *Pero de ahí a sostener que no puede distinguirse entre lo natural y lo social hay un salto que hemos de negarnos a dar*. Por decirlo con el ejemplo de Andrew Dobson, también en las condiciones actuales de “mundo lleno” sigue

habiendo una diferencia significativa entre el Hyde Park londinense y las selvas del centro de Nueva Guinea (Dobson, 1998, p. 75). Pondré otros dos ejemplos para que se vea lo que quiero decir.

Poca duda cabe de que, antes de 1969, en el medio ambiente lunar no había ni trazas de nada social o cultural; y después de aquellos primeros viajes a la Luna de finales de los sesenta y principios de los setenta, aquellas trazas seguían siendo mínimas, y podía distinguirse con toda claridad lo natural de lo social. Hoy en día quizá asistamos al comienzo de algo diferente: “la Luna está madura para su desarrollo comercial”, declaraba en septiembre de 2002 el director de la empresa estadounidense *Transorbital*, que decía estar preparando el primer alunizaje con fines de lucro ¡nada menos que para el 2003! (Lo cual no sucedió, desde luego). Si este incipiente “desarrollo comercial” progresara, puede que dentro de un siglo nos sea tan difícil distinguir lo natural de lo social como en los ecosistemas más intensamente artificializados y antropizados de la Tierra: *pero no hay nada necesario en este desarrollo*, y también podemos optar por declarar la Luna “santuario” e impedir que se altere demasiado.

Otro ejemplo: moléculas de contaminantes organoclorados en la grasa de los seres vivos. Hoy son omnipresentes, con graves efectos sanitarios y medioambientales, a consecuencia de una política química que vamos tendiendo a valorar como desastrosa. Pero si optáramos por aplicar de verdad y desarrollar el Convenio de Estocolmo sobre COP (Contaminantes Orgánicos Persistentes), dentro de dos o tres generaciones habrían desaparecido de los cuerpos de los seres vivos estas “bombas químicas” de efecto retardado, y nos resultaría más fácil distinguir lo natural de lo social, en lo que a tejidos adiposos animales se refiere.

Lo que quiero decir con ello es que *la posibilidad de distinguir mejor o peor entre lo natural y lo social está en función de que los seres humanos decidamos o no autolimitar nuestro impacto sobre la biosfera*, y que esa decisión está en nuestras manos. Tal y como argumentaba Javier Echeverría, respondiendo a algunas exageraciones de Hans Jonas¹²:

Los mares y el fondo del mar no han sido engullidos por el artificio humano, como tampoco las montañas, los desiertos o los casquetes polares. Tampoco ha desaparecido la muerte, que es algo natural, demasiado natural. Es cierto que la *polis* se ha expandido muchísimo, pero de ahí a decir que ya no hay *physis* ni *biophysis* media un abismo. Por otra parte, si ya no hubiera naturaleza y se hubiera convertido en artificio humano, ¿cómo afirmar el imperativo de conservar la naturaleza, como hace Jonas?” (Echeverría 2003)¹³.

Aunque la naturaleza esté cada vez más “artificializada” (vale decir: aunque los frutos del trabajo humano se mezclen cada vez más con el mundo no humano), *mantener la distinción conceptual natural/ artificial resulta imprescindible*¹⁴. Incluso

en un hipotético mundo del todo “artificializado”, seguiría teniendo sentido distinguir entre “menos artificial” (más natural) y “más artificial”. Pensemos por ejemplo en el experimento *Biosfera 2* en 1991-1993 (aquella especie de enorme terrario construido en Arizona por científicos estadounidenses)¹⁵ e imaginemos por un momento que hubiese tenido éxito, abriendo camino a la construcción de varias “mini-biosferas” artificiales. Pues bien: podríamos juzgar si una hipotética “Biosfera 7” es más o menos natural que otra supuesta “Biosfera 16” en función de su mayor o menor cercanía a la biosfera original (única e irremplazable, como precisamente mostró el fracaso de “Biosfera 2”).

Es cierto que lo humano se ha mezclado con casi todo en la biosfera del tercer planeta del Sistema Solar. ¿Y bien? Podemos hablar de naturaleza (más o menos) salvaje, silvestre, en el sentido siguiente: naturaleza sana, diversa, funcional, autónoma. En ésta, los procesos básicos de los ecosistemas y la dinámica evolutiva se conservan. El punto de referencia no es una biosfera sin seres humanos, sino una naturaleza que conserva su autonomía¹⁶.

Tras una transición ecosocial biomimética, ¿se mantendría el nivel de vida?

Otra duda podría formularse así: una economía transformada de acuerdo con criterios biomiméticos, ¿logrará proporcionar una vida buena a todos los seres humanos? ¿No se producirá necesariamente un descenso del nivel de vida?

Para contestar adecuadamente, habrá que dar un pequeño rodeo a través de la teoría de las necesidades humanas (traté este asunto con más detalle en Riechmann, 1998). La cuestión clave aquí es distinguir entre las necesidades y deseos humanos que ha de satisfacer un sistema productivo, y los satisfactores o medios concretos para satisfacer esas necesidades y deseos. Las teorías contemporáneas de las necesidades en mi opinión más solventes -Manfred Max-Neef, por ejemplo, o Len Doyal e Ian Gough- postulan que las necesidades básicas son finitas, pocas, clasificables, universales y objetivas. *Lo que cambia, a través de los tiempos y de las culturas, no son las necesidades sino la manera o los medios utilizados para la satisfacción de las necesidades*: es decir, los satisfactores de estas necesidades. “Alimentación y abrigo no deben considerarse como necesidades sino como satisfactores de la necesidad fundamental de subsistencia. Del mismo modo, la educación (ya sea formal o informal), el estudio, la investigación, la estimulación precoz y la meditación son satisfactores de la necesidad de entendimiento” (Max-Neef, 1993, pp. 40-42)¹⁷. Y la observación decisiva es que *diferentes satisfactores para la misma necesidad (o deseo) pueden tener impactos ecológicos absolutamente diferentes*.

La relación de los satisfactores con las necesidades es la de los *medios* con los

*fin*es. La sociedad productivista/ consumista se caracteriza, entre otros rasgos, por la confusión constante, deliberada e incesante entre fines y medios -los medios se transforman en fines y estos se pierden de vista, se desvanecen en el universo de los objetos-; en la crítica de esta sociedad y en la formulación de alternativas mostrará la pareja de conceptos *necesidad/ satisfactor* toda su potencia crítica. Las necesidades no son intencionales, y en ese sentido no podemos elegir las: sencillamente están ahí. *Pero sí que podemos elegir los satisfactores*. Aunque las necesidades básicas estén dadas, podemos autodeterminar -al menos en parte- los deseos y los satisfactores. Mantener abierta esta posibilidad resulta crucial para cualquier perspectiva de emancipación en un “mundo lleno”, un mundo cuyos límites ecológicos se han alcanzado o -en algunos ámbitos- incluso se han sobrepasado ya.

Pensemos en la cuestión de la energía, absolutamente básica. Una transición biomimética nos desengancharía de los combustibles fósiles y la energía nuclear para “conectarnos” a la corriente energética del sol, lo que alguna vez se ha llamado el gran “molino de fotones” terráqueo, limitado por la corriente energética del sol. Ahora bien: la fotosíntesis -causa última de los depósitos de energía fósiles sobre los que se ha basado la sociedad industrial hasta hoy- consume sólo el 0'06% aproximadamente de la energía solar que llega a la Tierra para la producción primaria neta de biomasa. La mayor parte de la energía solar, o bien se refleja de vuelta hacia el espacio exterior (un 30% aproximadamente), o bien se almacena temporalmente como calor en las capas bajas de la atmósfera (“efecto invernadero” natural, un 50% aproximadamente). El restante 20% es responsable de “mover” el agua y los vientos (ciclo natural del agua y las corrientes atmosféricas).

Eso quiere decir que la producción energética que recibimos del Sol es enorme: y sin embargo *no sería suficiente si pretendiésemos mantener los niveles de consumo de materiales y energía de las insostenibles sociedades industriales modernas* (Altvater, 1994, p. 39). No se trata de pensar sencillamente en sustituir las energías fósiles (y la energía nuclear) por energía solar, dejando lo demás como está: simultáneamente ha de aumentar radicalmente la eficiencia energética (y reducirse su consumo), modificarse cualitativamente el uso de la energía, cambiar los sistemas de transformación, reconstruirse la cultura.

La clave, por tanto, estriba en modificar los satisfactores (ecoficiencia, biomímesis) y actuar sobre los deseos, las relaciones sociales y la cultura (suficiencia, autocontención), de manera que permanezcamos dentro de los límites impuestos por los ecosistemas. Esto *puede lograrse con una buena calidad de vida para todos y todas* (aunque mostrarlo con detalle excede el propósito de este texto). Cabe aspirar a *una vida buena basada en un modelo productivo que consuma muchos menos materiales y energía que el actual*, lo cual nos obligará a organizar de otra forma nuestros sistemas de producción y nuestras relaciones sociales: y con ello queda contestada la pregunta que nos hacíamos en este apartado.

Emular con labor de arte la sencilla obra de la naturaleza

Una línea de pensamiento muy influyente desde hace varios siglos subraya que lo verdaderamente humano es el artificio. Pedro Salinas, en un par de líneas de su satírica -y pacifista antinuclear- novela de anticipación *La bomba increíble*, la sintetiza con acierto: ahí la pierna ortopédica de un mutilado de guerra “deja de asemejarse a la del animal, es la extremidad hechizada, inventada, forjada por la habilidad humana. Quién sabe si más auténticamente humana, por eso, por emular con labor de arte la sencilla obra de la naturaleza” (Salinas, 1997, p. 40). No se inquieten los aficionados a esta exaltación de la industria y el artificio como esencia de lo humano: al fin y al cabo, cualquier diseño biomimético que logre avanzar hacia su plasmación en la realidad no es desde luego un trozo de naturaleza, sino artificio humano -tan *hechizado, inventado, forjado por la habilidad humana* como los otros diseños “antinaturales” a los que sustituye.

No se trata de “volver a la naturaleza” sin más, con todos los aspectos regresivos que semejante programa podría entrañar, sino de *rediseñar nuestros artificios de forma que sean más semejantes a los productos de la naturaleza*. Así, por ejemplo, y en lo que a nuestra ropa se refiere, no se trata de volver a un estado preindustrial idealizado, donde no se empleasen más que fibras naturales. Pues...

“los materiales naturales para cubrir las necesidades de la población actual ni existen ni pueden existir. Si varios miles de millones de personas quisieran prendas vaqueras de fibras naturales teñidas con tintes naturales, la humanidad tendría que destinar millones de hectáreas al cultivo de algodón e índigo, simplemente para satisfacer la demanda -y esas hectáreas son necesarias para la producción de alimentos. Además, incluso los productos ‘naturales’ pueden no ser necesariamente saludables para los seres humanos y el entorno. El índigo contiene mutágenos y, al ser normalmente cultivado en explotaciones de monocultivo, reduce la diversidad genética.” (Braungart & McDonough, 2005, p. 38).

Por decirlo con otro ejemplo: encarecer *artificialmente* el transporte (por medio de una fiscalidad ecológica bien diseñada) que previamente se abarató de manera insostenible y *artificial* (con el uso masivo de combustibles fósiles), tal sería el tipo de *naturalidad* a que podemos aspirar en el siglo XXI (más sobre este asunto en ‘La industria de las manos y la nueva naturaleza’, capítulo 4 de Riechmann, 2000).

Recuadro 3. Los principios de la “Economía azul” según Gunter Pauli

-
1. Las soluciones se basan sobre todo en las leyes de la física. Los factores decisivos son la presión y la temperatura tal y como se encuentran en el lugar concreto.
 2. Sustituye “algo” por “nada”- para cada recurso, revisa si realmente es indispensable para la producción.
 3. En la naturaleza los nutrientes, materiales y energía siempre se reutilizan -la basura no existe. Cada co-producto es la base para un nuevo producto.
 4. La naturaleza evolucionó desde pocas especies hacia una rica biodiversidad. Riqueza significa diversidad. Pero la norma industrial va en sentido contrario...
 5. La naturaleza da espacio a los empresarios que hacen más con menos. La naturaleza se opone a los monopolios.
 6. La fuerza de la gravedad es la fuente principal de energía; el segundo recurso renovable es la energía solar.
 7. El agua es el disolvente principal (en vez de catalizadores complejos, químicos y tóxicos).
 8. La naturaleza está sometida a un constante cambio. Las innovaciones se generan continuamente.
 9. La naturaleza trabaja sólo con lo que se encuentra disponible en el mismo sitio. La economía sostenible no sólo respeta los recursos naturales, sino también la cultura y la tradición. La naturaleza se orienta hacia las necesidades básicas y luego se desenvuelve desde la mera satisfacción hacia la sobreproducción. El modelo económico presente se basa en la escasez como punto de partida para la producción y el consumo.
 10. Los sistemas naturales no se desarrollan en procesos lineales.
 11. En la naturaleza todo es degradable -sólo depende del tiempo.
 12. En la naturaleza todo está conectado y se desarrolla de manera simbiótica.
 13. En la naturaleza el agua, el aire y la tierra son bienes comunes, de libre acceso y disponibles en abundancia. En la naturaleza un proceso tiene múltiples utilidades. Los sistemas naturales tienen riesgos.
 14. Cada riesgo es un incentivo para innovaciones.
 15. La naturaleza es eficiente. Por ello la economía sostenible aprovecha al máximo los materiales y la energía disponibles, lo que hace que el precio baje para el consumidor.
 16. La naturaleza busca lo mejor posible para todos los involucrados.
 17. En la naturaleza las desventajas se convierten en ventajas. Los problemas son oportunidades.
 18. La naturaleza persigue las ventajas de la diversificación. Una innovación natural trae una multitud de ventajas para todos.
 19. Responde a las necesidades básicas con lo que tienes, desarrolla innovaciones inspiradas en la naturaleza, crea beneficios múltiples así como empleo y capital social, ofrece más con menos: ésta es la Economía Azul (Pauli, 2012).
-

Una técnica más amoldada a lo orgánico

Siendo verdad -como lo es- que “el hombre transforma iterativamente el entorno” (Echeverría, 1999, p. 40), y tomando nota de que “lo importante es que el artificio no sólo se contrapona a lo natural, sino ante todo a un artificio previo, que se trata de mejorar, o que simplemente se deja de lado” (ibid.), la propuesta de biomímesis trata de dejar de lado en ocasiones esos “artifícios previos” o rasgos de la tecnosfera que se han mostrado disfuncionales por su falta de coherencia con los ecosistemas; y trata en ocasiones de mejorar artificios previos, empleando como criterio de valoración precisamente el buen encaje dentro de la biosfera.

En su obra maestra *Técnica y civilización*, publicada en 1934, Lewis Mumford, no sin algo de *wishful thinking*, invocaba un futuro alternativo que en aquel tiempo aciago no logró abrirse camino. Pero quizá ahora, en otro tiempo crítico, tenga una oportunidad:

Hemos alcanzado ya un punto en el perfeccionamiento de la tecnología misma en que lo orgánico ha empezado a dominar a la máquina. En vez de simplificar lo orgánico (...), hemos empezado a complicar lo mecánico, con el fin de hacerlo más orgánico; por tanto, más efectivo y más armonioso con nuestro ambiente vital. (...) Existe una nueva concentración de fuerzas del lado de la vida. Las exigencias de la vida, antes expuestas solamente por los románticos y por los grupos e instituciones sociales más arcaicas de la sociedad, están ahora empezando a ser representadas en el corazón mismo de la técnica. (...) Comprendemos ahora que las máquinas, en el mejor de los casos, son imperfectas falsificaciones de organismos vivos. Nuestros mejores aeroplanos son bastas e inciertas aproximaciones si se comparan con un pato en vuelo; nuestras mejores lámparas eléctricas no pueden compararse en cuanto a eficiencia con la luz de una luciérnaga; nuestro sistema automático de teléfonos más complicado es un artefacto infantil si se compara con el sistema nervioso del cuerpo humano (Mumford, 1992, pp. 388, 389 y 392).

Me place dejar cerca de estas enjundiosas reflexiones de Mumford sobre la posibilidad de una técnica más cercana a lo orgánico otra interrogación, la de ese gran creador plástico que fue Eduardo Chillida:

Tengo la sensación de que la aplicación que se hace hoy día con tanta facilidad, en el mundo de la técnica, de la geometría a la realidad es un error terrible, en el sentido de que la geometría sólo es válida en la mente. Es decir, Euclides, cuando inventa sus puntos geométricos, parte de una base maravillosa, un lugar sin dimensión, que es el punto; pero en un papel un punto tiene dimensiones y entonces se hunde toda la geometría, es falsa. En realidad, la geometría en que está fundado el mundo de la técnica es falsa, habría que apoyar ese mundo técnico en otra estructura que no fuera solamente conceptual, sino que fuera de otro orden (Chillida 2005: 83).

Creo que Chillida no está proponiendo ninguna regresión “tecnofóbica”, sino advirtiendo sobre la magnitud de las pérdidas que se producen cuando pasamos, demasiado rápidamente, del concepto abstracto a su plasmación en el mundo real; y está evocando -como Mumford hizo algunos decenios antes- otras posibilidades, quizá no tan utópicas como intentan hacernos creer (y para el escultor vasco tangibles, desde luego, a través de la práctica del arte).

¿El socialismo no tendrá que ver, de forma bastante esencial, con el sosiego? En la medida en que los mecanismos de acumulación de capital son algo semejante a un engranaje gigante que rueda cada vez más rápido, quienes defendemos el socialismo (un ecosocialismo feminista para el siglo XXI) ¿no buscamos alejarnos de lo maquinal y autoacelerado de aquel movimiento? Y la idea de una técnica más lenta y amoldada a lo orgánico, coherente con ese socialismo ecológico ¿no merece la pena investigarla con una seriedad y rigor de los que hasta ahora no hemos sido capaces?

NOTAS

¹ Una primera versión de este texto se publicó en *Argumentos de razón técnica* 9, Universida de Sevilla 2006, p. 13-36.

² Aunque los orígenes del concepto son anteriores, la palabra *ecomimesis* se acuñó, creo, a mediados de los años noventa. Un artículo seminal es Friend, 1996.

³ Desde hace tiempo he desarrollado un análisis de la cuestión de la sustentabilidad, en el contexto de la crisis ecológica global, que parte de las siguientes cuatro premisas (o rasgos básicos de nuestra situación actual): 1) Hemos “llenado” el mundo, saturándolo en términos de espacio ecológico (como nos ha hecho ver el economista ecológico Herman E. Daly desde hace más de tres decenios). A esto me refiero como el *problema de escala*. 2) Nuestra tecnosfera está mal diseñada, y por eso -como nos enseñó el biólogo Barry Commoner hace casi cinco decenios- se halla “en guerra” con la biosfera. A esto lo llamo el *problema de diseño*. 3) Además, somos terriblemente ineficientes en nuestro uso de las materias primas y la energía (como han mostrado, entre otros, los esposos Lovins y Ernst Ulrich von Weizsäcker en *Factor 4*). Denominaré a esto el *problema de eficiencia*. 4) Por último, nuestro poderoso sistema ciencia/ técnica (que ahora podemos cabalmente llamar tecnociencia, tal y como insiste Javier Echeverría) anda demasiado descontrolado. Cabe referirnos a ello como el *problema fáustico*. De cada uno de esos rasgos problemáticos puede deducirse -en un sentido muy laxo del término *deducción*- un importante principio para la reconstrucción ecológica de los sistemas humanos, esto es, para avanzar hacia sociedades ecológicamente sostenibles:

problema de escala: hemos “llenado” el mundo	= principio de autolimitación (o de gestión generalizada de la demanda)
problema de diseño: nuestra tecnosfera está mal diseñada	= principio de biomimesis
problema de eficiencia: somos terriblemente ineficientes	= principio de ecoeficiencia

problema fáustico: nuestra poderosa = principio de precaución
tecnociencia anda
demasiado descontrolada

⁴ Esta cuestión es de enorme importancia. El principio de biomímesis nos advierte: la naturaleza *no* es cera virgen en manos del demiurgo-ingeniero. Tiene consistencia y estructura, que resultan de cientos de millones de años de evolución geofísica y biológica, a la que se han añadido miles de años de coevolución entre sistemas naturales y sistemas culturales. En ella, ciertas novedades pueden encajar bien, y otras no. A la hora de introducir cambios -sobre todo cambios tecnológicos de amplio alcance-, para evitar sorpresas desagradables, *hay que tener en cuenta a la naturaleza*, introduciendo una suerte de control previo de compatibilidad con la biosfera. El reconocimiento de nuestra naturaleza terrestre y la sana prudencia -que puede formalizarse como *principio de precaución*- así lo indican. Traté este asunto con más detalle en Riechmann, 2014, pp. 179-181.

⁵ No se cansa de repetirlo -y tiene razón- Ted Trainer en un importante libro suyo traducido al castellano, *La vía de la simplicidad* (Trainer, 2017). Por lo demás, incluso una institución tan *mainstream* como el *World Business Council for Sustainable Development* afirmaba en un informe de 1993 (difundiendo resultados de un taller que había organizado esta institución) que “hacia 2040 el mundo industrializado tendrá que reducir su flujo metabólico material [*throughput*], uso de energía y degradación ambiental en un 90%, para así responder con justicia a las necesidades de una creciente población mundial sin sobrepasar los límites planetarios”. Business Council for Sustainable Development, *Getting Eco-Efficient*, Report of the BCSD First Antwerp Eco-Efficiency Workshop, Ginebra, noviembre de 1993.

⁶ Por ejemplo, Pierre Bourdieu & J.C. Passeron en *La reproducción* reflexionaron sobre los mecanismos de violencia simbólica que presentan las desigualdades sociales como diferencias naturales, de forma que los dominados interiorizan su propia dominación como legítima (Bourdieu & Passeron, 1970).

⁷ En cuanto a la veneración de Hitler por la naturaleza como “cruel reina de toda sabiduría”, véase Amery, 2002.

⁸ El concepto de “excepcionalismo/ exencionalismo humano” fue introducido en la sociología ambiental en un artículo seminal de Catton y Dunlap (1978). Los dos autores criticaban la perspectiva dominante en la sociología estadounidense, prendida de lo que denominaron *paradigma del excepcionalismo humano*: la idea de que los rasgos excepcionales de *homo sapiens* -lenguaje, tecnología, ciencia, cultura en genera- eximían a las sociedades industrializadas de las constricciones de la naturaleza. Después cambiaron el término por el de *exencionalismo humano*, para admitir que no cuestionaban que los seres humanos posean características “excepcionales”, sino que nuestra especie estuviera exenta de las constricciones ecológicas. Véase Dunlap, 2002. Riley E. Dunlap. ‘Evolución de la sociología del medio ambiente: breve historia y valoración de la experiencia estadounidense’, en Michael Redclift y Graham Woodgate: *Sociología del medio ambiente*, McGraw Hill/ Interamericana de España, Madrid 2002, p. 3 y ss.

⁹ Esta ley cuarta no es sino una de las posibles formulaciones del *principio de entropía* o segunda ley de la termodinámica, de incalculable importancia a la hora de pensar la relación entre sociedades humanas y biosfera. Puede verse una introducción breve en Jorge Riechmann: ‘Por qué los muertos no resucitan y el reciclado perfecto es imposible’, capítulo II.1 de Fernández Buey/ Riechmann 1996. El clásico para esta cuestión es el economista rumano Nicholas Georgescu-Roegen: un artículo suyo luminoso y accesible es ‘¿Qué puede enseñar a los economistas la termodinámica y la biología?’, en Aguilera Klink/ Alcántara, 1994.

¹⁰ Pero es muy interesante el giro que ha dado Bruno Latour estos últimos años, al toparse (es mi conjetura) con los enormes asuntos del calentamiento global y Gaia. Ahora el *maître à penser* de la epistemología posmoderna, reivindicado hasta ayer mismo desde las filas de quienes defienden que

la naturaleza no existe, se descuelga calificando de “genial” el lema de los zadistas franceses: *no estamos defendiendo la naturaleza, somos la naturaleza que se defiende* (Latour, 2019, p. 97). “Zadistas” son los activistas de defensa del territorio vinculados a la ZAD (*Zone à défendre*) que han luchado de forma ejemplar contra el proyecto de un nuevo aeropuerto en Notre-Dame-des-Landes (cerca de Nantes, en Francia).

¹¹ Que por añadidura -aunque esto no nos interese aquí- es incoherente con la construcción de Arias Maldonado en el resto de su ponencia/ artículo, pues luego tiene que distinguir entre “*el capital natural*, constituido por aquellos aspectos del mundo natural que son empleados o son potencialmente empleables en el sistema económico y social humano” y el capital hecho por el hombre: es decir, necesita -para el resto de su construcción doctrinal- que sean diferenciables el capital natural y el capital manufacturado.

¹² “La frontera entre ‘Estado’ (*polis*) y ‘Naturaleza’ (*physis*) ha quedado abolida. La ciudad del hombre, que antaño constituía un enclave dentro del mundo no humano, se extiende ahora sobre toda la naturaleza terrenal y usurpa su lugar. La diferencia entre lo artificial y lo natural ha desaparecido, lo natural ha sido devorado por la esfera de lo artificial” (Jonas, 1995, p. 37).

¹³ Echeverría prosigue: “Una reflexión más ponderada aconseja distinguir dos grandes entornos para los seres humanos, el natural y el artificial. En la época premoderna, las ciudades humanas eran enclaves cerrados y protegidos, como afirma Jonas. Hoy en día las urbes se desparraman por extensos territorios y generan sus propias modalidades de naturaleza artificial (jardines, parques, alimentos transgénicos, especies animales artificiales, etc.). Mas la *physis* no ha desaparecido de la superficie del planeta. En particular, no ha desaparecido la *physis* de los seres humanos, es decir nuestros cuerpos. Por ello preferimos decir que el segundo entorno (*polis*) se superpone al primero (*physis*), e incluso lo oculta en parte (ropas, edificios, etc.), pero sin eliminarlo.”

¹⁴ Ha argumentado en este sentido, con mucho más detalle del que puedo permitirme ahora, Kate Soper (Soper, 1995).

¹⁵ En septiembre de 1991, ocho investigadores se encerraron en *Biosfera 2*, un invernadero hermético de 1’25 hectáreas construido en el desierto de Arizona, en cuyo interior se habían creado mini-ecosistemas. El intento de hacer funcionar aquello durante dos años sin ningún intercambio con el exterior (aparte el flujo de luz solar) fracasó: la degeneración de los ecosistemas artificiales fue rápida, y hubo que bombear oxígeno desde el exterior para, a trancas y barrancas, mantener al equipo investigador dentro del invernadero durante dos años. Puede verse una información sucinta en Prugh & Assadourian, 2004, pp. 10-11. También Sagan, 1995, pp. 251 y ss.

¹⁶ La propuesta ecologista no tiene que ver con un (imposible) retorno a una naturaleza virgen, sino que invita a un *reencuentro con la naturaleza propia*. Redescubrirnos como los seres naturales que somos: criaturas gaianas en una biosfera terrestre donde todo está conectado con todo, y tenemos responsabilidades de hermanos mayores hacia las demás criaturas.

¹⁷ En realidad Max-Neef propone un triple nivel: *necesidades/ satisfactores/ bienes económicos* (ver pp. 49-53), pero no entraremos ahora en estas distinciones para no complicar excesivamente nuestro asunto.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILERA KLINK, F. & ALCÁNTARA, V. (1994). *De la economía ambiental a la economía ecológica*. Barcelona: Icaria.
- ALTVATER, E. (1994). *El precio del bienestar*. Valencia: Edicions Alfons el Magnànim.
- AMERY, C. (2002). *Auschwitz, ¿comienza el siglo XXI? Hitler como precursor*. Madrid: Turner/Fondo de Cultura Económica.
- ARIAS MALDONADO, M. (Septiembre 2002). 'Sustentabilidad, democracia y política verde', ponencia en el I Congreso Iberoamericano de Ética y Filosofía Política, Alcalá de Henares.
- BENYUS, J.M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Nueva York: William Morrow.
- BLOUNT, E., CLARIMÓN, L., CORTÉS, A., RIECHMANN, J. & ROMANO, D. (coords.) (2003). *Industria como naturaleza. Hacia la producción limpia*. Madrid: Los Libros de la Catarata.
- BOURDIEU, P. & PASSERON, J.C. (1970). *La reproduction. Éléments pour une théorie du système d'enseignement*. París: Minuit.
- BRAUNGART, M. & MCDONOUGH, W. (2005). *Cradle to cradle (de la cuna a la cuna)*. Madrid: McGraw Hill.
- CATTON, W.R. & DUNLAP, R.E. (1978). 'Environmental sociology: a new paradigm'. *The American Sociologist*, vol. 13.
- COMMONER, B. (1973). *El círculo que se cierra*. Barcelona: Plaza y Janés.
- CHILLIDA, E. (2005). *Escritos*. Madrid: La Fábrica.
- DOBSON, A. (1998). *Justice and the Environment -Conceptions of Environmental Sustainability and Dimensions of Social Justice*. Oxford: Oxford University Press.
- DOLLIMORE, J. (1991). *Sexual Dissidence: Augustine to Wilde, Freud to Foucault*. Oxford: Clarendon Press.
- DUNLAP, R.E. (2002). 'Evolución de la sociología del medio ambiente: breve historia y valoración de la experiencia estadounidense', en Redclift & Woodgate (Eds.). *Sociología del medio ambiente*. Madrid: McGraw Hill/ Interamericana de España.
- ECHEVARRÍA, J. (1999). *Los Señores del aire: Telépolis y el Tercer Entorno*. Barcelona: Destino.
- ECHEVERRÍA, J. (2003). 'El principio de responsabilidad: ensayo de una axiología para la tecnociencia', *Isegoría*, 29 (monográfico sobre ética y responsabilidad).
- FERNÁNDEZ BUEY, F. & RIECHMANN, J. (1996). *Ni tribunales. Ideas y materiales para un programa ecosocialista*. Madrid: Siglo XXI.
- FRIEND, G. (1996). *Ecomimesis: copying ecosystems for fun and profit*. The New Bottom Line, Obtenido de <http://www.natlog.com/resources/nbl/v05/n04.html>.
- GOODIN, R.E. (1995). *Green Political Theory*. Cambridge: Polity Press.
- GREENPEACE ESPAÑA (9 de agosto, 2004). *La energía nuclear recibió 40 veces más ayudas públicas que la energía eólica* [Comunicado de prensa].
- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Working Group 3: Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- JIMÉNEZ, J.R. (1990). *Ideología*. Barcelona: Anthropos.
- Jiménez, N. & Ramírez, O. (2019). 'Political ecology of adaptation: claiming a critical biomimicry for the Anthropocene', *Journal of Political Ecology*, vol. 26, pp. 567-578.
- JONAS, J. (1995). *El principio de responsabilidad. Ensayo de una ética para la civilización tecnológica*. Barcelona: Herder.

- LATOUR, B. (2019). *Dónde aterrizar*. Madrid: Taurus.
- MARX, K. & ENGELS, F. (1981). *El manifiesto comunista (1848)*. Madrid: Ayuso.
- MAX-NEEF, M. (1993). *Desarrollo a escala humana*. Barcelona: Icaria.
- MEDINA, M. (2000). 'Ciencia-Tecnología-Cultura del siglo XX al XXI', en Medina y Teresa Kwiatkowska (Eds.). *Ciencia, tecnología/ naturaleza, cultura en el siglo XXI*. Barcelona: Anthropos.
- MUMFORD, L. (1992). *Técnica y civilización (1934)*. Madrid: Alianza.
- PAULI, G. (2012). *La economía azul*. Barcelona: Tusquets.
- PRUGH, T. & ASSADOURIAN, E. (2004). *¿Qué es la sostenibilidad?*. Madrid: Worldwatch 20.
- REDCLIFT, M. & WOODGATE, G. (2002). *Sociología del medio ambiente*. Madrid: McGraw Hill/ Interamericana de España.
- RIECHMANN, J. (1997) 'La industria de las manos y la nueva naturaleza. Sobre naturaleza y artificio en la era de la crisis ecológica global', *Ecología Política*, 13, p. 87-106.
- RIECHMANN, J. (coord.) (1998). *Necesitar, desear, vivir*. Madrid: Los Libros de la Catarata.
- RIECHMANN, J. (2000). *Un mundo vulnerable*. Madrid: Los Libros de la Catarata.
- RIECHMANN, J. (2003). *Todos los animales somos hermanos*. Granada: Universidad de Granada.
- RIECHMANN, J. (2006). *Biomímesis. Ensayos sobre imitación de la naturaleza, ecosocialismo y autocontención*. Madrid: Los Libros de la Catarata.
- RIECHMANN, J. (2014). *Un buen encaje en los ecosistemas (segunda edición actualizada de Biomímesis)*. Madrid: Los Libros de la Catarata.
- RIECHMANN, J. & FERNÁNDEZ BUEY, F. (1998). *Trabajar sin destruir. Trabajadores, sindicatos y ecología*. Madrid: HOAC.
- SAFRANSKI, R. (2000). *El mal*. Barcelona: Tusquets.
- SAGAN, D. (1995). *Biosferas*. Madrid: Alianza.
- SALINAS, P. (1997). *La bomba increíble*. Madrid: Viamonte.
- SAVATER, F. (1996). *Diccionario filosófico*. Barcelona: Planeta.
- SOPER, K. (1995). *What is Nature?*. Oxford: Blackwell.
- TRAINER, T. (2017). *La vía de la simplicidad*. Madrid: Trotta.

La Agroecología, cultura cafetalera y ética para la vida

Armando Contreras

Instituto de Ecología, A. C., (México)

El trabajo que presento es un ejercicio de integración de los estudios del café realizados con un enfoque agroecológico y la biomímesis; es decir, la vida, la inspiración creativa del orden natural. La cita para ello fue el simposio celebrado en abril de 2016 en la ciudad de Leticia (Colombia), que convocó a un centenar de personas que tienen en común la curiosidad por los procesos que permiten su expresión en los sistemas naturales y culturales del mundo complejo (Sierra & Bernal, 2017).

Durante los días de la reunión tuvimos la fortuna de sentir la presencia Amazónica: el río, la selva, sus culturas, los jóvenes y emergentes entornos urbanos, las relaciones fronterizas y los extranjeros en comunión con la madre tierra, sin dejar de tener la mirada puesta en los proyectos de explotación económica de los bienes naturales y las clases trabajadoras del planeta.

Para dimensionar la biomímesis entre ciudadanos con bagajes culturales diferentes¹ fue necesario un acercamiento respetuoso a las identidades y construir una comunicación mediada para abordar la fragmentación de nuestra experiencia y la guía de nuestros anfitriones, ubicados en su entorno tropical y personificando a las culturas locales.

La reunión nos llevó por varios senderos; el mundo mágico, que supera los diferentes lenguajes, que usa la vivencia primigenia -universal-; junto con la presencia de los *abuelos* que tienen el conocimiento de la vida y de los pueblos. Su sabiduría les permite invocar a los seres mágicos de la naturaleza y recordar el saber de los ancestros (Yukuna, 2017). Otro sendero fue el académico, con una perspectiva multidisciplinaria que posibilitó el diálogo de especialistas sobre las aportaciones de la biomimesis, la filosofía, la epistemología y la historia. Las tecnociencias y la innovación fueron temáticas que vertebraron el debate de la evolución, de los principios unificadores, de la cooperación en la organización de la vida. Estuvo presente la ecología de comunidades. Sobre todo, el concepto de resiliencia, que indica la capacidad de aquéllas de absorber perturbaciones sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad, pudiendo regresar a su estado original una vez que la perturbación ha terminado. Se señaló que las comunidades más complejas, poseen mayor número de interaccio-

nes entre sus partes y suelen poseer resiliencias mayores, ya que existe una mayor cantidad de mecanismos auto-reguladores (Holling, 1973). De igual manera, en el encuentro de Leticia la propia experiencia de los participantes en el asunto favoreció la transmisión de múltiples ejemplos, a nivel de Latinoamérica, sobre ensayos culturales de prácticas tendentes a la sustentabilidad inspiradas en formas existentes en la naturaleza.

El debate partió de las ciencias sociales que mantienen la crítica a la economía crematística. La economía energética humana debería imitar a la economía natural de los ecosistemas con el fin de reconstruir los sistemas productivos humanos haciéndolos compatibles con la biosfera. Se trata de reinsertar los sistemas humanos dentro de los sistemas naturales para prevenir la sobreexplotación, la destrucción y degradación del medio antes de que estos cambios sean irreversibles (FEM, 2017).

Finalmente, se reflexionó sobre la andadura de las expresiones estéticas que permiten recrear las culturas, cada una como alegoría de la condición humana. En la práctica educativa he experimentado la presencia de maestros como Rufino Tamayo², Francisco Toledo³, Sebastián Salgado⁴ y Pablo Genovés⁵ que, con su lenguaje universal, tienen presente la creación popular y ponen al servicio de la ciudadanía mundial sus interpretaciones de la belleza para mirar de forma inquisitiva la injusticia social y la condición humana.

Consideraciones históricas, filosóficas y epistemológicas para entender la biomímesis

En la postmodernidad⁶, las tecnociencias son la herramienta de dominio de las élites en la rueda del capitalismo salvaje⁷. La filosofía y la epistemología pierden su tarea de validación del sistema de conocimiento de los saberes locales que, frente a los intereses del capital, quedan inutilizados por el poder económico; basta con señalar que el principio social de la representación democrática, desde la unidad más simple, como es la comunidad, hasta las estructuras de los ministerios del mundo, dejó de operar por falta de principios éticos. En el siglo XXI, la sociedad ve caer las instituciones que forman el estado moderno. Resulta incomprensible que la fragmentación del planeta desemboque en la exclusión de espacios geográficos condenados a la destrucción ambiental y de seres humanos por su diferencia racial, religiosa, cultural, económica o de preferencia. Se niega, así, la interconexión de mujeres y hombres con vida.

El concepto de biomímesis en la filosofía del mundo antiguo tiene una importante connotación, ya que la interrelación de la relación seres humanos con la naturaleza, la existencia de un orden superior, su representación en uno o varios dioses, y las relaciones entre los seres humanos, el fin de la existencia, son asuntos centrales del devenir histórico. Actualmente, el concepto es recuperado por J.

Benyus (1997) en su libro *Biomímesis, innovación inspirada de la naturaleza*. En sus páginas propone que las tecnociencias actúen en el marco de la ética para la sostenibilidad y la regeneración. Se trata de innovar y reconectar para ajustarnos a los límites planetarios. Desde otra perspectiva, la biomímesis critica la economía lineal de producción, uso y desecho. Señala que “el coche medio se pasa el 92 % del tiempo aparcado, el 31 % de los alimentos se desechan a lo largo de la cadena de valor y la oficina media sólo se usa entre el 35 y el 50 % del tiempo, incluso durante el horario laboral” (FEM, 2015). Estos planteamientos obligan a una reflexión profunda, ya no de los actos cotidianos, sino del propio rumbo de la existencia.

Nos dicen Edgar Morin y sus colaboradores que “la especie humana tiene grandes potencialidades aún no desarrolladas, lo que queda patente en el abismo que hay entre nuestros más preciados valores éticos y la barbarie moral en la que convivimos día a día”, frase con la que inicia la presentación de su libro *Educación en la Era Planetaria* (2002). Si lográramos (individualmente) observar la forma como procedemos, podríamos reconocer el trabajo de otros hombres que se afanan para producir alimentos, para coleccionar el agua diaria, para fabricar artículos indispensables que nos facilitan la vida. Y seguramente podríamos identificar nuestra indiferencia al desperdiciar otros artículos que usamos y malgastamos. Pero no pretendo juzgar. Me gustaría que el diálogo fuera más allá de la culpa, porque los seres humanos, a fin de cuentas, tenemos los mismos problemas de vida y muerte. La misión de la educación para la ciudadanía mundial (Collado, 2016) en la era planetaria es fortalecer las condiciones de posibilidad de una sociedad-mundo, compuesta por ciudadanos protagonistas, conscientes y críticamente comprometidos en la construcción de una civilización planetaria. En el presente, sin embargo, devienen invisibles: el contexto, lo global, lo multidimensional y lo complejo. El conocimiento, buscando su construcción en relación con el contexto, con lo global, con lo complejo, debe movilizar lo que el consciente sabe del mundo. La educación es una tarea política. La educación deberá ser una enseñanza primera y universal centrada en la condición humana. Estamos en la era planetaria; una aventura común se apodera de los humanos donde quiera que estén. Éstos deben reconocerse en su humanidad común y, al mismo tiempo, reconocer la diversidad cultural inherente a lo humano. La era planetaria debe mostrar que no hay conocimiento que no esté, en algún grado, amenazado por el error y por la ilusión. Un conocimiento no es el espejo de las cosas o del mundo exterior. Al error de percepción se le suma el error intelectual. El conocimiento genera ilusiones (absolutos) que, a su vez, producen cegueras. Así, la memoria, fuente irremplazable de verdad, puede estar sujeta a los errores y a las ilusiones. El humano es un ser plenamente biológico y plenamente cultural que lleva en sí esta unidualidad originaria. Es un súper y un hiperviviente. Ha desarrollado de manera sorprendente

las potencialidades de la vida. Expresa de manera hipertrofiada las cualidades egocéntricas y altruistas del individuo, alcanza paroxismos de vida en el éxtasis y en la embriaguez, hierve de ardores orgiásticos y orgásmicos; es en esta hiper vitalidad que el *Homo sapiens* es también *Homo demens*.

El hombre es, pues, un ser plenamente biológico, pero si no dispusiera plenamente de la cultura sería un primate del más bajo rango. La cultura acumula en sí, lo que se conserva, transmite, aprende; ella comporta normas y principios de adquisición. De ahí la esperanza de despejar un problema vital por excelencia que relegaría a los demás problemas vitales. Pero este problema vital está constituido por el conjunto de los problemas vitales, es decir, supone la inter-solidaridad compleja de problemas, antagonismos, crisis, procesos incontrolados. El problema planetario es un todo que se alimenta de ingredientes múltiples, elementos conflictivos, situaciones de crisis; los engloba, los aventaja y, de regreso, los alimenta.

Lo que agrava la dificultad de conocer nuestro mundo es el modo de pensamiento, que ha atrofiado en nosotros, en vez de desarrollarla, la aptitud de contextualizar y globalizar, precisamente cuando la exigencia de la era planetaria es pensar la globalidad, la relación todo-partes, su multi-dimensionalidad, su complejidad.

Es la complejidad (el bucle productivo / destructivo de las acciones mutuas de las partes en el todo y del todo en las partes) la que presenta problemas. Necesitamos, desde ahora, concebir la insostenible complejidad del mundo en el sentido de que hay que considerar tanto la unidad como la diversidad del proceso planetario, sus complementariedades y también sus antagonismos. Nos dice Edgar Morin: “El planeta no es un sistema global, sino un torbellino en movimiento, desprovisto de centro organizador”. Este planeta necesita un pensamiento poli-céntrico capaz de apuntar a un universalismo no abstracto sino consciente de la unidad / diversidad de la condición humana; un pensamiento poli-céntrico alimentado por las culturas del mundo. Educar para este pensamiento: esa es la finalidad de la educación del siglo XXI que debe trabajar en la era planetaria en pos de la identidad y la conciencia terrenal.

El problema de la comprensión se ha vuelto crucial para los humanos. Y por esta razón debe ser una de las finalidades de la educación para el futuro. Recordemos que ninguna técnica de comunicación, el teléfono o internet, aporta por sí misma la comprensión. La comprensión no puede digitalizarse. Educar para comprender las matemáticas o cualquier disciplina es una cosa. Educar para la comprensión humana es otra; ahí se encuentra justamente la misión espiritual de la educación: enseñar la comprensión entre las personas como condición y garantía de la solidaridad intelectual y moral de la humanidad. El problema de la comprensión está doblemente polarizado. Un polo, ahora planetario, es el de la comprensión entre humanos: los encuentros y relaciones se multiplican entre

personas, culturas, pueblos que representan culturas diferentes. Por otra parte, la comunicación no conlleva comprensión. La información, si es bien transmitida y comprendida, conlleva inteligibilidad, primera condición necesaria para la comprensión, pero no es suficiente.

La verdadera tolerancia no es indiferente a las ideas o escepticismos generalizados; aquélla supone una convicción, una fe, una elección ética y, al mismo tiempo, la aceptación de la expresión de las ideas, convicciones, elecciones contrarias a las nuestras. La tolerancia supone un sufrimiento al soportar la expresión de ideas negativas o, según nosotros, nefastas, y una voluntad de asumir este sufrimiento. Existen cuatro grados de tolerancia: el primero, expresado por Voltaire, nos obliga a respetar el derecho de proferir un propósito que nos parece innoble; no se trata de respetar lo innoble, se trata de evitar que impongamos nuestra propia concepción de lo innoble para prohibir una palabra. El segundo grado, es inseparable de la opción democrática: lo justo de la democracia es nutrirse de opiniones diversas y antagónicas; así, el principio democrático ordena a cada uno respetar la expresión de las ideas antagónicas a las suyas. El tercer grado, obedece al concepto de Niels Bohr, para quien el contrario de una idea profunda es otra idea profunda; dicho de otra manera, hay una verdad en la idea antagónica a la nuestra, y es esta verdad la que hay que respetar. El cuarto grado, proviene de la conciencia de las enajenaciones humanas por los mitos, ideologías, ideas o dioses, así como de la conciencia de los desvíos que llevan a los individuos más lejos y a un lugar diferente de donde quieren ir. La tolerancia vale, claro está, para las ideas no para los insultos, agresiones o actos homicidas.

La antropo-ética supone la decisión consciente y clara de asumir la condición humana (individuo, sociedad, especie) en la complejidad de nuestra era. Implica alcanzar la humanidad en nosotros mismos, en nuestra conciencia personal. Asumir el destino humano en sus antinomias y en su plenitud. La antropo-ética nos pide impulsar la misión antropológica del milenio: trabajar para la humanización de la humanidad. La ciudadanía planetaria tiene que efectuar el doble pilotaje del planeta: obedecer a la vida y guiar la vida. Es decir, lograr la unidad planetaria en la diversidad. Respetar en el otro, a la vez, tanto la diferencia como la identidad consigo mismo. Desarrollar la ética de la solidaridad. Desarrollar la ética de la comprensión. Enseñar la ética del género humano. La antropo-ética conlleva, entonces, la esperanza de lograr la humanidad como conciencia y ciudadanía planetaria. Comprende, por consiguiente, como toda ética, una aspiración y una voluntad, pero también una apuesta a lo incierto. Ella es conciencia individual más allá de la individualidad. El carácter, en adelante, desconocido de la aventura humana debe incitarnos a preparar a nuestras mentes para esperar lo inesperado y poder afrontarlo.

En la modernidad planetaria falta dilucidar cómo los grupos originarios⁸ del

mundo no occidental -indígenas, campesinos y aquellos que viven en resistencia- habitan el planeta y pueden desarrollarse imitando los procesos y ciclos naturales, qué les permite mantener su cultura, cómo opera el sistema de conocimiento basado en la observación y el uso de recursos sin destruir la comunidad biológica de la que dependen. Qué valores, además, los mantienen en sus territorios y cómo logran la unidad frente a los otros. Queda por analizar, en suma, la ética de la vida, que integra los conocimientos -empíricos y científicos- y sus avances para la comprensión de la naturaleza, la adaptación social, política y económica.

Por su parte, la sociedad contemporánea tiene gran responsabilidad sobre sus actos. No para castigarlos, sino para modificar su forma de vida y cambiar sus aspiraciones de felicidad. ¿Qué tendrán que hacer las empresas trasnacionales para pagar su deuda ecológica y social, en tanto que controlan el mercado y ponderan la ganancia como único criterio de valor?, ¿qué cambio experimentará la gran clase media consumista, que exige bienes y servicios sin conocer el valor ambiental y el trabajo productivo?, ¿cómo restituir a los excluidos -del campo y de las metrópolis- su bienestar social? Cabe imaginar que los saberes tradicionales y las ciencias occidentales son dos puntas de un mismo hilo. Desde esta visión, es evidente que la biomimesis se entiende como una noción del conocimiento y una aspiración por la sustentabilidad. Un planteamiento profundo sobre ello explica que la sustentabilidad es la construcción cultural desde el reconocimiento de la ética de la vida. Es decir, el reconocimiento de que el crecimiento económico desmedido y dispendioso es un fracaso socio-ambiental, que su problemática no puede abordarse con pequeñas acciones aisladas, sino que necesita entenderse en su complejidad y atenderse con cambios profundos. En suma, que la actividad humana debe centrarse en su relación -objetiva y subjetiva- con la naturaleza y sus semejantes (Morandín & Contreras, 2017). Esta discusión se presenta gráficamente en la figura 1. El primer diagrama comúnmente aceptado para representar la sustentabilidad o desarrollo sostenible débil, basado en el *Informe Brundtland* de 1987, da el mismo valor a los tres componentes de la sustentabilidad: economía, sociedad y ambiente (Giddings *et al.* 2002). En el segundo diagrama se presentan los tres componentes anidados que difieren en orden e importancia y representa un modelo de sustentabilidad fuerte.

Nuestro deseo es explorar el objetivo de la biomimesis en fomentar la sustentabilidad. Se trata de un concepto que requiere un abordaje crítico para constatar desde dónde, para quién y cómo se lleva a cabo teniendo en cuenta estas dos rutas culturales (en tanto que representan esfuerzos diferenciados). Se propone, así, que este análisis deba ser enmarcado en los límites que marca la ecología y la interdependencia humana a escala planetaria. De igual manera, resulta fundamental identificar los límites sociales y la urgencia de construir una ciudadanía planetaria que borre los privilegios de las sociedades opulentas y que valore las formas de

vida de los grupos originarios y sus territorios, pues supone un camino alternativo para revertir la crisis ambiental del siglo XXI.

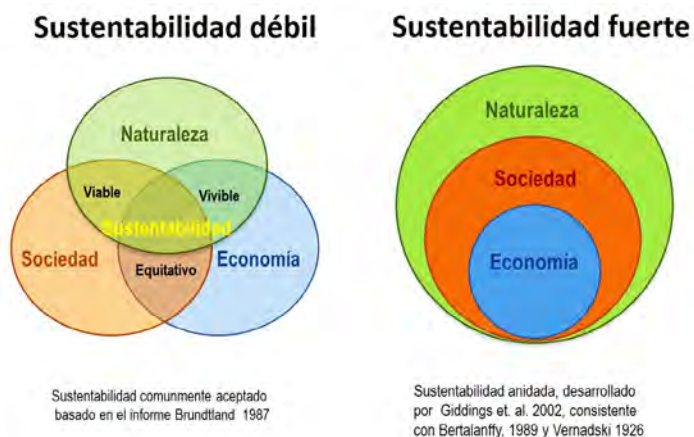


Figura 1. Insertar la representación de la Sustentabilidad

En diferentes disciplinas se tienen evidencias de realidades (parciales) que dan pistas sobre la existencia de mundos paralelos. Para los físicos cuánticos, por ejemplo, la existencia de mundos paralelos que se influyen en un sutil campo de atracción y repulsión permite la existencia de multiversos. Los estudios de antropología permiten suponer también que los grupos culturales viven en realidades separadas.

La mirada Latinoamericana

Hablaremos de Latinoamérica como aquella región continental con un alto valor por su riqueza biológica y por su biodiversidad. Este territorio está conformado por más de 500 culturas indígenas de gran importancia lingüística, herederos de antiguas civilizaciones, que manejan la conservación de sus hábitats a partir de sus propios sistemas de creencias, conocimientos y prácticas de vida (Toledo *et al.*, 2001). La región tuvo una convulsa historia de colonización, de tal modo que, durante cinco siglos, experimentó el mestizaje y diferentes procesos migratorios que le permiten tener una conexión privilegiada con las culturas del mundo. También Latinoamérica es en la modernidad el territorio que conserva una porción importante de la biodiversidad planetaria.

Continente pluricultural, diverso y codiciado

Existen diferentes interpretaciones acerca de las relaciones que mantienen los pueblos de Latinoamérica, propiciando la fraternidad y conservando los vínculos de origen con las culturas pasadas. Desde una perspectiva histórica, resulta hasta cierto punto sorprendente la pervivencia de intercambios culturales que, más allá de las fronteras, favorecen un conocimiento sobre especies alimentarias como, por ejemplo, el maíz (*Zea mays*), la kínua (*Chenopodium quinua*), la malanga (*Xanthosoma spp*), los frijoles (*Phaseolus vulgaris*) y una gran cantidad de frutos tropicales que, en su origen, sólo se recolectaban y en la actualidad se consumen entre la población agraria y urbana. Las formas de intercambio a través de tecnologías para la elaboración de textiles, alfarería y manejo de los metales, fueron socializadas a través de diferentes vías y, en la actualidad, son conservadas en el seno de las economías campesinas⁹. Las similitudes culturales existentes también nos permiten hablar de la existencia de puentes que traspasan las fronteras de territorios aislados. En tal sentido, se ha de destacar la forma de construir la felicidad en actividades agrarias recurriendo a mínimos elementos industriales y rodeados de espacios naturales de gran belleza. Las creencias y valores de los campesinos les permiten apoyar su vida cotidiana en el trabajo voluntario, la cooperación familiar y la participación comunitaria. Sabemos que la existencia de los productores de pequeñas superficies transita por el delgado hilo de la incertidumbre en la producción y las condiciones naturales cada día más inestables. Se vive en un agitado ciclo de avances y retrocesos que alimentan la esperanza.

Eduardo Galeano (1971) en su libro *Las venas abiertas de America Latina*, señala el lastre colonial y su representación en la postmodernidad. Los cinco siglos de dominación aún están presentes. Más allá de la denuncia a los grandes capitales, la explotación de la región se explica también por la falta de solidaridad de los representantes gubernamentales en los foros internacionales. Así, por ejemplo, no existe un frente común para defender a los migrantes latinos en los Estados Unidos de Norteamérica. Las potencias económicas lograron dividir a los países de la región para firmar convenios comerciales separados que les brindaron las condiciones para explotar las riquezas naturales. En el Cono Sur no hay un acuerdo que frene la explotación de la Cuenca Amazónica y las diferencias entre los líderes dieron paso a megaproyectos extractivistas. Los países de la región vivieron uno de los capítulos más vergonzosos de intervención moderna con la presencia de militares que usurparon la democracia y que hoy en día son el testimonio más evidente de los estados fallidos. Max Weber, dijo en su libro *La política como vocación* (1919) que una condición necesaria para que una entidad se convierta en un estado es que se conserve el monopolio de la violencia legítima. Por definición el estado y su administración mantienen el dominio sobre el territorio y las garantías institucionales para los ciudadanos. En el monopolio del uso legítimo de la violencia, el estado, según Weber,

es la fuente de la legitimidad. Teniendo esto en cuenta, no sorprende que los negocios ilícitos del mundo tengan sus gerencias en los países latinoamericanos, particularmente en México. Latinoamérica tendrá que caminar hacia una arquitectura supranacional, con fiscalías y juzgados supranacionales, una policía supranacional para atender el desmantelamiento de las redes criminales (Guscaglia, 2015).

La aportación de la agroecología en la construcción cultural

En lo que respecta a la producción de café bajo la perspectiva agroecológica, cabe constatar condicionantes históricos, sociales y económicos que, sin duda, tienen incidencia en la transformación de los paisajes tropicales de América. El café es una mercancía que fue impuesta para cubrir la demanda del imperio colonial y ahora satisface el gusto de la población urbana en buena parte del planeta. La habilidad de los indígenas y campesinos del trópico consistió en adaptar el grano a sus diversos sistemas de producción y ajustar sus modos de vida para dar cabida al trabajo de un producto que no consumían, de tal modo que, en la actualidad, es posible contabilizar que más de la mitad de la producción de café proviene de América Latina.

En cada región los agricultores eligen las estrategias de producción y se ajustan a las condiciones ambientales, pero reciben una mínima parte de ganancias del café. Frente a la crisis alimentaria, los productos agrarios comerciales son una alternativa para complementar el autoconsumo. En México, por ejemplo, los trabajadores del café suman alrededor de tres millones. El grano se cultiva en doce estados del país, contribuyendo con el 4% de la producción mundial. Son un gremio que, además, exige su participación en los acuerdos sociales. En el presente, los cafetales cultivados bajo la copa de los árboles son estratégicos para la conservación de la naturaleza. La experiencia de *Café In Red* demuestra la validez del trabajo de una red nacional que cuenta con un diseño colectivo, tiene un sistema de inteligencia que permite tomar decisiones informadas, dispone de líneas de investigación en el campo de la cultura cafetalera, atiende a los problemas emergentes, genera procesos de participación social y lleva a cabo recomendaciones en el ámbito de la política pública.

¿Qué es Café In Red?

En el Instituto de Ecología A. C., el antecedente de *Café In Red* fue el proyecto Biocafé (SEMARNAT-CONACYT C01-0194), realizado entre 2003 y 2008, que tenía como objetivo estudiar la biodiversidad en los bosques tropicales de niebla, en Veracruz. El registro resultante consistió en 2,197 especies, pertenecientes a

190 familias, 42 órdenes y 7 clases en los cafetales y fragmentos de bosques estudiados. De las especies señaladas el $87\% \pm 12\%$ existen tanto en los cafetales como en los fragmentos de bosque estudiados (Manson *et al.*, 2008, p. 279). Estos resultados entusiasman a los académicos, impresionan a los productores, pero faltan elementos para saber cómo mantener y aprovechar aquellas especies que representan la forma de satisfacer las necesidades de las familias que viven en los bosques. Por ello, en el proyecto *Café In Red* (FORDECYT 739398) pusimos a la disposición de las organizaciones de productores de café recomendaciones para diversificar los cafetales y generar actividades que mejorasen las unidades familiares de producción. El enfoque seguido fue la promoción de la cultura cafetalera, valorar el trabajo de los integrantes de la familia y documentar los modos de vida en la zona cafetalera. Entre los años 2010 y 2017, se realizaron 300 eventos con 7.000 participantes. Estos números son testimonio de la capacidad de vinculación de los académicos con los procesos sociales como se muestra en la figura 2 (Contreras, 2013, p. 7).

El diálogo con las familias fue el segundo aspecto de atención, ya que se buscaba consolidar la producción múltiple basada en el sistema milpa¹⁰, como centro de la alimentación, en combinación con caña de azúcar, café y ganadería doméstica para la producción de alimentos de interés nacional e internacional. En este sentido, las mujeres y los niños tienen un papel estratégico en la unidad de producción y en la cultura local (Moreno *et al.*, 2017, p. 16).

Escuchar las voces del campo a través de las instituciones locales fue el tercer objetivo. Se prestó atención a los actores sociales emergentes y a los problemas que reconfiguran la vida rural; por ejemplo, la generación de empleo para los jóvenes, entender los procesos de migración, reconocer las formas de resistencia de los afectados ambientales, las luchas sociales y la participación.

Para los productores activos el cultivo del café es un proyecto de vida. Se trata de una utopía colectiva que demanda el apoyo de las instituciones que tienen la responsabilidad social de conducir las políticas públicas del sector y tener en consideración a los actores sociales de la cafecultura, comprometidos con la producción de alimentos y la reproducción de la cultura regional. *Café In Red* genera información para la comprensión de los agroecosistemas cafetaleros e incide en otras regiones que resultan sorprendentes por la originalidad de las respuestas locales y las estrategias de producción. Además de lo anterior, *Café In Red* interviene en el proceso social; los vínculos creados en la red conectan iniciativas, comunica experiencia, facilita el acercamiento de sujetos y grupos, e intercambia prácticas entre organizaciones, regiones y otros actores externos.

El objetivo de *Café In Red* es consolidar un grupo estratégico de productores, centros de investigación e instancias gubernamentales para el centro de Veracruz (en México), que fomente la innovación con su propio sistema de inteligencia para el desarrollo de capacidades agroecológicas dirigidas a la producción di-

versificada y sustentable de café de calidad, el desarrollo empresarial y el rescate cultural.

Las preguntas de investigación al inicio de *Café In Red* tuvieron que ver con el modo de articular un grupo estratégico que promoviese los agroecosistemas cafetaleros en Veracruz (México). ¿Qué estrategia de planeación, seguimiento y evaluación permite vincular la investigación con las necesidades de los ciclos de producción del café? ¿Qué propuestas de conservación, producción y desarrollo local deben integrarse a las políticas públicas en cultura cafetalera?.

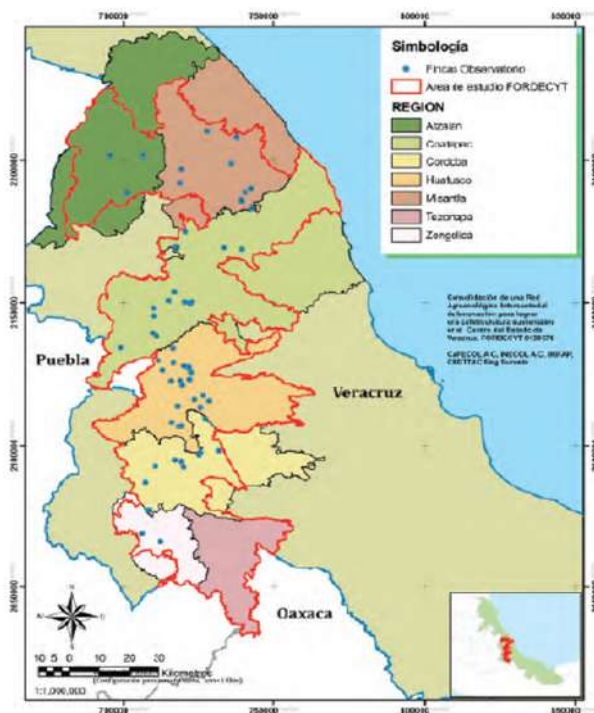


Figura 2. Fincas del observatorio cafetalero por región. Centro de Veracruz (México)

En los últimos años (2014-2016) no fue posible conseguir financiamiento para *Café In Red* y, como consecuencia de ello, se vivió un proceso de separación. Los productores centraron su atención en el ciclo productivo anual y probaron las mejores alternativas para combatir la roya¹¹, enfermedad que mermó los cafetales. Las instituciones del sector y sus representantes no tuvieron la capacidad de proponer medidas para limitar la enfermedad, abandonaron la idea de apoyar a las instituciones académicas y volvieron a las prácticas clientelares, lo que supuso el

apoyo a las organizaciones leales al partido político en el poder. Tampoco se logró el acuerdo para proponer la creación del tan “soñado” nuevo instituto mexicano del café.

¿Qué nos pasa a los grupos académicos cuando se terminan los financiamientos? Es bien sabido. Las redes dejan de funcionar y los proyectos vuelven a su modelo individual. No obstante, si el entusiasmo es grande los equipos continúan. El trabajo en red se multiplica a través de los resultados. En este sentido, las líneas estratégicas después del proyecto FORDECYT siguen adelante: el Sistema de Inteligencia mantiene la web (<http://www.cafeinred.org/>) que muestra los resultados y actualiza la información de los proyectos. En el área de Servicios Ambientales se desarrolla el proyecto titulado: *Ensayo Internacional de Variedades Multilocalidad de café* (2015-2020), apoyado por la organización *World Coffee Research* de la Universidad Texas A&M. Este proyecto está estableciendo parcelas con 35 variedades de café arábica en 19 países con el propósito de prevenir los impactos del cambio climático sobre la producción del grano a nivel mundial. El INECOL está coordinando el esfuerzo en México con dos parcelas en Veracruz y una en Chiapas (WCR, 2017, p.1). En el área de los Sistemas Agroforestales se mantienen varios proyectos que evalúan aquellas condiciones ambientales que podrían limitar la presencia de la roya mediante antagonistas naturales bajo la sombra de los árboles (Carrión *et al.*, p. 1). En el área de Cadenas de Valor se han dado continuidad a los servicios de evaluación y certificación de café de calidad, a través del Centro Agroecológico del Café A. C., CAFECOL (<http://www.cafecol.mx>). En el área de Desarrollo Empresarial se impulsa el Tour del Café, principalmente en Coatepec (<https://tourdelcafe.com.mx>). Y finalmente en el campo de la cultura cafetalera se mantiene la relación con CENACAFE y se publicaron cinco libros (Contreras, 2017, inédito).

Trabajo en red, un cambio de paradigma

He hablado de enfoque multidisciplinario porque los sistemas agroforestales de café son complejos y su abordaje requiere un cambio de paradigma que permita la cabal comprensión de sus elementos socioambientales. En este sentido, la Biomimesis y los agrosistemas cafetaleros tienen preguntas similares, lo que exige la inclusión de la mayoría de las disciplinas, distintos enfoques metodológicos y la integración de grupos diversos. Lo fundamental es ¿qué temas son de interés general? Si bien la biomimesis tiene un público amplio en el campo de las tecnologías, las ciencias etno, como los sistemas de café, exigen conocimientos de otras disciplinas para comprender su funcionamiento. Y, al mismo tiempo, no hay que olvidar el trabajo en equipo ya que aportará experiencias al quehacer individual de tal modo que se logre aproximar puntos de vista distantes. Como ya expliqué,

es con los actores sociales con quienes se realizan las intervenciones sociales para generar capacidades locales. Y todo ello respetando la autonomía de las organizaciones, en la medida en que se trata, en este tipo de iniciativas, de comprender los sistemas de conocimiento, la experiencia acumulada y los sueños de los participantes. La ruralidad, en las condiciones actuales, muestra serios daños que requieren de medidas de restauración, formas de trabajo que se ajusten a los procesos ecológicos y sociales, especialmente a nivel de sus condiciones materiales, dado que no sabemos cómo responderá el sistema. Para la red es imperativo entender los modos de vida de los actores sociales protagónicos, sus circunstancias y sus limitaciones. De esta forma, se está en las mejores condiciones para transmitir recomendaciones pertinentes que fomenten el entusiasmo y la esperanza en las medidas adoptadas. De hecho, uno de los propósitos del trabajo en red es ampliar las capacidades de grupo; esto significa que al lograr los objetivos generales se puedan integrar equipos que amplíen su experiencia, que atiendan aspectos externos de amplio alcance que condicionan las respuestas locales, (Figura 3).

Estrategias	N°	Temas de los subproyectos
SIGCAFE	1	Coordinación interinstitucional (secretariado)
	2	Planación, seguimiento y evaluación
	3	Gobernanza de la red
	4	Sistema de Información Geográfica para el centro de Veracruz
	5	Bases de datos: acceso a la información del sector cafetalero
	6	Propuestas de política pública
SACAF	7	Servicios ambientales (agua y polinización)
	8	Fertilidad de los suelos
	9	Nematodos y hongos asociados
	10	Manejo de plagas (Bt)ca
	11	Secuestro de carbono
AGROCAF	12	Sistemas agroforestales (café y alimentación)
	13	Diversificación productiva (bebidas, helados y orquídeas)
	14	Calidad de la madera
	15	Cadenas productivas en la transformación del café
CADECAF	16	Sistema de trazabilidad
	17	Valoración del café de calidad
	18	Comercialización de café
EMPRECAF	19	Diagnóstico empresarial y modelo de negocios
	20	Desarrollo tecnológico e innovación
	21	Apoyo a la cultura cafetalera
	22	Comunicación y participación social

Figura 3. Estrategias de *Café In Red* y temas de los subproyectos

La cooperación académica

Otro elemento del trabajo en red es compartir acuerdos en lo que respecta a la percepción del intelectual y su relación con la sociedad. Para Gramsci, el mundo es el escenario de la vida social, espacio en el que los seres humanos, con sus capacidades espirituales y sus energías naturales, actúan y crean su vida en sociedad.

Las fuerzas productivas de la sociedad son la inteligencia aplicada, el pensamiento organizado y la voluntad de crear y de cambiar en la realidad. Se trata de un proceso interno de división del trabajo: los intelectuales se vuelven ‘orgánicos’ al ocuparse del desarrollo de ciertos aspectos de la vida intelectual del grupo o clase. “Se puede observar –nos dice– que los intelectuales ‘orgánicos’ crean consigo mismo una nueva clase y elaboran en su desarrollo progresivo, ‘especializaciones’ de aspectos parciales de la actividad primitiva, del tipo social nuevo, que la nueva clase ha alumbrado.” (Gramsci, 1975, p. 1515).

Café In Red propuso, a través de seis líneas estratégicas, que la generación de información atendiera las exigencias institucionales, es decir, que los equipos de trabajo contemplaran productos valorados por los sistemas de evaluación académica, y que la cooperación en los equipos ayudara, a su vez, a la devolución de la información a los actores sociales que usan, transforman y diseñan los agroecosistemas. Es preciso tener en cuenta que los académicos y los productores tienen tiempos y necesidades diferentes para responder a preguntas semejantes. Por ejemplo, ¿cómo mejorar la fertilidad del suelo en un cafetal? Su respuesta será coherente en relación con su sistema de conocimiento, pero el diálogo permanente impactará en la percepción que ambos interlocutores poseen de los procesos que inciden en el suelo y los cafetales.

Otro componente que incide en las preguntas son las fuentes financieras que promueven las intervenciones sociales, ya sea en su planificación anual o sexenal, ya que, desafortunadamente, se dan pocas planeaciones de mediano y largo plazo. Tal circunstancia conlleva la falta de continuidad en los recursos económicos, generando incertidumbre en la relevancia de las preguntas, y, sobre todo, falsedad en la investigación (Contreras *et al.*, 2017, p. 18).

El modelo de planeación

En *Café In red* elegimos un modelo de planeación estratégica centrada en el seguimiento y la evaluación. También diseñamos una metodología para dirigir la implementación, organización y coordinación de las actividades, que permitiese medir el avance de los objetivos de la red y que ayudase en la medición de los impactos producidos por el quehacer del grupo. Existen diferentes herramientas que apoyan esta tarea: construir los canales de comunicación entre diferentes coordinadores, actores y regiones geográficas, alinear y coordinar múltiples tareas, revisar, evaluar y documentar los resultados e impactos anticipados, etc. En *Café In Red* el marco de planeación, seguimiento y evaluación lleva por título *Estándares Abiertos para la práctica de la conservación* y tiene la ventaja de que se apoya en un software para la gestión de proyectos (Miradi) (CMP, 2007, p. 1). El

ciclo de proyectos se integra en seis pasos, (figura 3): fase de conceptualización, en la que se describen los fundamentos del proyecto (cómo se pensó y se creó la idea, con qué recursos). Fase de planificación de acciones y monitoreo, en la que se diseñan las estrategias y acciones de producción, conservación, capacitación y vinculación desde las que se justifican los objetivos. Fase de implementación de acciones y monitoreo, en la que se ponen en marcha los planes de trabajo. Fase de análisis uso y adaptación de datos, en la que se revisan, corrigen y adaptan los resultados frente a los obstáculos enfrentados (a esta etapa también se le conoce como “seguimiento y evaluación”). Fase de captura y socialización del aprendizaje, que corresponde al proceso de ejecución o al final el ciclo del proyecto, en la que se comparte con las audiencias las lecciones aprendidas y los productos que se generaron. Finalmente, se da paso a las evaluaciones según el sistema elegido, esto es, auto-evaluación, evaluaciones externas y auditorías con las comunidades participantes (Contreras *et al.*, 2017, p. 35).

Las cadenas de resultados son diagramas que muestran afirmaciones causales que asocian los resultados a corto, mediano y largo plazo, con la construcción de supuestos basados en la hipótesis: “sí se hace esto... entonces” sucederá aquello. Esta serie de supuestos conforman la teoría de cambio (FOS, 2007, p. 8). El modelo conceptual y las cadenas de resultados hacen que los pasos intermedios y los resultados del trabajo sean claros para los integrantes de la red, los coordinadores y los evaluadores de la investigación (Margoluis *et al.*, 2009, p. 87). El modelo que se presenta es de Sistemas Agroforestales de *Café In Red* (Contreras *et al.*, 2017). Los esquemas son un instrumento gráfico que se elabora al inicio del trabajo en red, se ajusta conforme se ejecuta el proyecto y permite construir una memoria de los cambios que tuvo el grupo hasta alcanzar sus objetivos.



Figura 3. Ciclo de manejo de proyectos

La gestión de un proyecto en red

El equipo coordinador es responsable de compaginar las actividades de la red, realizar el seguimiento y su evaluación. También de convocar a los investigadores a elaborar las propuestas y presentar la solicitud de recursos financieros. Los investigadores identifican las afinidades para integrar sus equipos de trabajo en los subproyectos. Se acuerdan las responsabilidades y las formas de trabajo para llevar a cabo las tareas de coordinación e implementación del plan. Cada coordinador de estrategia (por ejemplo, en el caso de las Cadenas productivas de café), fue responsable de supervisar su equipo, dirigir las actividades correspondientes, así como de integrar la información sobre el desarrollo del proyecto y sus resultados y de la gestión financiera y la asignación de recursos humanos (figura 4). Por último, deben informar a los coordinadores sobre los contratiempos u obstáculos observados para resolverlos y mantener el rumbo de la investigación. La manera en que la coordinación realizó su labor fue a través de una reunión quincenal durante los dos años de duración del proyecto. La reunión tuvo agendas específicas de trabajo: con lista de asistencia, orden del día, asuntos generales, temas de trabajo y registro de acuerdos. En cada reunión se revisaron las actividades planeadas, los avances, la correcta asignación de recursos y el buen desempeño de cada grupo y estrategia. Asimismo, se revisaron las actividades del plan de trabajo, se programaron actividades para las próximas etapas y se tomaron decisiones consensuadas sobre la coordinación, organización de tareas, eventos y actividades de colaboración con otros actores sociales.

Los papeles en el trabajo en red

En general, la educación escolarizada desde los niveles iniciales hasta la formación superior tiene además del currículo explícito, un conjunto de normas, papeles y jerarquías que estructuran la vida de las instituciones. Este *corpus* de roles informales se denomina currículo oculto y generalmente se centra en la competencia, la autoridad y el orden vertical. Las redes, sin embargo, se organizan como estructuras colaborativas, horizontales y flexibles, de tal modo que, a través de la interacción, posibilitan otras relaciones y permiten la expresión creativa. Por ello, los coordinadores deben ser sensibles al trabajo grupal, que dominen técnicas de comunicación grupal y que sepan escuchar.

El trabajo grupal transita por diferentes ideas y, en este caso, dos preguntas que generan distintas posiciones en un proyecto en red son ¿cómo debe incidir la investigación en los problemas sociales? y ¿cómo medir el impacto del trabajo de la red?

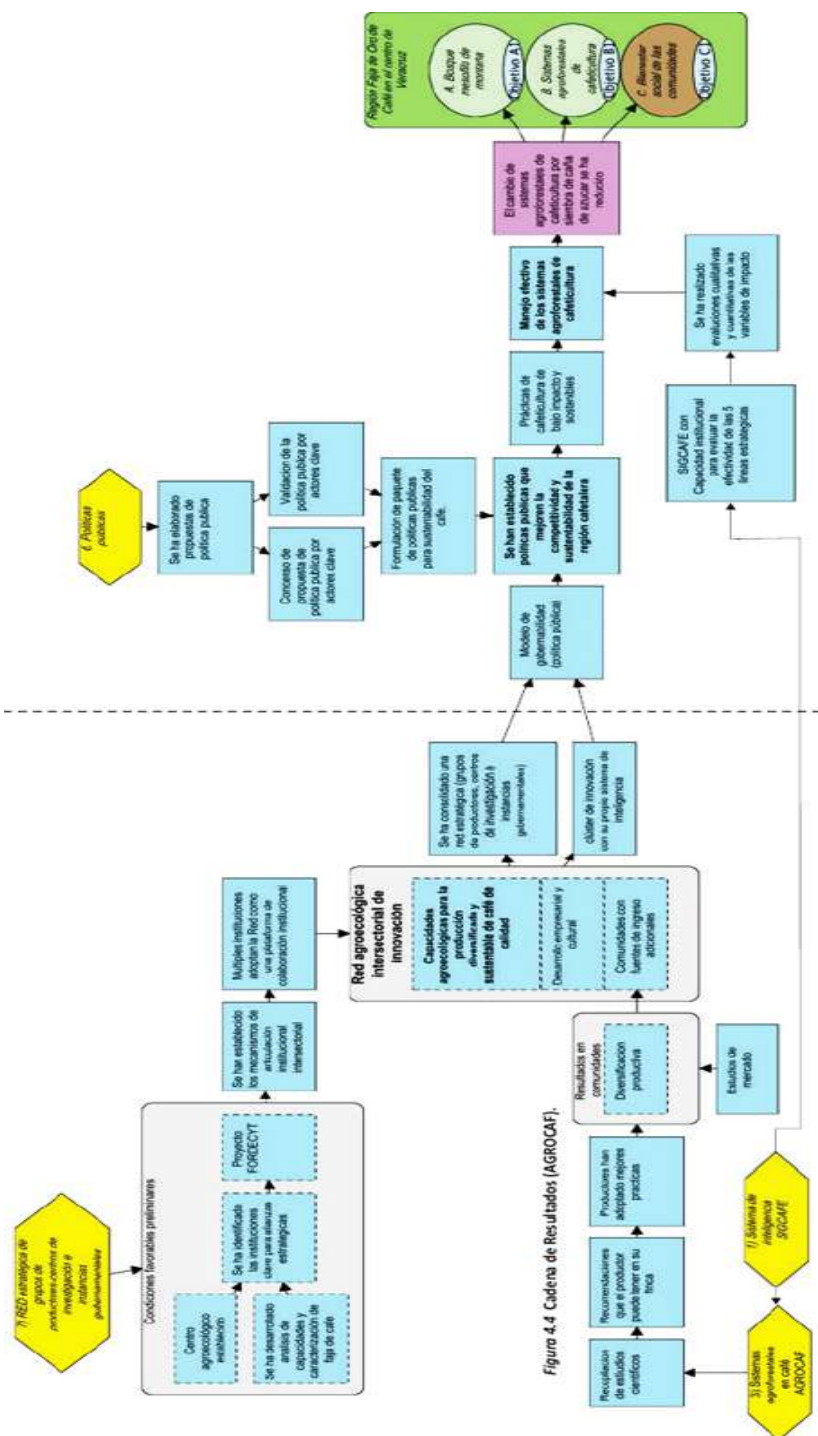


Figura 4. Cadena de resultados de la estrategia Agroecosistemas Cafetaleros

Colaborar en red facilita la vinculación con los actores sociales. Por eso es deseable que los actores sociales acompañen el proceso de investigación, es decir, que corroboren que sus demandas están siendo atendidas, que en las soluciones se tomen en cuenta sus condiciones de vida, sus aspiraciones y sus sueños. En este sentido, el trabajo en red contribuye a generar propuestas que los actores protagónicos pueden implementar con la asesoría de los académicos. En el caso de que este trabajo se refuerce con otros actores sensibles, como los funcionarios públicos, empresarios y otras fuentes financieras, se puede esperar que las recomendaciones tengan una aplicación adicional a la propia investigación. La educación popular y los instrumentos electrónicos facilitan la participación de los actores sociales, la identificación de preguntas, la elaboración de los diagnósticos, el apoyo en la realización de experimentos, ensayos, expediciones, inventarios, colectas y las formas de conocimiento que pueden estar presentes en el proceso participativo. Por supuesto, hay actividades propias del quehacer de los productores en el campo de las que se puede aprender, ya que viven en ambientes que le son familiares, realizan labores productivas con base en la observación y registro de los ciclos naturales. Porque haciendo uso de otras formas de conocimiento (tradicional, popular, vivencial y espiritual) conocen, manejan e interpretan su entorno y deciden cómo interaccionar con los sistemas naturales y sociales. En *Café In Red* ahora tenemos mayor claridad de los eslabones, las redes y las alianzas de la cadena de valor. Es por ello que será necesario continuar con las actividades que mantienen los vínculos entre aliados. Aunque falta mucho trabajo para eliminar las prácticas oportunistas de quienes acopian café y mezclan diferentes identidades de café, es indispensable que las empresas que venden abonos químicos fundamenten con estudios detallados sus recomendaciones y no solamente a través de fórmulas económicamente rentables (que no tienen impacto o poco contribuyen en la producción). Mantener y actualizar las capacidades técnicas será otro asunto estratégico para desarrollar la producción agroecológica del café de sombra (Contreras *et al.*, 2017, p. 95).

Conclusiones y recomendaciones

- En *Café In Red* aprendimos a desarrollar capacidades locales bajo un modo cooperativo. Entendimos que, a pesar de las limitaciones de la pobreza, los colectivos sociales son capaces de actuar, pueden obtener beneficios en el corto plazo, y que, a través de los años, pueden llevar a cabo cambios de largo alcance.
- La integración de una red es un esfuerzo colectivo que ayuda a conocer otras percepciones, supone descubrir afinidades, pero también exige tolerancia y

compromiso para aceptar las diferencias. Este aspecto debe extenderse a los equipos, las instituciones y a las preferencias temáticas.

- El estudio de los sistemas agroforestales y la biomímesis es una gran tarea. En ella debemos elegir temas articuladores que permitan sumar proyectos (liderazgos, experiencia y resultados), compartir enfoques y posponer intereses que pueden estar al alcance, los recursos económicos y las capacidades del grupo.
- Otra forma simple de describir el trabajo en red es como un servicio a la colectividad, y ello exige disciplina. Supone, en cierta medida, tener disposición para cambiar de papeles (productores, académicos y funcionarios), de tal manera que ayuden a dinamizar el trabajo del colectivo.

NOTAS

¹ Distintas lenguas, diversas filiaciones educativas y múltiples prácticas con la naturaleza.

² Rufino Tamayo, pintor mexicano (1899-1991) del siglo XX. Participó en el importante movimiento muralista que floreció en el período comprendido entre las dos guerras mundiales. Se caracteriza por su voluntad de integrar plásticamente en sus obras la herencia precolombina autóctona. <http://museotamayo.org>.

³ Francisco Toledo (1940) pintor mexicano del siglo XX. Zapoteco, hombre sencillo, callado, retraído, de vestir ligero con ropa típica de manta y algodón, huaraches, cabello largo ondulado, la vista fija hacia un mundo mágico que sólo él conoce y se reserva para expresarlo en cada uno de sus cuadros. Participó, siendo un luchador social, en la Coalición Obrera Campesina Estudiantil del Istmo (COCEI) durante 1974. <http://www.inverarte.com/franciscotoledo.html>.

⁴ Sebastián Salgado pertenece a la tradición de la fotografía social. Destaca en su obra la documentación del trabajo de personas de diferentes países en situación de pobreza. En la introducción a *Éxodos* dice: “Más que nunca, siento que solo hay una raza humana. Más allá de las diferencias de color, de lenguaje, de cultura y posibilidades, los sentimientos y reacciones de cada individuo son idénticos”. Testigo excepcional del horror y la belleza del mundo contemporáneo, ocupa el lugar del retratado en el documental *La sal de la tierra*, dirigido conjuntamente con Wim Wenders y Julioano Ribeiro Salgado.

<http://biografiadefotografos.blogspot.mx/2014/10/sebastiao-salgado.html>.

http://www.milenio.com/cultura/Sebastiao_Salgado-La_sal_de_la_tierra_0_403759630.html.

⁵ En una imagen Pablo Genovés imagina el mar entrando en la Gran Galería del Louvre, una referencia directa de los sueños sublimes de Hubert Robert. Es su pasión por la arquitectura europea lo que hace que este espectáculo de terror sea tan distintivo. El poder de estos fotomontajes está en la colisión de la grandeza cultural atemporal con la destrucción natural abrumadora. Las imágenes son inquietantes: los libros y el arte, la memoria y la historia están a punto de perderse. <http://www.pablogenovés.com>.

⁶ Se utilizará el término de posmodernidad para señalar las bases del capitalismo, es decir, los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas y uranio), la ciencia, la tecnología y la industria. Los primeros científicos surgieron hace apenas 300 años. En la actualidad, resulta interesante que en muchos países, incluido México, todavía hay un conocimiento tradicional previo a la ciencia que tenemos la oportunidad de observar o explorar. Un conocimiento válido, útil, eficaz y pertinente desde la época premoderna.

⁷ El capitalismo salvaje es el lucro en sí mismo, que da nacimiento a una nueva categoría: el *homo economicus*. Es un extremismo que implica la responsabilidad fiduciaria de maximizar los intereses

de los accionistas y, en consecuencia, minimizar los costos. Esta lógica genera un problema relacionado con las externalidades laborales, sociales y ambientales que, sin duda, afectan a la democracia y a la transparencia. Las externalidades se generan de forma constante y se profundizan, provocan efectos acumulativos que los estados no solucionan y, además, generan la falsa expectativa de que sea el sector público el que las resuelva. Boff L. (1977). *Pasión de Cristo, pasión del mundo. Hechos interpretaciones y significado. Ayer y hoy*. Santander: Sal Terrae.

⁸ Se habla de grupos originarios por su relación con la tierra y con su entorno natural. En ese sentido, a la hora de reconocer el control social sobre los bienes comunes, tanto los de la naturaleza como los del conocimiento, son fundamentales las propuestas de los pueblos originarios, que incluyen conceptos y enfoques sobre la Madre Tierra. Es importante, pues, impulsar la reproducción, recuperación y reformulación de estas perspectivas en los espacios urbanos ocupados por los migrantes y afectados también por el “desarrollo” de la polución y la marginalidad urbanas (ALAI, 2009). En especial, la relación con el maíz, lo que ha conformado no solo un mecanismo de alimentación y sustento, sino también un fuerte saber cultural. En el caso de México, se considera elemental el impulso de la producción de maíz por parte del estado, tanto para fortalecer la soberanía alimentaria como para hacer efectivo el derecho a la alimentación con un producto clave en la cultura alimentaria mexicana (Ávila & Vázquez, 2012).

⁹ Se define al campesinado como una entidad social con cuatro facetas esenciales e interrelacionadas: la explotación agrícola familiar como unidad básica multifuncional de organización social, la labranza de la tierra y la cría de ganado como el principal medio de vida, una cultura tradicional específica íntimamente ligada a la forma de vida de pequeñas comunidades rurales y la subordinación a la dirección de poderosos agentes externos (Shanin, 1976).

¹⁰ La milpa es un sistema de cultivo que tiene como estrategia la conservación de la agrobiodiversidad y el uso sostenible basado en el conocimiento de los agroecosistemas tradicionales y los métodos culturales que mantienen la diversidad y mejoran el uso de la biotecnología. El sistema milpa es una fuente de recursos alimentarios ya que además del maíz, cultivo principal, también se cultivan otras plantas como frijol, calabaza, chile, etc., al mismo tiempo que se toleran y promueven otras especies silvestres de gran importancia alimentaria (*quelites*), dependiendo de su relación con los ecosistemas locales. En México es frecuente que la milpa esté presente con otros sistemas agroforestales de manejo intensivo (café, caña y ganadería) para promover la producción integral de bienes y servicios ambientales, así como para evitar la devastación de áreas destinadas a producción de maíz en monocultivo.

¹¹ La roya del café es una enfermedad fúngica (*Hemileia vastatrix*) que afecta a los arbustos de café del género *Coffea*, en especial el cultivo de la especie arábica. El hongo ataca las hojas y provoca defoliaciones y, por ello, causa la muerte de las ramas, limitando la cantidad y la calidad intrínseca de los granos de café.

BIBLIOGRAFÍA

- ALAI (2009). La agonía de un mito. ¿Cómo reformular el desarrollo? *Agencia Latinoamericana de Información*, 445.
- ÁVILA A., & VÁZQUEZ, L. D. (2012). *Patrimonio biocultural, saberes y derechos de los Pueblos originarios*. Chiapas: Universidad Intercultural de Chiapas
- BENYUS, J. (1997). *Biomimicry: innovation inspired by nature*. New York: William Morrow and Company.
- BERTALANFFY, L. V. (1989). *Teoría general de los sistemas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- BOFF, L. (1977). *Pasión de Cristo, pasión del mundo. Hechos interpretaciones y significado. Ayer y hoy*. Santander: Sal Terrae.
- BRUNDTLAND, G. H. (1987). *Our Common Future*. Report of the World Commission on Environment and Development (United Nations), New York.
- CAFECOL (2017, 1 de Octubre). *Centro Agroecológico del Café*. Obtenido de <http://www.cafecol.mx>.
- CARRIÓN, G., VILLAIN, L., LÓPEZ, D. (2016). *Desarrollo de nuevos métodos de control para el manejo integrado de roya y nematodos*. CENACAFE-INECOL 2241, Veracruz.
- CMP (Conservation Measures Partnership). (2017). *Estándares Abiertos*. Obtenido de <https://www.miradi.org/>.
- COLLADO, J. (2016). Una perspectiva transdisciplinar y biomimética de la educación para la ciudadanía mundial. *Educere*, (20) 65, 113-129.
- CONTRERAS, A. (2013). *Rumbos de la cafecultura sustentable*. Veracruz: Instituto de Ecología A. C. & Café In Red.
- CONTRERAS, A. (2017). *Innovación y transferencia de tecnología con productores y organizaciones de la región central del estado de Veracruz*. Informe final del proyecto de investigación. CENACAFE-INECOL, Veracruz.
- CONTRERAS, A., ORTEGA-ARGUETA, A., ALLEN-AMESCUA, A. G. (2017). *Investigación-acción participativa para la sustentabilidad: el caso de Café In Red, Veracruz*. Veracruz: Instituto de Ecología A. C., Café In Red.
- CÓRDOVA, A. (2014, 1 de Octubre). Antonio Gramsci: la cultura y los intelectuales. *La Jornada Semanal*. Obtenido de <http://www.jornada.unam.mx/2014/01/19/sem-arnaldo.html>.
- FEM (Fundación Ellen MacArthur). (2017). *Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada*. Obtenido de <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/delivering-the-circular->
- FOS (Foundations of Success). 2007. *Using results chains to improve strategy effectiveness. An FOS how-to guide*. Foundation of Success, Bethesda, Maryland, USA.
- GALEANO, E. (1971). *Las venas abiertas de América Latina*. Madrid: Siglo Veintiuno Editores.
- GIDDINGS, B., HOPWOOD, B., & O'BRIEN, G. (2002). Environment, economy and society: Fitting them together into sustainable development. *Sustainable Development*, 10, 187-196.
- GUSCAGLIA, E. (2015, 11 de Noviembre). *Latinoamérica tendrá que caminar hacia una arquitectura supranacional*. Obtenido de <https://aristeginoticias.com>.
- HOLLING, C. S. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 4, 1-23.

- INVERARTE. *Francisco Toledo*. Obtenido de <http://www.inverarte.com/franciscotoledo.html>.
- MANSON, R. V., GALLINA, S. & MEHLTRETER, K. (2008). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*. Instituto de Ecología A.C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México.
- MARGOLUIS, R., STEM, C., SALAFSKY, N., BROWN, M. 2009. Design alternatives for evaluating the impact of conservation proyec, en M. Birnbaum y P. Mickwitz, (ed.). *Enviromental program and policy evaluating: adressing metodological challenges*. New Direction for Evaluation 122: 85-96.
- MORANDÍN, I., & CONTRERAS, A. (2017). Sustentabilidad: ética, complejidad y transdisciplina. En A Azamar, A., Escobar, D. A., & Peniche, S. (Eds.), *Perspectivas de la economía ecológica en el nuevo siglo* (pp. 27-45). México: Universidad de Guadalajara.
- MORENO, Y., CONTRERAS, A., & OSORIO, M. L. (2017). *Aprendizajes significativos en el cafetal*. Veracruz: Instituto de Ecología A. C. y CENACAFE.
- MORIN, E., ROGEL, E., & DOMINGO, R. (2002). *Educación en la era planetaria*. Salamanca: Universidad de Valladolid.
- RUFINO TAMAYO, M. (2017, 1 de Octubre). Obtenido de <http://museotamayo.org>.
- GENOVÉS, P. (2017, 1 de Octubre). Obtenido de <http://www.pablogenovés.com>.
- SALGADO, S (2017, 1 de Octubre) Obtenido de <http://biografiadefotografos.blogspot.mx/2014/10/sebastiao-salgado.html>.
- SALGADO, S. *La sal de la Tierra*. Obtenido de http://www.milenio.com/cultura/Sebastiao_Salgado_La_sal_de_la_tierra_0_403759630.html.
- SHANIN, T. (1976). *Naturaleza y lógica de la economía campesina*. Barcelona: Editorial Anagrama.
- SIERRA, C. H. & BERNAL, H. (coord.). (2017). *Biomímesis: inspiración creativa en la naturaleza y escenarios potenciales de sostenibilidad*. Memorias del Simposio Internacional de Estudios Biomiméticos (Leticia-Amazonas, 27-29 de abril de 2016). Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).
- TOLEDO, V. M., ALARCÓN-CHAIRES, P., MOGUEL, P., OLIVO, M., CABRERA, A., LEYEQUIEN, E., & RODRÍGUEZ-ALDABE, A. (2001). El Atlas Etnoecológico de México y Centroamérica: Fundamentos, Métodos y Resultados. *Etnoecológica*, Vol. 6 (8), 7-41.
- TOUR DEL CAFÉ. (<https://tourdelcafe.com.mx>). Consultado el 1 de octubre de 2017.
- VERNADSKI, I. (1997). *La biosfera*. Madrid: Fundación Argentaria.
- WCR (2017, 1 de octubre). World Coffee Research. Obtenido de <https://worldcoffeeresearch.org/about/>.
- WEBER, M. (1919). *La política como vocación*. Documento preparado por el Programa de Redes Informáticas y productivas de la Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM). Obtenido de <http://www.bibliotecabásica.com.ar>.
- YUCUNA, W. (2017). La naturaleza y la medicina tradicional desde la cosmovisión indígena amazónica. En Sierra C. H & Bernal, H. (Coord.), *Biomímesis: inspiración creativa en la naturaleza y escenarios potenciales de sostenibilidad* (pp. 11-21). Memorias del Simposio Internacional de Estudios Biomiméticos. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

La emergencia de la economía biomimética

Roberto Bermejo

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV / EHU)

En este texto describo de forma sintética las transformaciones sistémicas (y absolutamente imprescindibles) derivadas de aplicar el enfoque biomimético a la economía (una nueva estrategia centrada en la aplicación de los principios funcionales de los ecosistemas y de la vida mediante parámetros fractales). También, realizo un análisis de las iniciativas biomiméticas emergentes, en la medida en que empiezan a crear economías comunales y sostenibles en muchas partes del mundo y que se presentan como la alternativa a la economía y civilización capitalistas.

Los fisiócratas (que crearon la primera escuela económica) defendían un modelo económico sostenible, pero su enfoque fue rechazado por la mayoría de los economistas clásicos. A pesar de ello, en el siglo XX empezó un goteo de autores que veían con creciente nitidez la necesidad de que la economía se inspirara en la ecología. Marshall (reconocido como el sintetizador del discurso económico neoclásico) considera que la ecología es la ciencia que presenta el paradigma más apropiado para la economía (Carpintero, 2006, p. 217). En la segunda mitad del siglo pasado, Georgescu-Roegen (bioeconomía), K. Boulding (economía de nave espacial), H. Daly (economía del estado estacionario), E. F. Schumacher (descentralización y sostenibilidad) y otros pusieron las bases de la economía sostenible (Carpintero, 2006, p. 213; UNEP, 2015, p. 9). Hoy en día, muchos economistas interpretan el sistema económico humano como un subsistema del de la biosfera. H. Daly (2015, p. 8) afirma que “nuestra visión y políticas deberían basarse en un enfoque integrado de la economía como un subsistema de la ecosfera, que es finita y no crece”. T. Jackson & P. A. Victor declaran que “las economías son subsistemas de la biosfera, mediatizadas por los valores e instituciones de las sociedades” (2016, p. 4). R. Costanza y un elevado número de autores esperan que en el futuro un paradigma “inspirado en la naturaleza como mentora (holística, integrada y flexible)” reemplace “la visión de la mecánica newtoniana”, adoptada por los neoclásicos (Costanza *et al.*, 2012, p. 19). Esta economía se basa en “la aceptación de la profunda interdependencia de los humanos con el resto de la naturaleza” (Costanza *et al.*, 2013, p. 6).

Principios funcionales de los ecosistemas

La vida se organiza en ecosistemas que contienen partes biológicas (bióticas) y no biológicas (abióticas), además de poseer límites espaciales. Para S. E. Jorgensen *et al.*, “los ecosistemas son unidades de estudio conceptuales y funcionales formadas por comunidades ecológicas con su ambiente abiótico” (2008, p. 80). Los ecosistemas constituyen la unidad más pequeña con capacidad para auto-mantenerse (Abel & Stepp, 2003, p. 3). Un ecosistema es una unidad funcional que comprende una comunidad ecológica y su entorno, e interactúa con el ambiente abiótico obteniendo sobre todo energía, agua y nutrientes, además de espacio físico en el que asienta (Jorgensen *et al.*, 2008, pp. 79-82).

Al formar parte los seres humanos de la naturaleza, la sostenibilidad de nuestra economía está determinada por el cumplimiento de los principios funcionales de los ecosistemas. En ecología se suele considerar como punto de partida los 24 principios definidos por E. P. Odum. Y, aunque los ecólogos elijen grupos variables de principios, ello no supone desacuerdo, sino preferencias personales al describir de forma sintética cómo funcionan los ecosistemas, puesto que constituyen realidades muy complejas. Pero normalmente se sintetizan en un margen de 6 a 10 principios. En las siguientes páginas presento 9 principios porque considero que son los que permiten un mejor contraste entre los ecosistemas y el sistema económico actual (Nielsen & Muller, 2009).

Complejidad. Un sistema no es complejo porque tenga muchos elementos, sino por las fuertes interacciones no lineales entre ellos. Existe la auto-organización, las partes son interdependientes, se encuentran lejos del equilibrio, etc. (WEF, 2013: 7). Esa es la diferencia entre un sistema complejo y complicado. Según R. Costanza (1993) un sistema complejo se caracteriza por: “(1) fuertes (normalmente no lineales) interacciones entre las partes; (2) lazos complejos de retroalimentación que hacen difícil distinguir entre causas y efectos; (3) significativas diferencias en escalas temporales y espaciales, discontinuidades, umbrales y límites; (4) todo lo cual imposibilita el enfoque de agregar partes o comportamientos a escala pequeña para llegar a conclusiones a gran escala”. Además, el sistema tiene la capacidad de auto-organizarse y generar emergencia: la aparición de propiedades nuevas en una estructura organizada o sistema, concretamente en los niveles más altos de la estructura como consecuencia de determinadas relaciones e interacciones producidas en el nuevo ensamblaje de los componentes menores. Y las propiedades nuevas no existen en los componentes. De ahí la validez de la afirmación de que el todo es más que la suma de las partes: “El comportamiento emergente de la totalidad no puede ser deducido del de los agentes individuales del sistema: la totalidad es más que la suma de las partes” (WEF, 2013, pp. 3-4).

La manifestación más importante de la emergencia es la aparición de la vida, pese a que no está claro cómo algo material puede dar lugar a la vida y a la aparición de la inteligencia en los niveles superiores. La emergencia no sólo aparece a escala de las personas sino que también se manifiesta, por ejemplo, en colonias de insectos. Generalmente, se acepta que la emergencia es un fenómeno de abajo a arriba, por lo que genera causalidad hacia arriba (Capra & Luisi, 2014, pp. 144-157).

La cantidad de compartimentos de los sistemas naturales es algo mayor que la de la economía capitalista. No obstante, los flujos naturales sólo constituyen una minoría de todos los posibles, mientras que los flujos de la economía mundial se acercan al 100% del potencial. Además, hay que indicar que, a medida que avanza la globalización aumentan los flujos internacionales, lo que refuerza la complejidad. Y, como la mayor parte de los ecosistemas son extremadamente complejos, sus comportamientos son, a su vez, muy difíciles de prever. Sin embargo, los sistemas socioeconómicos (SSE) son mucho más complejos debido a que los primeros (los ecosistemas) se rigen por variables objetivas (físico-químicas), mientras que los sistemas socioeconómicos (SSE) por variables subjetivas (Nielsen & Muller, 2009, p. 1916; WEF, 2013, p. 7; Matutinovic, 2008, p. 202). Pero son poco flexibles por el dominio del pensamiento lineal (sobre todo, en el caso de los gobernantes), lo que se traduce en la presunción de que, analizando las partes de un sistema, podemos conocer su funcionamiento. No se tiene en cuenta, por lo tanto, los procesos de retroalimentación entre las partes, ni el fenómeno de la emergencia. Estos procesos pueden ser positivos o negativos, pero son más frecuentes los negativos (expresados en crisis económicas, impactos de huracanes o terremotos y fenómenos políticos como la primavera árabe o la emergencia de gobiernos populistas). Así que estamos en un mundo hiperconectado donde las sociedades no están preparadas para hacer frente al fenómeno de la emergencia, ya que ostentan un nivel muy bajo de resiliencia (WEF, 2013, pp. 4-6).

Apertura y disipación. La comunidad biótica está interactuando continuamente con el medio abiótico adquiriendo energía, nutrientes, agua (mediante la lluvia) y espacio físico. Al mismo tiempo, la comunidad biótica emite al medio abiótico activa y pasivamente esos elementos mediante la evaporación y transpiración (agua y energía), excreciones y biomasa muerta (Jorgensen *et al*, 2008, p. 81). Además, un ecosistema recibe pequeñas cantidades de materia. Los bosques de zonas templadas pierden nutrientes al ser arrastrados por la lluvia (principalmente en invierno), pero también pueden recibir aportaciones de biomasa por emigraciones periódicas de especies (salmones, p. e.) o por integración de nuevas especies. Por último, la biosfera es abierta en energía y prácticamente cerrada en materiales. La única excepción es la aportación de meteoros (Jorgensen, 2008, p. 249; Nielsen

& Muller, 2009, p. 1915). Los ecosistemas captan la energía del sol, la degradan hasta que no tiene capacidad de generar trabajo y la disipan, de tal modo que los nutrientes son reciclados casi al 100%, porque los ciclos de los materiales “son locales y descentralizados”. Por el contrario, la economía capitalista se creó con base en el uso de combustibles fósiles y aún hoy tienen una cuota del 80% de la energía. Tengamos en cuenta que el metabolismo de materiales abióticos a escala mundial es básicamente lineal. Con todo, resulta positivo el desarrollo rápido de las energías renovables y del hidrógeno como combustible y almacenador de energía (Nielsen & Muller, 2009, p. 1920).

Diversidad. La diversidad “debe ser interpretada como la existencia de diversos y viables modelos de auto-organización con distintos subsistemas de conocimiento coordinados” (Schütz, 1999, p. 25). La naturaleza ha venido incrementando su diversidad a lo largo de unos 3.500 millones de años, a pesar de las cinco grandes extinciones que ha sufrido debido a factores exógenos. Los ecosistemas tienden a formar nuevos sistemas sobre los existentes, “añadiendo nuevos organismos sobre los ya existentes” y generando, así, “una evolución hacia un sistema de alta diversidad” (Nielsen & Muller, 2009, p. 1917). En ese sentido, la diversidad es esencial en el proceso de llenado de los nichos y en desarrollar sistemas saludables (Goerner, 2013, p. 412). Así que existe una tendencia general en la naturaleza a aumentar la “heterogeneidad y todas las dimensiones espaciales son explotadas ampliamente para hacerlo” (Nielsen & Muller, 2009, p. 1922). Por el contrario, “la globalización significa homogeneización” del mundo (Waltz, 1999, p. 694). Las grandes corporaciones imponen sus productos y servicios a la población, destruyendo la diversidad y las economías locales y regionales al especializarlas e integrarlas “en una estructura mundial”. Esta circunstancia reduce la diversidad y el sistema se vuelve frágil (Laszlo, 2013, p. 62-63). Así que “los dos tipos de sistemas (el natural y los SSE) tienden a moverse en direcciones opuestas” (Nielsen, 2007, p. 15).

Conectividad. La conectividad determina que “todo está conectado con todo”, así que un impacto directo sobre un componente del ecosistema tendrá un efecto indirecto en cualquier parte (Nielsen, 2007, p. 7). Un sistema puede estar representado por redes de nodos (vértice, compartimentos, componentes, etc.) y por las conexiones que se producen entre ellos. Un ecosistema puede tener millones de compartimentos, aunque el número de ellos cambia durante el ciclo adaptativo. Las redes comprenden un conjunto de agentes que se interrelacionan, dando lugar a una estructura reticular específica. La conectividad de un sistema se mide por los flujos en cada nodo. En esta estructura cada organismo funciona en escalas espaciales y temporales diferentes. La cadena trófica comprende las interconexiones

principales en la estructura de un ecosistema y constituye la base de la conectividad. Los compartimentos están conectados por numerosas sendas, pero ellas se dan en un número mucho más reducido a las que potencialmente se pueden dar: un 20-40% de todas las conexiones posibles. Las conexiones (flujos) pueden ser directas o indirectas, pero las primeras tienden a ser dominantes (Nielsen, 2007, pp. 9-10; Zorach & Ulanowicz, 2003, p. 69).

Una conectividad alta indica que el sistema se auto-controla y una baja supone que el sistema está a merced de agentes exteriores. Pero, al crecer la cantidad y fortaleza de las conexiones, se puede traspasar un umbral que lo convierte en rígido y por ello vulnerable. Eso es lo que le acontece con el sistema económico capitalista porque está “hiperconectado” (WEF, 2014). E. Laszlo coincide con esta conclusión, al afirmar que el sistema mundial está excesivamente integrado y poco diferenciado, es decir, “sobre-conectado”. Esto nos lleva a la conclusión de que debe ser restablecido el equilibrio entre integración y diversificación (2013, p. 62).

Jerarquía. La jerarquía de la naturaleza se caracteriza por ser auto-organizada, embebida e incluyente. Cada especie realiza una función, pero hay funciones más importantes que otras, lo que determina las jerarquías. Cuando el ecosistema es maduro y estable predomina la jerarquía escalar. Sin embargo, en caso de colapso, las especies colonizadoras realizan una función indispensable en pos de la recuperación. Y no olvidemos tampoco que las plantas, al captar energía, realizan también una función imprescindible. Así que existen múltiples tipos de jerarquías, por lo que es difícil determinar quién controla a quién (Nielsen, 2011, p. 32). Por ello “los sistemas naturales son gobernados básicamente por las demandas objetivas y los requerimientos de la funcionalidad” (Nielsen & Muller, 2009, p. 1919). La jerarquía en las sociedades humanas actuales no está predeterminada por demandas objetivas, sino por requerimientos subjetivos, predominando la jerarquía de poder y de riqueza. Desde este punto de vista, estos sistemas “representan jerarquías antinaturales” (Raye, 2012). Pero el dominio de la cooperación obliga a sustituir la jerarquía de control y privilegio por múltiples jerarquías de servicio (Costanza *et al.*, 2013, pp. 6-10).

Descentralización-autosuficiencia. R. V. O'Neill *et al.* (1986) definen un ecosistema como la unidad más pequeña que puede persistir en aislamiento con su ambiente abiótico. Odum & Sarmiento (1997, p. 46) lo explican con más detalle: Es el nivel más bajo que “tiene todos los componentes necesarios para funcionar y sobrevivir a largo plazo”. También es la unidad más pequeña capaz de reciclar sus nutrientes. Los ecosistemas maduros constituyen unidades descentralizadas y poseen límites que les diferencian de otros. Esto es debido al cambio de las condiciones ambientales o de la auto-organización del sistema mismo (por ejemplo,

la estructura de los bosques, que se asemeja a un mosaico). Los límites espaciales favorecen el incremento de la eficiencia interna del sistema, constituyendo así un límite natural al crecimiento. Se considera que las escalas son incluyentes, permitiendo la existencia local “de múltiples ontologías” (Nielsen, 2011, p. 45). En los ecosistemas los ciclos de los materiales “son locales y descentralizados” (Nielsen & Muller, 2009, p. 1920).

Por el contrario, la globalización destruye la diversidad y, con ello, los elementos de auto-suficiencia de las economías locales. Esta situación desemboca en una dependencia creciente del sistema económico mundial (Bonaiuti, 2014, p. 8). Pero la satisfacción de las necesidades esenciales y la organización fractal nos obligan a crear economías descentralizadas y con altos grados de auto-suficiencia que, por integración, lleven a generar otras más grandes y similares, hasta ser capaces de alcanzar una escala que permita la autosuficiencia plena. Además de la diversidad de economías, existen otros tipos de diversidades: de aptitudes, formación y experiencia vital, de oportunidades de educación, recreación, de desarrollo de los intereses particulares, de sociedades (con sus culturas, recursos, clima etc.), etc. La diversidad, en última instancia, refuerza las sociedades y les aporta seguridad (Magdoff, 2011, p. 13).

Competencia v. mutualismo. Existen seis tipos de interacciones principales entre dos o más especies y que van de la competencia al mutualismo. La competencia supone que el resultado de la interacción es negativo para, al menos, una de las especies involucradas y se produce por el control de los recursos. En este contexto, son ganadoras las especies que usan los recursos de forma más eficiente, aumentando así la eficiencia sistémica (Jorgensen & Nielsen, 2013, p. 64). Pero la especie perdedora no es eliminada: “La competición nunca resultará en una completa erradicación de una forma específica de vida”. Las especies ultra-sociales (hormigas, termitas, abejas, etc.) ocupan gran parte del territorio de los insectos, obligando a los otros a vivir en espacios más reducidos. Si las especies más débiles se extinguieran, los ecosistemas perderían biodiversidad y aumentaría su vulnerabilidad (Gowdy & Krall, 2014, p. 181). El mutualismo es una relación imprescindible para la supervivencia de las especies involucradas y se manifiesta como una característica sistémica. Las especies que interactúan en una red tienen “una relación sinérgica entre ellos, lo que permite aumentar la eficiencia en el uso de energía y materia e información”. Y estas relaciones mutualistas aparecen también (como es lógico) a escala de los ecosistemas, entre los ecosistemas que forman un paisaje o en la biosfera (Jorgensen & Nielsen, 2013, p. 48). K. A. Peacock afirma que “es posible pensar en los ecosistemas como simbiomas mutualistas” (2011, p. 227). Ello determina “que la naturaleza sea un lugar que favorece la vida” (Jorgensen *et al.*, 2008, p. 95).

En las sociedades se utiliza el término de cooperación, en vez del de mutualismo, a pesar de que éste es el término más adecuado porque la supervivencia de la humanidad está en peligro. Todas las conferencias mundiales sobre desarrollo sostenible y muchas de las cumbres de estados industrializados (G-8, G-20, etc.) han insistido en la necesidad de cooperar para resolver los problemas que aquejan a la humanidad. Sin embargo, la competencia impera en los mercados y en las relaciones entre las potencias: “Para los economistas neoclásicos, los sistemas social y económico se caracterizan por la presencia exclusiva de formas de comportamiento competitivas” (Bonaiuti, 2014, p. 11). Pero “hay algo desesperadamente inmaduro en la competición, lucha y acaparamiento que llega hasta las más altas instancias de las sociedades”. Y, como estamos en una situación de peligro de colapso planetario, “la enemistad es mucho más costosa en todos los aspectos que una colaboración amistosa”, porque reduce los costes de la innovación (Sahtouris, 2014, pp. 3-6).

Auto-organización. E. Odum (1992, 15) afirma que “auto-sustentado y auto-mantenido son las palabras clave que caracterizan el paisaje natural”. Se considera que las escalas son incluyentes, permitiendo la existencia local “de múltiples ontologías” (Nielsen, 2011, p. 45). Los sistemas vivientes se auto-organizan y en su co-evolución con su entorno generan la emergencia de propiedades nuevas, tal como hemos visto en el sub-apartado correspondiente a la complejidad (Capra & Luisi, 2014, p. 144).

Pero hay situaciones en las que los ecosistemas colapsan, aunque normalmente se recuperan mediante un ciclo adaptativo. La teoría que explica este proceso fue diseñada por C.S. Holling a finales del siglo pasado. Explica las fases de reorganización por las que normalmente pasa un ecosistema después de colapsar. Las causas son (en el caso de un bosque) cambios intensos de su entorno (sequía, fuego, plagas, etc.), rigidez (debido a un exceso de conectividad) o una combinación de los dos factores. Se explica a partir de las variaciones del potencial y de la conectividad, tal como muestra el gráfico 1. Potencial significa riqueza (biomasa y diversidad). El ciclo adaptativo consta de cuatro fases. En la primera (liberación), el ecosistema sufre un colapso porque el impacto recibido supera su capacidad de adaptación. Pierde gran parte de la biomasa y puede perder nutrientes e incluso especies (lo que provoca que el potencial y la conectividad sean bajos). La drástica reducción de la población de muchas especies les impide realizar sus funciones. El sistema ha perdido su capacidad de autocontrol al colapsar la jerarquía escalar. La tercera fase (explotación) es un proceso de acumulación. La biomasa crece, pero las especies pioneras van reduciendo sus poblaciones en la medida en que se desarrollan especies de porte mayor y son desplazadas a los espacios de alta insolación. Pero las otras empiezan a aumentar su población y, por ello, comien-

zan a realizar sus funciones. Como consecuencia de ello crece el potencial, la conectividad y el auto-control. Y aumenta el reciclado de nutrientes y la captación de energía (por ello su estructura se refuerza). En la cuarta fase (conservación o maduración) se consolida su control interno y alcanza su máxima eficiencia en el uso de materia y energía. Y la mayor parte de esta se dedica a mantener el sistema (Allen *et al.*, 2014, p. 579; Jorgensen *et al.*, 2008, p. 157).

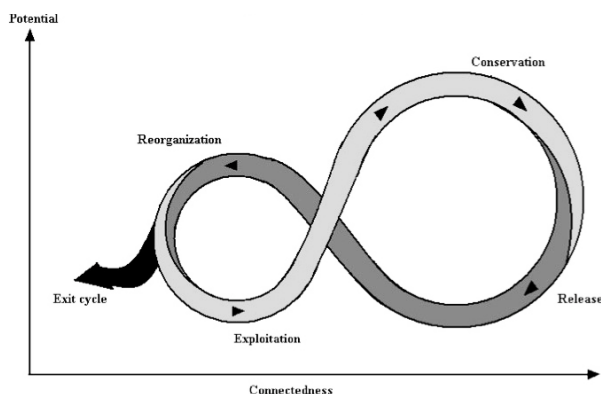


Gráfico 1. Ciclo adaptativo bidimensional.
Fuente: P. Stevaer (2011): www.lean-adaptive.com

Muy por el contrario, la civilización capitalista está en crisis porque, frente a la descentralización auto-organizada, ha creado una economía mundial con base en el libre comercio. Siendo conscientes de ello, las élites político-económicas están intentando superar los problemas existentes (insostenibilidad, rendimientos decrecientes, polarización de rentas, etc.), profundizando en dicha lógica mediante el impulso de lo que vendría a ser una nueva revolución industrial y más mercado-formado por un conjunto de varias tecnologías que supuestamente revertirán la tendencia hacia el estancamiento del crecimiento del PIB- (Schwab, 2016; OECD, 2016).

Evolución. Los ecosistemas “son gobernados por demandas y requerimientos de funcionalidad” y, por ello, evolucionan creando “nuevos sistemas por adición de nuevos organismos a los sistemas existentes” (Nielsen & Muller, 2009, pp. 1916-1917). Así que la dinámica natural genera diversificación e integración de elementos nuevos: “diversificación e integración son esenciales para la persistencia de los sistemas complejos” (Laszlo, 2013, pp. 62-63). Los ritmos de cambio de las especies son muy diferentes y más rápidos que los de los ecosistemas. La tasa de fotosíntesis de un bosque es menos variable que la de cada una de sus plantas. Desde esta perspectiva, los diferentes ritmos de actividad de los componentes de un ecosistema actúan como un mecanismo equilibrador. Tengamos en cuenta que

los procesos biofísicos se desarrollan en una variedad enorme de escalas de tiempo y espacio: algunos duran horas o días y suceden en espacios muy reducidos; otros tienen lugar a lo largo de décadas, siglos e incluso milenios, y en territorios de miles de kilómetros cuadrados. Los procesos de las plantas suelen ser los más rápidos; los de los animales de tamaño medio son intermedios; y la generación y regeneración del suelo y de los acuíferos pueden ser de cientos y miles de años. Por último, en la naturaleza nada crece de forma ilimitada. Desde los organismos a los biomas y paisajes, se manifiesta una tendencia al equilibrio, porque los mecanismos que impulsan el crecimiento se ven compensados por los que lo restringen, tal y como muestra la gráfica primera (Allen *et al.*, 2014, pp. 579-580).

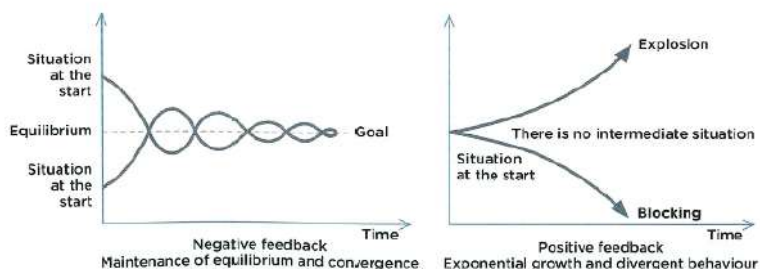


Gráfico 2. Retroalimentaciones positivas y negativas de los sistemas.

Fuente: K. Webster, 2015: 77.

Por el contrario, la economía capitalista necesita un crecimiento fuerte y persistente (al estar guiada por el criterio subjetivo de la maximización del beneficio), por lo que las retro-alimentaciones que se producen resultan positivas. Pero, tal como indica el gráfico dos, tal tendencia lleva inexorablemente a la explosión, esto es, un colapso en el que imperan las retroalimentaciones negativas generalizadas (Bonaiuti, 2014, p. 28). Así que es necesario “alcanzar los valores óptimos de las variables del sistema” (Capra & Luisi, 2015, p. 356).

Elementos de la construcción de la vida y del universo

La ciencia de dinámicas no lineales ha avanzado tanto que hoy permite evaluar la salud de un sistema en base a dos pilares: “1) La vasta complejidad del mundo está llena de modelos recurrentes y formas de organización sutiles; 2) y hoy las habilidades informáticas y la expansión de los conocimientos sobre los principios de energía nos permiten entender cómo tal ‘complejidad organizada’ funciona en los sistemas humanos y en los ecosistemas”. Las redes de flujos obedecen a

modelos matemáticos precisos y, por ello, la salud de las redes puede ser evaluada mediante la cuantificación de unos pocos factores: cantidad y variedad de los flujos y el equilibrio entre relaciones positivas y negativas (Goerner *et al.*, 2013, pp. 3-4). En este apartado explico el diseño y la organización fractal, el equilibrio de dimensiones y proporciones, los flujos de retroalimentación auto-catalíticos, los procesos de diferenciación e integración. Con todos estos elementos la naturaleza crea ecosistemas sanos.

Diseño módulos y sistemas fractales

Los medios bióticos y abióticos están llenos de modelos y formas sutiles de organización: los fractales. Son diseños universales y matemáticamente precisos que existen en la Tierra (ya sea en el medio biótico, en el abiótico o en los cristales) y en el Cosmos (por ejemplo: en la forma de las galaxias). La multiplicación e integración de módulos fractales da lugar a sistemas fractales. Son complejos, no lineales e interactivos, y tienen la habilidad de adaptarse a entornos cambiantes (www.fractal.org). La palabra fractal viene de la palabra latina *fractus*, que significa fragmentación, porque un sistema fractal se puede descomponer en unidades fractales básicas e iguales entre sí. El término fue acuñado por el matemático B. Mandelbrot en la década de los 70 del siglo pasado para describir figuras no existentes en la geometría euclidiana (Goerner, 2014, pp. 3-5). El propósito de un sistema fractal “es optimizar los flujos de energía e información para el beneficio mutuo de los actores del sistema como un todo”. Pero los sistemas fractales deben cumplir varios requisitos: tener una densidad y variedad suficiente de nodos en todas las escalas (coherencia fractal); tener cada nodo múltiples vías de conexión alternativas con otros nodos y tener enlaces largos y cortos (conectividad fractal). Estas premisas determinan indicadores con los que se pueden medir la salud de los sistemas fractales (Dyck, 2006b, pp. 39-40).

Todo lo que vemos en la biosfera tiene diseños fractales, “incluyendo árboles, plantas, animales e insectos; formaciones geográficas como montañas, cañones o costas; y formaciones de nubes, ciclones, olas, remolinos y tornados” (Raye, 2014, pp. 51-58). Otros ejemplos (que se muestran en el gráfico 3) son, por ejemplo, el diseño de conchas (como la del caracol *Nautilus*), cuya forma se repite en elementos tan diversos como los cuernos del macho cabrío o la propia configuración de las galaxias; por otro lado, cabe señalar que los rayos, los árboles (tanto las ramas como las raíces), los deltas de los ríos y los sistemas circulatorios de los pulmones, del cerebro y, en general, el de todo el cuerpo obedecen al mismo tipo de diseño fractal. Los fractales obedecen a ratios precisos que se cumplen en todas las dimensiones. Su repetición es debida a que contribuyen a la salud y robustez de los organismos, redes y sistemas, y por ello son seleccionadas en la naturaleza y en el

universo. Si, por ejemplo, una rama no se desdoblara en tres más pequeñas, los flujos se verían obstaculizados. La semejanza de los diseños fractales en todas las escalas facilita los flujos de energía, materia e información entre ellas. En la Grecia Antigua se conocían algunos de estos diseños y los denominaron “geometrías sagradas” (Dyck, 2006, p. 1038; Goerner, 2013, p. 406; 2014, pp. 3-5). La ciencia integral y la teoría Gaia “nos dicen que todo está integrado en la biosfera y que todas las partes están integradas fractalmente” (Dyck, 2006a, p. 1038).

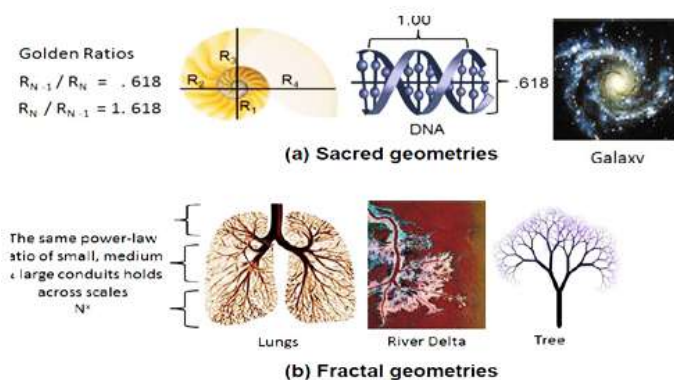


Gráfico 3. Geometrías fractales
Fuente: Adaptación de S. Goerner *et al.* (2014: 5)

Se ha llegado a la conclusión de que el algoritmo 4x3 se repite en todas escalas y ámbitos del universo: en el núcleo de un átomo, en el núcleo de una célula, en las galaxias, etc. Por otro lado, el número de personas y de otros mamíferos que forman la agrupación básica se multiplica por un *ratio* que varía entre 3 y 4. Y este *ratio* se repite en la creación de grupos más numerosos (Hill *et al.*, 2008). Teniendo en cuenta lo anterior, B. Fuchs *et al.* (2014) analizaron las conexiones en Internet durante un juego en el que participaron 400.000 personas y llegaron a la conclusión de que el ratio escalar de agrupación era de 4.3-4.4.

Dimensiones equilibradas

En la naturaleza nada crece de forma ilimitada. Los individuos de cualquier especie alcanzan unos tamaños adecuados para garantizar la máxima capacidad de sobrevivir y reducir drásticamente cualquier desviación (por arriba o por abajo) respecto a la norma. Esto lo demostró el biólogo y genetista J. B. S. Haldane (1926), analizando las consecuencias de aumentar el tamaño de elementos de múltiples tipos de especies. Aunque los ecólogos apenas han tratado el tema de la escala, sí lo han hecho autores de campos tan diversos como I. Illich, E. F. Schumacher o

G. Batenson (Bonaiuti, 2014, p. 9). En la naturaleza las cantidades de individuos de especies grandes, medias y pequeñas están equilibradas, lo que asegura una circulación óptima de flujos entre las mismas. Por ejemplo, en un ecosistema marino se mantienen de forma equilibrada las poblaciones de tiburones, delfines o focas con las poblaciones de peces que constituyen sus alimentos. Y estos peces, a su vez, mantienen un equilibrio poblacional con peces menores, algas, etc. Ello es debido a la existencia de un equilibrio entre lazos de retro-alimentación positivos y negativos. Así que la salud de un sistema descansa en un equilibrio entre lo grande y lo pequeño y entre lo global y lo local. Pero veremos más adelante que el equilibrio se debe dar también entre flexibilidad y rigidez (regulación y desregulación), diversidad y unidad, resiliencia y maximización de la producción (Goerner *et al.*, 2014, pp. 17-18).

Flujos auto-catalíticos: soportan un metabolismo sostenible

Para I. Matutinovic la auto-catálisis es “cualquier concatenación cíclica de procesos en la que cada miembro tiene la propensión a acelerar la actividad del lazo siguiente”, pero los ecosistemas “llevan siempre a un estado estacionario en su madurez” (2008, pp. 200-201). Una forma sintética de describir un metabolismo sano de un sistema es aquel “que encuentra, procesa y hace circular los recursos y energía necesaria para alimentar todas sus partes y así mantener su existencia” (Goerner *et al.*, 2014, p. 10). La naturaleza logra que un sistema permanezca en el tiempo mediante la creación de procesos de retroalimentación auto-catalíticos que canalizan energía, materiales e información para la construcción y mantenimiento de las capacidades de un sistema. O, dicho de otra forma, los flujos auto-catalíticos mantienen la salud metabólica y sostenibilidad de un sistema. Hemos visto cómo el diseño fractal permite que los flujos accedan con rapidez incluso a las zonas más periféricas y pequeñas de un sistema. Los flujos auto-catalíticos no sólo se producen a nivel de ecosistemas, sino que también en la biosfera (CO₂, O₂, N₂, NO₃) (Lietaer *et al.*, 2010, p. 5; Goerner, 2013, p. 410).

Diferenciación e integración

Los fractales constituyen los módulos primarios con los que, por replicación, agrupación, especialización e integración a través de las escalas, la naturaleza se construye así misma. El gráfico 4 muestra el ejemplo del proceso de creación del cerebro humano a partir de una célula. El cuerpo humano tiene unos cincuenta billones de células de estructura muy similar que forman, por agregación, todas sus partes constitutivas. Por eso todos los humanos somos similares. Este modelo de creación es seleccionado porque se permite crear sistemas complejos eficien-

tes y resilientes (Goerner *et al.*, 2014, pp. 13-18). Pero cuando las diferentes especies se integran en un ecosistema, aparece una diferenciación acusada entre ellas debido a su gran diversidad. Y esta diferenciación es necesaria porque cada especie realiza una función en el sistema. Por ello las unidades integradas son capaces de crear una circulación ágil de energías, recursos e información, capaz de nutrir adecuadamente a las unidades y agrupaciones fractales: “La vitalidad auto-sostenida descansa en canalizar tantos flujos como sea posible para la nutrición de las capacidades locales, construyendo circuitos sinérgicos y aumentando la circulación local”. De este modo, la naturaleza tiene capacidad para “mantener circulación, diversidad, innovación y resiliencia” (Goerner *et al.*, 2014, pp. 13-17; Laszlo, 2013, p. 62).

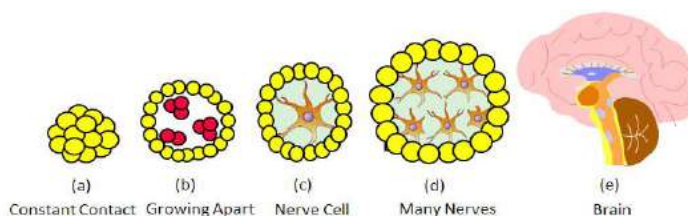


Gráfico 4. Creación del cerebro humano a partir de una célula embrionaria
Fuente: S. Goerner, 2013: 428

La necesidad de aclarar conceptos que son tomados de la ecología

En los últimos tiempos, cada vez se extrapolan más conceptos de la ecología a la realidad humana. Lo cual genera una gran confusión porque las sociedades humanas se comportan de forma diferente a los ecosistemas. Además, el poder político-económico modifica el sentido de los conceptos para eliminar el potencial transformador. Todo ello provoca que no haya un consenso sobre el significado de conceptos.

Ecosistema versus sistema y medio ambiente

Últimamente está de moda en las instituciones de gobierno y, en general, en la literatura científica llamar ecosistemas a sistemas creados por los humanos, a pesar de que son infinitamente más simples que los naturales y no se rigen por los principios funcionales de los mismos. El Consejo Europeo afirma que uno de los objetivos de la Presidencia de Luxemburgo es impulsar la economía social y enfatiza la importancia de crear en Europa un amplio “ecosistema” de economía social (EC, 2015, p. 5). La Comunicación *Online Platforms and the Digital Single Market* de Comisión Europea habla de “ecosistemas de plataformas digitales” (EC, 2016,

p. 8). También, lo hace la mayoría de los teóricos de la economía comunitaria. T. Scholz (2016, p. 14) reflexiona sobre “el ecosistema cooperativo”. D. Bollier y P. Conaty (2014, p. 15) citan la afirmación de M. Bauwens de que una de las tres prioridades básicas de la *P2P Foundation* es “crear un ecosistema de producción alternativo”. Este autor y otros plantean la necesidad de impulsar un “ecosistema nuevo de creación de valor” (Bauwens *et al.*, 2017, p. 16). Y J. Restakis (2014, p. 13) explica que su visión holística de lo que denomina una economía social “puede ser llamada un ‘ecosistema’ de soporte institucional análogo al ecosistema existente de instituciones capitalistas”.

El término de medio ambiente también está siendo objeto de un uso generalizado en cualquier realidad y, en especial, en la literatura sobre la revolución digital en marcha. El término habitual se refiere a aquella parte de la naturaleza que rodea los enclaves en los que se asientan las sociedades humanas, especialmente las ciudades. Pero la CE afirma que la actualización de las normas sobre servicios de medios audiovisuales creará un medio ambiente más justo dentro de su estrategia *A Digital Single Market Strategy for Europe*, lanzada en 2015 (EC, 2015, COM(2015), p. 192). También, utilizan el término diversos estudios del IERC (*European Research Cluster of Internet of Things*) (Vermesan *et al.*, 2016, p. 16; Friess & Riemenschneider, 2016, p. 9) o del Foro Económico Mundial (Drake *et al.*, 2016, p. 11).

El concepto de resiliencia y su relación con la sostenibilidad

Hemos visto que sostenibilidad significa imitar a la naturaleza. Hay opiniones divergentes en ecología sobre el significado del concepto de resiliencia que puede afectar al de sostenibilidad. La corriente de pensamiento sobre ecología agrupada en torno a la *Resilience Alliance* (liderado por H.C. Holling) considera que la resiliencia es un concepto linealmente positivo: cuanto más resiliente es un sistema más capaz es de mantener su identidad y funciones. La resiliencia está determinada por dos factores: potencial y conectividad. El potencial es proporcional por la cantidad de biomasa y de especies. Es considerado linealmente positivo, porque muchos ecólogos entienden que cuando más grande sea mayor será su contribución a la resiliencia. La conectividad está determinada por el nivel de conexiones que se producen en un sistema. Pero esa interpretación de resiliencia como fenómeno lineal es inconsistente, porque los dos elementos que la determinan no lo son. La razón es que si el potencial crece excesivamente, la biodiversidad también lo hace y la abundancia de conexiones provoca que la conectividad sobrepase la ventana de viabilidad y determinen una resiliencia excesiva. El sistema se vuelve rígido y por ello vulnerable (Goerner *et al.*, 2009, p. 78).

El ecólogo teórico R.E. Ulanowicz lidera este enfoque y defiende, junto con

sus colaboradores, que la sostenibilidad está definida por la resiliencia y otros conceptos diversos equivalentes a la idea de producción. El gráfico 5 muestra que cuando la producción es máxima la resiliencia es nula y el sistema es muy vulnerable. Y cuando la resiliencia es alta la producción baja, por lo que el sistema tiene poca vitalidad. El equilibrio se encuentra donde la sostenibilidad es máxima: en la “ventana” de vitalidad / viabilidad. A. Pandit & J. C. Crittenden (2015) están de acuerdo con los anteriores al afirmar que la resiliencia es un “atributo de la sostenibilidad”.



Gráfico 5. Sostenibilidad como función de la conectividad y la resiliencia
Fuente: S. Goerner *et al.*, 2009, p. 78.

Las visiones discordantes suponen un obstáculo adicional a la tarea siempre difícil de traslación de un concepto de un tipo de sistemas a otros. Las dificultades habituales son debidas a cuatro factores: una traslación literal de conceptos, cuando los ecosistemas son sostenibles y las sociedades no; la aparición de numerosos conceptos semejantes o cuasi-semejantes a resiliencia, como robustez o gestión adaptativa, que enmaraña más aún el significado conceptual; o, como hemos visto, la política de los centros de poder tendente a vaciar los conceptos de contenido transformador. Todo ello lleva naturalmente a una gran variedad de definiciones y medidas del concepto (Goerner *et al.*, 2014, p. 2).

El hecho de que las sociedades no sean sostenibles cambia el contexto de traslación conceptual, porque no sólo se trata de hacer frente a los impactos exteriores, sino también de transformarlos. Además, conlleva que la resiliencia pueda ser positiva o negativa según el contexto. Algunas civilizaciones han sido muy longevas (los imperios egipcio y chino se mantuvieron durante unos 4000 años), pero la muy baja calidad de vida de sus poblaciones pone en cuestión que su resiliencia fuera positiva. Las grandes corporaciones muestran también una longevidad que no tienen las empresas de menor tamaño. Así que, en sentido estricto, su resiliencia es también negativa para las sociedades. En este marasmo conceptual asistimos, por un lado, a un uso creciente del término de resiliencia en detrimento del de sostenibilidad y, por otro lado, a una multitud de definiciones sobre resiliencia no

coherentes.

UNISDR da una definición semejante a la de la ecología: La resiliencia de las sociedades se “caracteriza por su capacidad de hacer frente o absorber el impacto de un riesgo por medio de resistencia o adaptación, lo cual le hace capaz de mantener ciertas funciones básicas y estructuras durante la crisis y recuperarse” (2012, p. 11). Pero no dice que deben transformarse para lograrlo. G. Bristow & A. Healy consideran que es necesario investigar para inferir “las cualidades y atributos de un territorio que lo hacen adaptable y capaz de progresar mediante el cambio” (2014, p. 99). Para otros autores la clave está en el cambio. Resiliencia sería “la habilidad de las regiones (ante los desafíos económicos, tecnológicas y ambientales) de involucrarse en procesos de colaboración para cambiar mediante la planificación y su aplicación, dentro de las limitaciones de los activos regionales” (Wolfe, 2010). Otros autores afirman que la clave está en el propósito de adaptación. En la “variedad, selección, inercia (*path dependence*), auto-organización, así como un propósito de adaptación de los agentes económicos y políticos” de las regiones (Martin, 2012, p. 28). Pero un informe de CSIRO ve la necesidad de una “transformación forzosa” y define “resiliencia general” como “la capacidad de todas las partes de un sistema de hacer frente a toda clase de shocks y alteraciones y así ser capaces de evitar cruzar umbrales (conocidos o desconocidos) que alteren regímenes o sistemas” (O’Connell, 2015, p. 6).

Por último, abundan las iniciativas de creación de “ciudades resilientes” que se focalizan en hacer frente a catástrofes naturales. El informe *City Resilience Framework* de la *Rockefeller Foundation* considera que la resiliencia “se focaliza en reforzar la respuesta de un sistema de cara a múltiples desastres” (2014, pp. 3-4). Esa fundación lanzó en 2015 la campaña de “100 resilient cities” (Rockefeller Foundation, 2015). Es lógico que la *United Nations Office for Disasters Risks Reduction* lanzara en 2010 la campaña *Making cities resilient-My City is Getting Ready*. En agosto de 2012, 1.050 ciudades y gobiernos locales la respaldaban (UNISDR, 2012).

Pero aún hay menos consenso en relación con la diferencia entre sostenibilidad y resiliencia. Un estudio “conceptual” del *Postcarbon Institute* afirma que la resiliencia de las comunidades descansa en seis bases: gente, pensamiento sistémico, adaptabilidad, transformabilidad, sostenibilidad y coraje. Así que la sostenibilidad forma parte de la resiliencia pero, paradójicamente, considera que la sostenibilidad “es la luz que guía la construcción de la resiliencia” (Lerch, 2015, pp. 11-25). En dos de las 17 metas que propone la 2030 *Agenda for Sustainable Development* aparecen los dos conceptos juntos en las metas 9 y 11: “Construir infraestructuras resilientes, promover una industrialización incluyente y sostenible e impulsar la innovación”; “hacer que las que las ciudades y asentamientos humanos sean incluyentes, seguros, resilientes y sostenibles”. Por lo que hay que consi-

derar que son dos conceptos diferentes (2030ASD, 2015, p. 14). Por el contrario, J.M. Anderis *et al.*, afirman que la sostenibilidad es “una estructura analítica que guía la acción”. Mientras que la resiliencia “puede ser usada dentro del amplio contexto de la ciencia de sostenibilidad para ayudar a caracterizar aspectos importantes del contexto de la toma de decisiones” (2013, pp. 9-10).

La aplicación de la métrica fractal y las tecnologías y sistemas biomiméticas

La métrica fractal

Los ecosistemas nos enseñan cómo construyen la vida. Para ello utilizan una métrica constructiva precisa, el fractal. Ello permite que los flujos auto-catalíticos nutran adecuadamente todos los elementos de un sistema, creando así un metabolismo saludable. El equilibrio es omnipresente en la naturaleza. La métrica fractal determina la existencia de equilibrio entre lo pequeño y grande, flexibilidad y constreñimiento, diversidad y unidad, entre resiliencia y producción, descentralización e integración, competencia y mutualismo, etc. Estos equilibrios se producen porque las retroalimentaciones positivas y negativas se compensan. Los sistemas sociales fractales “son arquitecturas inspiradas en la naturaleza y con jerarquías distribuidas cuyos componentes son simultáneamente una entidad individual y social”. Su objetivo es ofrecer un servicio a la sociedad (De Florio *et al.*, 2013, p. 8). Pero aún no se ha desarrollado de forma suficiente la aplicación de la teoría fractal en las sociedades, por lo que aquí presento sólo algunos avances en el desarrollo de la misma.

El diseño fractal determina que la economía tenga tres rasgos. Dos de ellos tienen carácter estructural y el tercero se refiere al proceso de construcción de la alternativa, pero los tres están interrelacionados. Uno: el propósito del sistema económico es optimizar los flujos auto-catalíticos (de personas, dinero, energía, información, bienes y servicios) para el beneficio de todos los actores del sistema. Dos: la distribución espacial de la actividad económica obedece a los parámetros fractales y su propósito es optimizar la relación entre la población humana y la naturaleza extra-humana en términos de adaptabilidad, estabilidad, eficiencia y sostenibilidad. Y la distribución espacial de nodos y entre escalas debe basarse en el principio de subsidiaridad para que se cumpla el primer rasgo. Tres: esas relaciones estructurales deben sustentarse en un aprendizaje social colaborador. Ello supone que ningún nodo debe dominar, sino que los intercambios de información, energía y capital se realicen fluidamente entre los nodos, como es típico de las economías basadas en la cooperación. Y los *ratios* fractales constituyen indicadores que nos permiten medir la salud de nuestras economías, como “las

dimensiones claves de la interconectividad, dinamismo sistémico, sensibilidad es- calar, colaboración y aprendizaje social y el rol de la economía en el bienestar social y en la salud del sistema” (Dyck, 2014, pp. 39-40). El enfoque fractal obliga a crear módulos económicos básicos (economías locales solidarias y sostenibles) que, por replicación, agregación e integración, den lugar a la construcción de regiones y estados. Las estructuras de éstos son similares, pero cada vez más au- tónomos y con mayor capacidad de adaptación (Dyck, 2006a, p. 1042; de Florio *et al.*, 2013, pp. 5-14).

Tecnologías y sistemas biomiméticos

El enfoque biomimético obliga a diseñar sistemas productivos inspirados en la naturaleza. Así que su campo de investigación es enorme. El *Biomimicry Institute*, creado por Janine Benyus, es el referente teórico y práctico de la visión consistente en imitar a la naturaleza. En 1998 popularizó su enfoque con el libro *Biomimicry. Innovation Inspired by Nature*. Afirma que la especie que se apropia de todos los recursos no puede sobrevivir y que esto es lo que está haciendo la especie humana: “Una especie no puede ocupar un nicho de forma que se apropie de todos los re- cursos (...) acaba destruyendo la comunidad para mantener su propia expansión. Trágicamente esta ha sido nuestra trayectoria” (1998, p. 5). Para superar esta di- námica destructiva propone adoptar el paradigma biomimético: “La idea central es la naturaleza, imaginativa por necesidad”, ha resuelto todos los problemas que hoy asolan a la humanidad. Así que “una emulación consciente del genio de la vida es una estrategia de supervivencia de la especie humana” (Benyus, 2009). Y esta emulación se debe producir a todos los niveles: desde la célula hasta la biosfera (Benifand *et al.*, 2014, p. 2).

La revolución biomimética supone sustituir el comportamiento extractivo de la Tierra por el aprendizaje de cómo funciona (Benyus, 1998, pp. 2-9). J. Benyus describe tres niveles de biomimesis: El primer nivel es imitar un producto, por ejemplo, los componentes de una pluma de búho para producir un tejido. El segundo es imitar un proceso natural: “las plumas de un búho se auto-organizan en función de la temperatura del cuerpo”. Y el tercero es la imitación de los eco- sistemas. Pero más allá de la enorme biblioteca de la naturaleza, el gran legado de la biomimesis inspira gratitud y “el deseo ardiente de proteger el genio que nos rodea” (2010, pp. 3-7). Es decir, inspira biofilia: amor a la vida (BTTR Research, 2015, p. 19). De los tres niveles parece dominar ampliamente el primero, aunque empiezan a desarrollarse los otros dos.

A lo largo de la historia, los humanos hemos imitado diseños naturales. Los cuchillos y hachas de piedra se asemejan a los dientes de mamíferos. La máquina voladora de Leonardo da Vinci imita a los pájaros. Los hermanos Wright pudie-

ron volar al imitar la forma de las alas de las aves. La curvatura superior permite una mayor velocidad del aire que la curvatura inferior, lo que genera un impulso hacia arriba. La innovación en biomimesis crece de forma explosiva. Hay una docena de revistas científicas dedicadas a ella, que publican miles de artículos al año. Se aplica en la industria manufacturera, química, biología, arquitectura, medicina, agricultura, etc., (Lepora *et al.*, 2013, p. 5).

La mayoría de los materiales biomiméticos se han desarrollado en la UE y la estrategia de I+D Horizon 2020 de la UE establece que las soluciones basadas en la naturaleza es un área prioritaria de inversión. También, en Japón y EEUU la están impulsando, especialmente en el campo de la investigación en nanotecnologías. La mayoría de sistemas funcionales se han originado desde la nano-escala o micro-escala de partes de insectos y plantas. Pero se está produciendo una nueva ola de imitación de animales. En Alemania 28 centros de investigación biomimética han creado la plataforma de cooperación BIOKON. Los *ratios* de patentes biomiméticas crecieron en el periodo 1985-2005 un 93%, mientras que el resto de las patentes sólo crecieron un 2,7% (UNEP, 2012, p. 11). Por ello, B. Rattner (directora del *Biomimicry Institute*) afirma: “Estamos empezando un cambio colosal desde tecnologías y sistemas que agotan los recursos naturales escasos a otras que no afectan (o incluso restauran) nuestro planeta compartido” (2017, p. 27).

Además, la UE está dando pasos hacia un enfoque sistémico. Creó el *Horizon 2020 Expert Group on ‘Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities’* (EGN-BSR-NC), que en 2015 emitió un informe con el mismo título. La iniciativa es muy importante porque el 73% de los europeos viven en ciudades y se prevé que sean el 82% en 2050. Entre el 60% y el 70% de los humedales han sido destruidos. Entre 2002 y 2012 los fenómenos climáticos y accidentes de tráfico provocaron 80.000 muertos y pérdidas de 95.000 millones de euros en daños. Sus objetivos son “reforzar un urbanismo sostenible”, “restaurar ecosistemas degradados”, “desarrollar adaptación al (y mitigación del) cambio climático” y “mejorar la gestión de riesgos y la resiliencia”. Sus áreas de investigación e innovación son: regeneración urbana, mejora del bienestar en áreas urbanas, resiliencia costera, gestión multi-funcional de cuencas fluviales y restauración de ecosistemas, uso sostenible de materia y energía, mejorar el valor del seguro de los ecosistemas y aumentar el secuestro de carbono. Y el EKLIPSE *Expert Working Group* elaboró una estructura de evaluación de impacto, con el objetivo de apoyar la planificación y la evaluación de los proyectos basados en las soluciones biomiméticas. Esta política es reforzada por la iniciativa *World Environmental Hubs*, promovida por la IUCN y la ciudad de Jeju, que pretende identificar “ciudades y regiones líderes a escala mundial que demuestren cualidades ambientales muy altas y un empeño de trabajo hacia un futuro sostenible” (EKLIPSE *Expert Working Group*, 2017, p. 3; EGN-BSR-NC, 2015, pp. 7-19; IUCN, Jeju, 2012).

Por otro lado, conviene aclarar el campo confuso de la química, por su importancia e impacto. Se utiliza en el 90% de los bienes manufacturados. Rachel Carson denunció en su libro *Silent Spring* (1962) la naturaleza de los productos químicos utilizados en agricultura. Y casos como el accidente de Seveso, la contaminación de la bahía de Minamata o el crecimiento de la evidencia empírica sobre la peligrosidad para la salud y/o el ambiente de muchos de sus productos provocan que la industria química sea cada vez más criticada. Ello ha provocado la proliferación de legislación ambiental (aunque se queda corta) por parte de los estados OCDE y de la UE y, al menos, de cuatro convenciones internacionales. Pero únicamente se ha logrado que un sector minoritario esté reduciendo la peligrosidad de los productos y sustancias. Se denomina química verde o química sostenible y, dentro de ella, está emergiendo una química biomimética.

El término de química verde domina en el mundo anglosajón y el de química sostenible fuera de él. Normalmente se las consideran equivalentes. El *Green Chemistry & Commerce Council* (GC3) la define como “el diseño de productos y procesos químicos que reduce o elimina el uso a la generación de sustancias peligrosas a lo largo de su ciclo de vida” (2015). Paul Anastas es considerado el padre de la química verde y definió doce principios en 1991, que son ampliamente aceptados. Pero la mayoría de ellos son incrementales: métodos sintéticos menos peligrosos, productos más seguros, reducción de residuos, química más segura en la prevención de accidentes, etc. El número de patentes se ha multiplicado por casi cuatro veces entre 2005-2009 y 2010-2014 en EEUU. Y, aunque aún supone una fracción menor del mercado, crece más rápido que la química convencional (GC3, 2015, pp. 6-22; *The Natural Edge Project*, 2008).

El enfoque de la química biomimética (que nació de la colaboración entre la biología y la química orgánica) es opuesto al de la química convencional. Mientras ésta usa la gran mayoría de los elementos de la tabla periódica (son 91) y muy pocos catalizadores, la química natural utiliza muchos catalizadores y sólo 20 elementos. La química biomimética está tratando de conocer los principios que gobiernan la química natural para aplicarlos. Pero ya está creando “sistemas organizados de varios componentes, cuyas interacciones provocan propiedades nuevas más allá de la preocupación por sustancias puras” (Breslow, 2008, p. 1341). Se está avanzando en la nano-química, creando biomateriales orgánicos e inorgánicos que son combinados para sintetizar materiales supra-moleculares (que son muy duros y adquieren todo tipo de curvaturas). Es lo que se llama química de coordinación. Así que “las dos palabras clave (composite y colectivo) resumen las lecciones principales que la naturaleza enseña a los químicos” (Bensaude-Vincent, 2009, p. 36). Debido al predominio de los materiales, a este campo se le conoce cada vez más como el de materiales biomiméticos, dominando la investigación en materiales hidrofóbicos, adhesivos, anti-reflexivos y sensores inspirados en diver-

sas especies (Shimomura, 2010, pp. 56-62).

Por último, la energía constituye el campo más avanzado de tecnologías biomiméticas. Las tecnologías eólicas, fotovoltaicas y solar-termales empiezan a ser dominantes en muchas áreas del mundo. En la UE constituyen la única energía que se instala en términos netos, como muestra el gráfico 6. En el mundo se instala más potencia renovable que convencional y esta disparidad crece con el tiempo. Y, en la medida en que avance la imitación de los diseños naturales, mejorará su eficiencia.

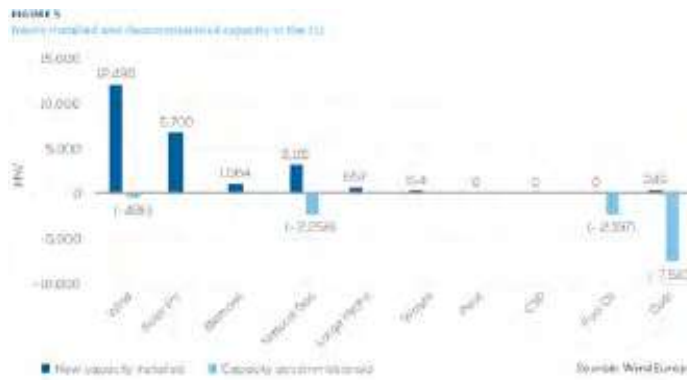


Gráfico 6. Nueva capacidad instalada y decomisada en la UE, 2016
Fuente: Wind Europe, 2016: 12.

Por otro lado, el hidrógeno es el combustible de la vida. La función principal de la fotosíntesis es el almacenamiento de energía en formas químicas, siendo el hidrógeno el elemento más usado para ello: “La fotosíntesis constituye la base de todos los métodos de producción biológica de H₂” (Allakhverdiev *et al.*, 2010, p. 49). Siendo así, el hidrógeno está emergiendo como la alternativa a los combustibles fósiles y a los agro-combustibles en el transporte. Pero la producción de hidrógeno por electrolisis (la única alternativa utilizada comercialmente que puede producir hidrógeno renovable) resulta poco eficiente porque normalmente el hidrógeno se usa en transporte aplicado a la célula de combustible (que produce la electricidad que impulsa los vehículos). Por ello, se están desarrollando tecnologías biomiméticas que producen directamente del sol el hidrógeno. El Proyecto HYDROSOL de la UE utiliza una planta solar termal para producir vapor de agua, el cual pasa por unas toberas que captan el oxígeno. El proyecto está en la fase de lograr su comercialización. Además, se están desarrollando células o reactores fotoelectroquímicos que pueden realizar una “conversión directa” de la luz solar en hidrógeno. Pero es preciso indicar que el hidrógeno no es un buen combustible para aviación o navegación de largo recorrido. Es por ello que se están desarrollando tecnologías que captan CO₂ y lo combinan con hidrógeno para producir

múltiples hidrocarburos líquidos (metanol, ácido fórmico, etc.), y que son más fáciles de almacenar y transportar (Hrastelj & Vilela, 2016, pp. 8-10; Braun, 2017; www.ciemat.es).

Proceso de construcción de un modelo producción comunal y sostenible

La eco-psicología ha demostrado que a través de la experiencia con otros seres “podemos comprender y desarrollar nuestras cualidades más profundas como seres humanos” (Webber, 2013, p. 20). Por ello, al ejercer violencia sobre la naturaleza, la estamos infringiendo sobre nosotros mismos porque somos parte de la red de vida. Tal y como afirma la Asamblea de NNUU: “Al contaminar y agotar la Madre Tierra, nos estamos contaminando y agotándonos a nosotros mismos” (A/66/302, p. 77). El párrafo 197 de Río+20 se acerca a esa visión: “Nosotros reafirmamos el valor intrínseco, así como los valores ecológicos, genéticos, sociales, económicos, científicos, educacionales, culturales, recreacionales y estéticos de la diversidad biológica y su rol crítico en el mantenimiento de los ecosistemas que nos proveen servicios esenciales” (UNCSD, 2012, p. 35). Pero el incumplimiento de los principios funcionales está provocando una crisis de civilización. Así que, como afirma E. Sahtouris, ya que hemos alcanzado el límite de explotación del planeta, es el momento para reconocer que “la enemistad es más costosa que la colaboración amistosa, tenemos que cruzar el umbral nuevo que nos lleve a una maduración comunitaria y global de la ecosofía”. Esto significa, en última instancia y según la cultura de la Grecia antigua, organización de la hacienda creativa y sabia (2014, p. 5-6).

Existe un consenso muy amplio sobre la necesidad de crear economías descentralizadas, autosuficientes, comunitarias y sostenibles. Un informe del *High Level Panel of Eminent Persons* (HLPEP, creado para apoyar Río+20) afirma que “las autoridades locales tienen un rol crítico en definir prioridades, ejecutar planes, evaluación de resultados e involucrar a las empresas locales y a las comunidades” y son el origen “de los programas más exitosos de apoyo al sector informal y a las microempresas” (2013, pp. 10-11). Río+20 enfatiza la importancia de la descentralización y, entre otros muchos párrafos, destaco el 136, que reconoce “el rol importante de los gobiernos municipales en definir una visión de ciudades sostenibles” y el 137: “la colaboración entre ciudades y comunidades desempeña un rol importante en la promoción del desarrollo sostenible”. La descentralización es la única forma de lograr integración social, sostenibilidad y eficiencia sistémica. Fortalece la sostenibilidad, porque el ambiente y los recursos locales constituyen elementos vitales del bienestar local. Optimiza “las relaciones de la población humana y el ambiente natural, en términos de adaptabilidad, estabilidad y efi-

ciencia” (Goerner *et al.*, 2014, p. 14). Sólo las economías descentralizadas tienen capacidad potencial para cerrar los flujos de los materiales y generar diversidad y eficiencia. La diversidad se produce porque cada economía local se desarrolla en un contexto diferente (cultura, recursos, clima, etc.), maximizando así las oportunidades de aprendizaje mutuo. Y la eficiencia es inherente a la descentralización. Reduce la necesidad de transporte, de generación de residuos. Produce alimentos más sanos y refuerza la seguridad alimentaria (Bristow & Healy, 2014, p. 97; Fiscus, 2013, p. 567).

Los movimientos transformadores

Un informe del *United Nations Research Institute for Social Development* (UNRISD) (fruto de una Conferencia con más de 70 contribuciones) concluye que en la década pasada se produjo una gran expansión y diversificación de la *Economía Social y Solidaria* (ESS) (que es el resultado de unir “la economía solidaria y la economía social” (Kawano, 2013)). Y lo explica: “El renacimiento de múltiples formas de cooperativas, así como las de producción, servicios y consumidores; el crecimiento de mutualidades que ofrecen servicios financieros y de seguros; el desarrollo del comercio justo y redes comerciales de alimentos alternativas que conectan productores y consumidores de una forma más justa y verde; formas nuevas de empresas sociales que a menudo ofrecen servicios de proximidad; la organización colectiva en asociaciones de trabajadores de la economía informal; varias formas de esquemas comunitarios en campos como finanzas solidarias, gestión del riesgo, satisfacción de necesidades básicas y la gestión de un fondo común de recursos; y la emergencia de millones de grupos de auto-ayuda, a menudo dirigido sobre todo a mujeres” (2014, p. 1).

Productive community	Linux	Mozilla	GNU	Wikipedia	Wordpress
Entrepreneurial coalition	e.g. Linux Professional Institute, Canonical	e.g. Mozilla corporation	e.g. Red Hat, Endless, SUSE	e.g. Wikia company	e.g. Automatic company
For-benefit association	Linux Foundation	Mozilla Foundation	Free Software Foundation	Wikimedia Foundation	Wordpress Foundation

Tabla 1. Sistema de creación de CBPP
Fuente: Bauwens et al, 2017: 13

Ante la multitud de movimientos englobados en la ESS conviene, al menos, aclarar algunos conceptos: hay términos que se usan en realidades antagónicas;

no suele haber acuerdo sobre su significado; y algunos de ellos sólo se aplican en determinadas zonas del mundo. Algunos de los términos utilizados son: economía social, economía social y solidaria, *sharing economy* (así llamada en EEUU, pero en Europa se conoce como *collaborative economy*, aunque las plataformas capitalistas se consideran parte de la *sharing economy*, con independencia de que el término utilizado por movimientos transformadores); economía del buen vivir, economía regeneradora, etc. Por último, el término economía social sólo se utiliza en Europa y Canadá (TFSSE, 2014, p. 3).

Se están desarrollando múltiples iniciativas de creación de recursos inmateriales (conocimiento y diseño) de libre acceso (basado en la tecnología digital y conocido como software libre). Este empezó con la creación del sistema GNU/Linux y le siguieron *Apache*, *Eclipse*, *Firefox* o *Ubuntu* y en la actualidad hay millones de diseños digitales. Su calidad supera a los productos capitalistas. También, se han creado otros muchos bienes comunes de conocimiento. Wikipedia existe en una docena de idiomas. Hay más de 10.000 revistas científicas de libre acceso, así como muchos recursos educacionales (cursos o libros) que son de libre acceso. Se estima que hay más de mil millones de trabajos creativos y de información en el mundo bajo la licencia de bienes creativos comunales (desarrollándose así “un fondo común de conocimiento para toda la humanidad”). Los miembros de la comunidad que intervienen en los proyectos de software libre realizan trabajo voluntario y producen conocimiento, que es un bien común. Y frecuentemente estas iniciativas dan lugar a la creación de empresas como medio de tener ingresos o con la intención de obtener beneficios. Normalmente, en el primer caso, las empresas crean fundaciones que canalizan fondos para potenciar la producción comunal (como son los casos que se muestran en la tabla) e incluso realizan cooperación para el desarrollo (Bauwens & Kostakis, 2014, p. 356; Bloemen & Hammerstein, 2017, p. 20; Bollier, 2015, p. 12). El gráfico 7 sintetiza el proceso explicado el proceso explicado.

Por otro lado, el software libre ha venido siendo distribuido con base en la licencia de reciprocidad comunitaria (CBRL en inglés), que permitía que cualquiera pudiera utilizar el conocimiento pero con la condición de que si lo mejoraba, lo debía aportar a la comunidad. Sin embargo, las empresas capitalistas se han venido apropiando de él sin añadir mejora alguna. Por ello, se proponen dos vías para evitarlo. Una, que ya se está aplicando, es cambiar la licencia CBRL por la *Copyfair*. Ésta obliga a las empresas capitalistas a pagar por el conocimiento adquirido, pero sigue siendo libre en el ámbito de la economía comunal. Pero *Copyfair* coexiste con la de *Bienes Comunes Creativos No-Comerciales*, como Wikipedia. Otra alternativa más sistémica sería crear cooperativas abiertas para cada iniciativa, que pagaría a los voluntarios que no quisieran integrarse. De esta forma, el conocimiento adquirido fortalecería el movimiento comunal en una doble

dimensión: aumentando su conocimiento y obteniendo recursos en el mercado vendiendo sus productos (Bauwens & Kostakis, 2017, pp. 12-13).

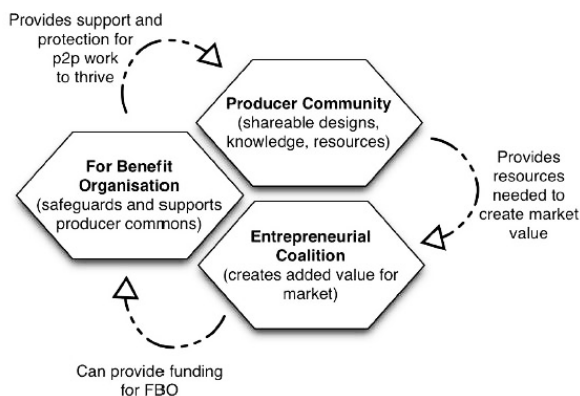


Gráfico 7. Simbiosis entre los productores comunales y las coaliciones empresariales
Fuente: C. Giotitsas, J. Ramos, 2017: 5 NEF

Por último, hay más bienes comunales, como infraestructuras de internet descentralizadas, bienes comunales científicos (licencias, diseños o estudios), espacios urbanos comunales, iniciativas culturales (música o teatro) comunitarias y otras muchas que están provocando un cambio cultural (Bloemen & Hammersstein, 2017, p. 8). Su ritmo de crecimiento es muy fuerte. Están siendo impulsados por muchos institutos, fundaciones y cada vez es más frecuente que lo hagan también los municipios. Estudios realizados en Flandes y en Holanda muestran que en la última década las iniciativas cívicas se han multiplicado por un factor diez (Bauwens, 2017, p. 3).

A lo largo de Europa y de otras regiones del mundo ciudadanos, emprendedores y comunidades están inventando nuevas formas de compartir y cooperar “para crear, preservar o acceder a bienes y servicios” comunales (Troncoso, 2017, p. 2). Se desarrolla una red mundial de micro-fábricas de propiedad comunal. La primera fue diseñada por el *Center of Bits and Atoms* del MIT en 2001 y le dio el nombre de *FabLab* (laboratorio de fabricación). Pero se están imponiendo términos como *hackerspaces* o *makerspaces*. Producen bienes por medio de impresoras 3D, cortadores laser y máquinas herramientas de control numérico, que están conectadas en red. Su coste es de 25.000 a 65.000\$. De forma que, así como Internet facilita el acceso a la información y comunicación, las redes de *makerspaces* están democratizando la producción de bienes. Este modelo tiene una dimensión mundial y otra distribuida, que se sintetiza en el lema “diseña mundial, fabrica local”. El gráfico 8 refleja que el diseño (conocimiento, que no pesa) es compartido y mejorado mediante redes mundiales, mientras que la producción de bienes materia-

les (que pesan) es local (Kostakis *et al.*, 2016a, p. 86; Kostakis *et al.*, 2016b, p. 2).

En 2017 había una red de más de mil *makerspaces* y unos 10.000 usuarios que estaban conectados en red mediante la plataforma *FabLabs.io*, creada en 2014. Su actividad está muy centrada en la educación. Además, se estima que hay más de 100.000 emprendedores y hobbistas que producen bienes con esas tecnologías en otros mil *makerspaces*. Producen bienes especializados. Crecen a un ritmo muy fuerte y, aunque la mayoría se concentra en el oeste europeo y en EEUU (aunque aquí hay muchos menos), se están extendiendo por todo el mundo y, sobre todo, por China. Por otro lado, proliferan las iniciativas de diseño abierto de bienes, de las que explico dos muy relevantes. El proyecto *RepRap* se centra en el diseño de una impresora 3D sencilla que, con el paso del tiempo, puede construir más piezas de sí misma; en 2010 colaboraban 5,000 investigadores y su número se dobla cada semestre. El proyecto *Open Source Economy* impulsa el diseño y la fabricación de 50 máquinas sencillas y eficientes que son necesarias para las economías locales. Esta experiencia se financia con la venta de los bienes producidos (Niaros *et al.*, 2017, pp. 3-5; Bauwens & Kostakis, 2017, p. 10).

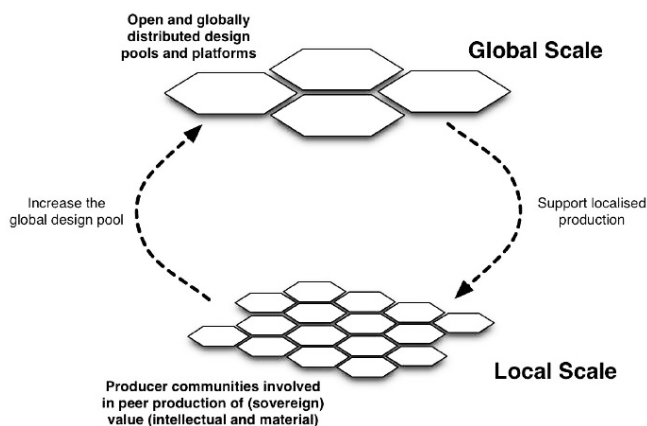


Gráfico 8. Diseño mundial, producción local. Fuente: C. Giotitsas, J. Ramos, 2017: 5 NEF

Estas iniciativas constituyen lo que se conoce como producción entre iguales o pares basada en bienes comunales (“*commons-based peer to peer production*” (CBPP)). Y “CBPP es una vía nueva de creación y distribución de valor, donde las infraestructuras P2P permite a los individuos comunicar, auto-organizarse y, en última instancia, co-crear valor de uso que no rivaliza con otros, en la forma de bienes comunes digitales de conocimiento, software y diseño” (Bauwens & Kostakis, 2017, p. 10).

Además, están emergiendo las cooperativas abiertas o de multi-agentes (CMA) y las plataformas cooperativas (PC). Las primeras vienen desarrollándose desde

hace al menos una década y ya tienen un arraigo muy importante. La segunda aparece en 2015, empezó a crecer lentamente, pero en la actualidad lo hace a un ritmo muy importante. Ambos se solapan, pero tienen rasgos diferentes, aunque en algunos casos es difícil diferenciarlas. Ello explica que los autores no se suelen poner de acuerdo en encuadrar experiencias. Las plataformas cooperativas nacen como respuesta a la auto-llamada *sharing economy* por Uber, TaskRabbit o Amazon y se han creado cientos de ellas, pero están expandiendo su ámbito de actuación. En algunos casos compiten con algunas de esas plataformas (como es el caso de FairMondo en relación con Amazon). Algunas cooperativas clásicas empiezan a ensayar plataformas cooperativas para cooperar entre sí o para relacionarse con las sociedades. También emergen las CMA, llamadas así porque están gobernadas por actores que intervienen en su desarrollo: productores, consumidores, prestamistas, *sponsors*, clientes, suministradores, representantes de las comunidades o agencias públicas que las apoyan. Estas cooperativas son mucho más resilientes que las clásicas, porque no pueden ser privatizadas (lo cual sigue siendo un problema histórico del cooperativismo clásico). Son adoptadas por los movimientos de producción comunal (Troncoso & Utratel, 2017, pp. 5-10; Bauwens & Kostakis, 2017, p. 27; Scholz, 2016: 11; Restakis & Bauwens, 2014, p. 64).

La estrategia de la P2P Foundation de creación de una economía comunal y sostenible

La *P2P Foundation* está liderando la CBPP en Europa (espacio donde más iniciativas se están desarrollando), y ha diseñado una estrategia cuya primera fase consiste en la multiplicación y crecimiento de los movimientos transformadores. La segunda es su integración a todos los niveles. D Bollier & P. Conaty afirman que hay “un potencial enorme de aumento de la coordinación y colaboración” entre las múltiples plataformas existentes de software libre, diseño abierto y hardware abierto (2014, p. 35). En 2016 se celebró una conferencia en el Parlamento Europeo a la que asistieron más de 150 representantes de 21 países y diversos europarlamentarios. En ella crearon la *European Commons Assembly*. En la última fase se pretende lograr la convergencia con el cooperativismo clásico, las PYMES y las empresas con una misión social. Pero la tarea prioritaria es “promover la colaboración entre el cooperativismo y los bienes comunales” (Troncoso, 2017, p. 10). Los movimientos comunales aportarían un caudal inmenso de conocimiento y el cooperativismo su gran dimensión. Un informe de Dave Grace and Associates (DGA) para UNDESA, muestra que hay 2,6 millones de cooperativas en el mundo que tienen más 1000 millones de miembros y clientes. Estas cooperativas generan 250 millones de empleos, más que todas las grandes corporaciones. Obtienen unos ingresos de al menos 3 billones de dólares y están implantadas en 145 países (DGA, 2014).

J. Restakis no ve impedimento alguno en la convergencia con las PYMES, siempre que “traten con justicia a los empleados, no provoquen el control de mercados o a prácticas que dañan a las sociedades o al medio ambiente”. Las empresas con una misión social (conocidas como empresas B) están amparadas ya por 28 estados federados. Además, es necesario que se incorporen otros movimientos no económicos para que aporten sus respectivas culturas, como los movimientos ecologista, en pro de la justicia social (como sindicatos) o feminista (Restakis, 2016, p. 6; Bollier, 2015, p. 26; Ramos *et al.*, 2016, p. 195, 196; Kostakis *et al.*, 2015, pp. 128-132).

Por otro lado, se están produciendo múltiples iniciativas municipales y, en menor medida, de gobiernos regionales: re-municipalización de servicios; ciudades por el clima; ciudades y regiones 100% renovables; etc. Además, muchos municipios y algunas regiones están impulsando economías comunales y sostenibles. Y este soporte institucional es de vital importancia para el fortalecimiento de un proceso transformador. Sólo citaré dos movimientos por razones de espacio. En 2011 varios organismos (*Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña -ICCC-*, el *MIT Centre for Bits and Atoms*, la *Fab Foundation* y el Consistorio de la ciudad de Barcelona) lanzaron el proyecto *FabCities* en la conferencia de Lima. En 2014, con ocasión de una nueva conferencia desarrollada en Barcelona, su consistorio propuso la iniciativa de lograr ser autosuficientes en un 50% para 2054. En la conferencia del siguiente año se adhirieron a la iniciativa siete ciudades. A principios de 2017 había 16 iniciativas, doce ciudades (Barcelona, Boston, Somerville, Cambridge, Ekurhuleni, Shenzhen, Amsterdam, Toulouse, París, Sacramento, Santiago de Chile y Detroit), dos regiones (Kerala y Región Occitana) y dos estados (Buthan y Georgia). M. Bauwens y V. Niaros califican a esta iniciativa como “el programa más ambicioso en la actualidad” (2017, p. 64).

El ARTS (*Accelerating and Rescaling Transition to Sustainability*) es un programa impulsado con financiación de la Comisión Europea a desarrollar en tres años. Forman parte de la iniciativa Brighton, Budapest, Dresde, Gante y Estocolmo. El programa pretende que las ciudades creen un plan de acción mediante un proceso participativo para definir iniciativas de transición hacia la sostenibilidad basadas en colectivos de actores locales (movimientos cívicos, movimientos comunales, gobiernos municipales, empresas...). La ciudad de Gante comisionó a *P2P Foundation* para evaluar el movimiento comunal existente (halló más de 500 iniciativas), explicar las razones de su emergencia y proponer medidas para fortalecerlo. Y la ciudad pretende crear una plataforma de transición que contará con una Asamblea Comunal y una Cámara Comunal y será asesorada por un grupo de expertos (Bauwens & Onzia, 2017, pp. 6-10).

Por último, la *P2P Foundation* considera que coexisten dos tipos de capitalismo: el tradicional de producción manufacturera y el que llaman cognitivo. Éste

presenta dos formas, una mundial y otra distribuida. La primera gestiona Internet por medio de múltiples empresas, entre las que destacan Google, Twitter y Facebook. Las redes digitales constituyen el modo principal de organizar la producción y las relaciones socio-económicas. Se basa en la apropiación del conocimiento, gracias a su propiedad de las plataformas que operan en Internet, pero bajo el dominio del capital financiero. Este capitalismo genera escasez de conocimiento y lo privatiza, convirtiendo la cultura en una mercancía. Su forma distribuida está representada por empresas que mediante la creación de plataformas digitales controlan diversos gremios. Son los casos de TaskRabbit (gremios), Uber (taxistas) o Amazon (que tiene múltiples actividades). Someten a los trabajadores condiciones laborales muy precarias. El primer capitalismo sigue siendo dominante pero está en declive por la disminución de beneficios, porque la competencia rebaja cada vez más los precios. Por el contrario, el segundo crece de forma explosiva, aunque su dinámica se irá ralentizando debido a que su actividad también se ve sometida a la tendencia de los rendimientos decrecientes. La alternativa a los dos capitalismoes es la economía comunal y sostenible. Se ha pasado de una fase de crecimiento lento a la actual de crecimiento rápido. Y se presenta como el único modelo económico capaz de superar el modelo de producción capitalista (Kostakis *et al.*, 2016a, pp. 84-86; Kostakis & Bauwens, 2014, pp. 21-33).

Pero para ello, muchos autores consideran necesario la creación de una masa crítica de personas muy evolucionadas. Se las denomina de otras muchas formas. J. Ramos, M. Bauwens y V. Kostakis declaran que la perspectiva P2P está de acuerdo con “la visión de la necesidad de un despertar espiritual”. Y es una espiritualidad “basada en la exploración común de la herencia espiritual de la humanidad” (Ramos *et al.*, 2016, p. 196). S. Bloemen y D. Hammerstein opinan que los cambios sociales están a menudo “enraizados en un cambio cultural”, por lo que éste “es un factor clave de la transformación social” (2017, p. 7). La AEMA declara que los valores y visiones que facilitan la transformación sistémica tienen “un rol fundamental” (EEA, 2016, p. 20). Por último, la bióloga evolucionista Elisabeth Sahtouris afirma que asistimos a un extraordinario renacimiento de la auto-suficiencia y sostenibilidad local, que es el resultado de la maduración humana: “El cuidado de otros y el compartir están sustituyendo al competir y acaparar, lo que es debido, en no poca medida, al empoderamiento creciente de la mujer, que siempre han sostenido esos valores. Y muchos lo vemos como un crecimiento o maduración de la humanidad” (2014, p. 4).

BIBLIOGRAFÍA

- ABEL, T. & STEPP, J. R. (2003). A new ecosystems ecology for anthropology. *Conservation Ecology*, 7 (3), 12.
- ALLAKHVERDIEV, S. I. *et al.* (2010). Photosynthetic energy conversion: hydrogen photoproduction by natural and biomimetic systems. In Mukherjee, A. (Ed.). *Biomimetics, learning from nature*. Croatia: In-Tech.
- ALLEN, C. R. (2014). Panarchy and Application. *Ecosystems*, Volume 14, Issue 4.
- ANDERIS, J.M. *et al.* (2013). Aligning Key Concepts for Global Change Policy: Robustness, Resilience, and Sustainability. *Ecology and Society*, 18(2), p. 8.
- BAUWENS, M. (2014). *A Commons Transition Plan*. Commons Transition. Obtenido de <http://commonstransition.org/a-commons-transition-plan/>.
- BAUWENS, M. & KOSTAKIS, V. (2014). From the Communism of Capital to Capital for the Commons: Towards an Open Co-operativism. *Triple C*, 12 (1), CSIRO.
- BAUWENS, M., KOSTAKIS, V., PAZAITIS, A. (2018). *Peer-to-Peer: The Commons Manifesto*. London: Westminster University Press.
- BAUWENS, M., & NIAROS V. (2017). Re-dynamising Local Economics in the Age of Trumpism. *Journal of Futures Studies*, 21(3), 101-106.
- BAUWENS, M. *et al.* (2017). Commons Transition and P2P: a primer. *Transnational Institute*.
- BAUWENS, M. & ONZIA, J. (2017). *Commons Transition Plan for the City of Ghent*. Obtenido de http://commonstransition.org/commons-transition-plan-city-ghent/#_ftn.
- BENIFAND, K. *et al.* (2015). *Re-imagining the Future: The Biomimetic Economy*. *Proceedings of RSD3*. Third Symposium of Relating Systems Thinking to Design. Oslo, Norway: Oslo School of Architecture and Design.
- BENYUS, J. (1998). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. New York: Quill / William Morrow.
- BENYUS, J. (2009). *What do you mean by the term of biomimicry?* Obtenido de www.biomimicryinstitute.org.
- BENYUS, J. (2010). *The Biomimicry Institute. Inspiring, educating and connecting biomimics throughout the world*. Obtenido de www.biomimicryinstitute.org.
- BRISTOW, G.; HEALY, A. (2014). Regional Resilience: An Agency Perspective. *Regional Studies*, 48(5).
- BLOEMEN, S. & HAMMERSTEIN, D. (2017). *Supporting the Commons. Opportunities in the EU policy Landscape*. European Cultural Foundation, Heinrich Böll Foundation
- BOLLIER, D. (2014). *The Commons as a Template for transformation*. *Great Transition Initiative*. Obtenido de <http://greattransition.org/publication/the-commons-as-a-template-for-transformation>.
- BOLLIER, D. (2015). *Reinventing Law for the Commons*. *Heinrich Böll Foundation*. Obtenido de https://www.boell.de/sites/default/files/reinventing_law_for_the_commons_memo.pdf.
- BOLLIER, D. (2016). *Transnational Republics of Commoning. Friends of the earth*. Obtenido de <http://www.bollier.org/blog/transnational-republics-commoning>.
- BOLLIER, D., & CONATY, P. (2014, September). *A new alignment of movements?* A report on Common Strategies Group Workshop, Meissen.
- BONAIUTI, M. (2017). Are we entering the age of involuntary degrowth? *Journal of Cleaner Production* (in press).

- BRAUN, A. (2017). *Photoelectrochemical and Bio-electrochemical Cells for Decentralized Fuel and Chemical Production*. European Commission Futurium. Obtenido de <https://ec.europa.eu/futurium/en/content/direct-conversion-solar-energy-renewables-and-more>.
- CAPRA, F., LUISI, P. L. (2014). *The Systems View of Life*. Cambridge: Cambridge University Press
- CARPINTERO, O. (2006). *La bioeconomía de Georgescu-Roegen*. Madrid: Montesinos.
- COSTANZA, R. (1993). Developing ecological research that is relevant for achieving sustainability. *Ecological Applications*, 3(4).
- COSTANZA, R. *et al.* (2013). The Future We Really Want. *Natural Capital Solutions*, 4 (4), pp. 37-43.
- DALY, H. (2015). *Economics for a Full World*. Great Transition Initiative. Obtenido de <http://www.greattransition.org/images/Daly-Economics-for-a-Full-World.pdf>.
- DGA (Dave Grace Associates) (2016). *Global Research on Augmented Collaborative Economy*. UNDESA.
- DRAKE, W. J. *et al.* (2016). *White Paper. Internet Fragmentation: An Overview*. Geneva: WEF.
- EC (European Council) (2015, November). *The Promotion of the social economy as a key driver of economic and social development in Europe*. European Council.
- EEA (European Environmental Agency) (2016). *Sustainability: Now for the long term*. EEA Transitions. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- EKLIPSE Expert Working Group (2017). *An impact evaluation framework to support planning and evaluation of nature-based solutions projects*. Expert Working Group on Nature-based Solutions to promote Climate Resilience in Urban Areas.
- EXPERT GROUP ON NATURE-BASED SOLUTIONS AND RE-NATURING CITIES (2015). *Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- DALY, H. (2015). *Economics for a Full World*. A Great Transition Initiative. Obtenido de <http://www.greattransition.org/publication/economics-for-a-full-world>.
- FRIESS, P., & RIEMENSCHNEIDER, K. (2016). New Horizons for the Internet of Things in Europe. En Vermesan, O. & Friess P. (Eds.). *Digitalizing the Industry, Internet of Things. Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds*. Gistrup & Delft: River Publishers.
- GARMESTANI, A.S. *et al.* (2009): Panarchy: Discontinuities Reveal Similarities in the Dynamic System Structure of Ecological and Social Systems. *Ecology and Society*, 14 (1), 15.
- GIOTITSAS, C., RAMOS, J. (2017). *A New Model of Production for a New Economy*. P2P Foundation.
- GOERNER, S. (2013). Corrective lenses: How the laws of energy networks improve our economic vision. *World Futures*, 69.
- GOERNER, S. *et al.* (2014). *What energy science network science can teach us about resilience and the larger story of systemic health and development*. The Integral Institute.
- GOERNER, S., LIETAER, B., & ULANOWICZ, R. E. (2009). Quantifying economic sustainability: Implications for free-enterprise theory, policy and practice. *Ecological Economics*, 69, 76–81.
- GOERNER, S. *et al.* (2015). Using Energy Network Science (ENS) to connect resilience with the larger story of systemic health and development. *Emergence: Complexity and Organization*, 17 (4).
- GOWDY, J., & KRALL, L. (2013). The ultrasocial origin of Anthropocene. *Ecological Economics*, 95, 137–47.
- HLPEP (High-Level Panel of Eminent Persons) (2013). *A New Global Partnership*. New

York: United Nations Publications.

- HOMER-DIXON, T. (2011). Our Panarchic Future. *World Watch Magazine*, Vol. 22, No. 2.
- HRASTEJ, N., & VILELA, B. (2016). *A vision for sustainable chemistry production*. Belgium: EuChemMS.
- IUCN. (2012). *World Environmental Hubs*. IUCN. Obtenido de <https://www.iucn.org/regions/europe/projects/world-environmental-hubs>.
- JORGENSEN, S. E., & NIELSEN, S. N. (2015). Hierarchical networks. *Ecological Modelling*, 295, 59-65.
- JORGENSEN, S. E., & NIELSEN, S. N. (2013). The properties of the ecological hierarchy and the application as ecological indicators. *Ecological Indicators*, Vol. 28, 48-53.
- KOSTAKIS, V. *et al.* (2015). Digital Global, manufacture local: Exploring the contours of an emerging productive model. *Futures*, 73, 126–135.
- KOSTAKIS, V. *et al.* (2016a). Towards a political ecology of the digital economy: Socio-environmental implications of two competing value models. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 18, 82-100.
- KOSTAKIS, V. *et al.* (2016b). The convergence of digital commons with local manufacturing from a degrowth perspective. *Journal of Cleaner Production*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616314184>.
- LEPORA, N. F. *et al.* (2013). *The state of the art of biomimetics*. *Bioinspiring Biomimetics*, 8. Doi: 10.1088/1748-3182/8/1/013001.
- LERCH, D. (2015). *Six Foundations for Building Community Resilience*. Santa Rosa: Postcarbon Institute
- LASZLO, E. (2014). *The Self-Actualizing Cosmos*. Rochester: Inner Traditions.
- MAGDOFF, F. (2013) Twenty-first-century land grabs: Accumulation by agricultural dispossession. *Monthly Review*, 65, 6.
- MARTIN, R. (2012). Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks. *Journal of Economic Geography*, vol. 12, issue 1, 1-32.
- NIAROS, V., *et al.* (2017). *Making (in) the smart city: The emergence of makerspaces*. Telemat. Informat. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tele.2017.05.004>.
- NIELSEN, S. N. (2007). What has modern ecosystem theory to offer to cleaner production, industrial ecology and society? The views of an ecologist. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, No. 17, 2007, p. 1639-1653.
- NIELSEN, S. N., & MULLER, F. (2009). Understanding the functional principles of nature. *Ecological Modelling*, 220, 1913-1925.
- NIELSEN, S. N. (2011). Thermodynamic constraints of life as downward causation in ecosystems. *Cybernetics & Human Knowing*, vol. 16, 27-49.
- MULLER, F. (2009). Understanding the functional principles of nature-proposing another type of ecosystem services. *Ecological Modelling*, Vol. 220, 1913-1925.
- MULLER, F. & JORGENSEN, S. E. (2013). Goal functions, orientors and indicators in ecology. *Ecological Indicators*, 28 (31).
- ODUM, E. P. (1992). *Ecología: Bases Científicas para un nuevo paradigma*. Barcelona: Vedral.
- ODUM, E. P. & SARMIENTO, F. O. (1998). *Ecología. El puente entre ciencia y sociedad*. Mexico D. F.: McGraw Interamericana.
- OECD (2016). *The Next Industrial Revolution*. OECD. Obtenido de <http://www.oecd.org/>

- sti/ind/next-production-revolution.htm.
- O'NEILL, R. V. *et al.* (1986). *A hierarchical concept of ecosystems*. Princenton: Princenton University Press.
- PEACOCK, K. A. (2011). *Symbiosis in Ecology and Evolution*. In K. Laplace, B. Brown, K.A. Peacock (Ed.), *Philosophy of Science*, Volume 11, Elsevier.
- PANDIT, A. & CRITTENDEN, J. C. (2015): Resilient Urban Systems: Where We Stand Now and Where We Need to Go. *Solutions Journal*, 2015-04-24
- RAMOS, J. *et al.* (2016): P2P and Planetary Futures. D. Banerji & M. R. (eds). *Critical Posthumanism and Planetary Futures*. New Delhi: Springer
- RATTER, B. (2017). Alive to solutions. *Our Planet, the magazine of UN Environment*. UNEP.
- RAYE, J. (2014). Fractal Organization Theory. *Journal of Organizational Transformation & Social Change*, Vol. 11, 1.
- RESTAKIS, J. (2014). *Public Policy for a Social Knowledge Economy. Transition Initiative*. Obtenido de <http://commonstransition.org/public-policy-for-a-social-knowledge-economy/>.
- ROCKEFELLER FOUNDATION (2015). *100 resilient cities*. Rockefeller Foundation. Obtenido de <https://www.rockefellerfoundation.org/our-work/initiatives/100-resilient-cities/>.
- SAHTOURIS, E. (2014). Ecosophy: Nature's Guide to a Better World. Kosmos. *Journal for Global transformation*. Retrieved from <https://www.kosmosjournal.org/article/ecosophy-natures-guide-to-a-better-world/>.
- SCHWAB, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum.
- SCHOLZ, T. (2016). *Platform Cooperativism. Challenging the Corporate Sharing Economy*. New York: Rosa Luxemburg Stiftung.
- SCHUTZ, J. (1999). The value of economic reasoning. *Ecological Economics*, 31, 23–29.
- TRONCOSO, S. (2017). *Greece: Alternative Economies & Community Currencies*. P2P Foundation. Obtenido de <https://blog.p2pfoundation.net/greece-alternative-economies-community-currencies-pt-1/2017/11/16>.
- TRONCOSO, S. & UTRATEL, A. M. (2017). *From Platform to Open Cooperativism*. Obtenido de <http://www.resilience.org/stories/2017-04-21/from-platform-to-open-cooperativism/>.
- TFSSE (Inter-Agency Task Force on Social and Solidarity Economy). (2014, September). *Social and Solidarity Economy and the Challenge of Sustainable Development*. Executive Summary of a TFSSE Position Paper.
- THE NATURAL EDGE PROJECT (2008). *The Role of Chemistry in Sustainable Development*. Natural Edge Project & Griffith University.
- UNCSD (2012). *Our Common Future*. UNCSD. Obtenido de <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
- UNEP (2012). *Nature and its role in the transition to a green economy*. UNEP. Obtenido de https://ieep.eu/uploads/articles/attachments/28e9e60d-c56b-479b-8024-3ef927e934e6/TEEB_Nature_the_green_economy_Executive_Summary.pdf?v=63664509780.
- UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2012). *Making cities resilient: my city is ready*. Geneva: UNISDR.
- UNISDR (2014). *Social and Solidarity Economy*. Rosa Luxemburg Stiftung. Obtenido de <http://www.rosalux-nyc.org/social-and-solidarity-economy/>.
- VERMESAN, O. (2016). IoT Digital Value Chain Research, Innovation and Development. En Vermesan, O. & Friess P. (Eds.). *Digitalizing the Industry, Internet of Things. Con-*

- necting the Physical, Digital and Virtual Worlds*. River Publishers Series in Communications.
- ZORACH, A., & ULANOWICZ, R. E. (2003). Quantifying the Complexity of Flow Networks. How many roles are there?. *Complexity*, Vol.8, 3.
- WALTZ, K.N. (1999). Globalization and Governance. *Political Science and Politics*, Vol. 32, 4.
- WEBER, A. (2013). *Enlivenment. Towards a fundamental shift in the concepts of nature, culture and politics*. Berlin: Heinrich Böll Stiftung.
- WEF (2013). *Perspectives on a Hyperconnected World*. Obtenido de http://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC_PerspectivesHyperconnectedWorld_ExecutiveSummary_2013.pdf.
- WEF (2016). *Inspiring Future Cities & Urban Services*. Obtenido de http://www3.weforum.org/docs/WEF_Urban-Services.pdf.
- WIND EUROPE (2016). *Wind in Power. 2016 European statistics*. Wind Europe. Obtenido de <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-in-power-2016/>.
- ZORACH, A., & ULANOWICZ, R. E. (2003). Quantifying the Complexity of Flow Networks. How many roles are there? *Complexity*, Vol.8, 3.

Modelo de optimización combinatoria para bioflujos del transporte. Área metropolitana de La Paz y El Alto

Vania Susana Calle Quispe

Universidad Mayor de San Andrés UMSA-FAADU
Universidad Pública de El Alto UPEA (Bolivia)

En la coyuntura actual, la resolución a los problemas urbanos y territoriales se lleva a cabo a través de planteamientos y metodologías que priorizan el uso de suelo y la ocupación del territorio². Estos enfoques proponen la formulación de planes urbanos a través de un diagnóstico, evaluación, propuesta y estrategias de intervención a escala urbana que parten de los espacios construidos como lugares centrales de desarrollo de capacidades y de la priorización de la regulación de uso y ocupación. Sin embargo, existe una disociación entre los hechos construidos y los actores que viven el propio espacio. Teniendo en cuenta lo anterior y de acuerdo a lo afirmado por Hugo Arrillaga y su equipo de investigación:

El enfoque del planeamiento físico, tanto la visión económica como la visión social del desarrollo, no ocupan el lugar de elementos explicativos, [...]. En este enfoque, se reconoce en los elementos del espacio construido una capacidad para determinar o facilitar las tendencias de desarrollo urbano y territorial. [...] Por consiguiente, se apunta a ordenar el territorio en función de las tendencias de crecimiento y de desarrollo³.

Este enfoque reproduce una visión tradicional, en la que todo el proceso de planificación y su desarrollo posterior dependen del estado o de gobiernos municipales como los principales actores en la toma de decisiones. Su orientación pone el énfasis en una necesidad de sistematización y homogeneización de prácticas, de tal modo que el concepto de desarrollo se reduce a una búsqueda por mantener o elevar el PIB (Producto Interno Bruto). Resulta evidente que esta perspectiva da cabida a los modelos clásicos en la consideración de lo urbano, los cuales

tienden a expresar una concepción del futuro como un estado de situación estático y definido, cuya concreción depende de la realización de las acciones previstas [...]. Esto implica, [...] supuestos implícitos, de los cuales destacaremos tres: el primero, que es posible conocer y controlar la totalidad de los factores, y de los actores, de cuya acción depende el logro de los objetivos de la planificación [...];

el segundo, que la totalidad de las consecuencias de la acción son predecibles y controlables; y el tercero, que el futuro como estado de situación es, por lo tanto, predecible. Por lo cual es comprensible que, desde los enfoques clásicos, el futuro se conciba como algo posible de ser construido a partir la acción basada en el saber técnico y en el poder centralizado del Estado⁴.

Estos tres supuestos mencionados recaen en el paradigma positivista, que centra su interés en la búsqueda de predicciones generalizadas al margen del contexto y tiempo bajo una lógica de causa-efecto. Siendo así, el investigador apoya su trabajo en las ciencias empíricas⁵, creyendo tener la facultad de controlar y predecir hechos futuros desde una mirada externa al propio objeto de estudio, despojada de subjetividades y en un supuesto plano de neutralidad. Ante este escenario, pese a que las metodologías de planificación territorial han ido cayendo recurrentemente en modelos de visión tradicional con resultados simplificadores, es preciso considerar, no obstante, que las ciencias de la física, las ciencias de la biología y las ciencias de la complejidad han demostrado la existencia de un nuevo paradigma en el que se valoriza lo heterogéneo y se entiende la realidad desde una idea de transdisciplinariedad que deriva de las interacciones y bifurcaciones dinámicas espacio-temporales. En consecuencia, la problemática de la planificación urbana descansa en la discusión de los mecanismos que hacen posible su participación en el espacio. Es en este punto donde nos preguntamos si es posible un nuevo paradigma que supere la visión tradicional, frente a los desafíos medioambientales, sociales, económicos, tecnológicos y de gestión que depara el futuro.

En este sentido y en relación con los problemas centrales concretos que se están produciendo a este respecto en los Municipios de La Paz y El Alto (Bolivia), las recientes políticas públicas relativas al sistema vial y de transporte, han dado como resultado la implementación de buses y rutas de operación a escala urbana, teniendo en cuenta que un 74% de los viajes se realizan en transporte público⁶, lo que da lugar a un total de 25.000⁷ viajes de pasajeros en transporte (en horas punta), entre las ciudades de La Paz y El Alto. Desde este punto de vista, estudios como el informe final del año 2015 sobre el Bus Sariri⁸ de El Alto elaborado por la Fundación *Swisscontact* hacen hincapié en la apertura y el recorrido de rutas para el desplazamiento del bus. Asimismo, la implementación del Bus Puma Katarí en la Ciudad de La Paz pretende expandir, en un futuro, su recorrido a fin de conformar un Sistema BRT (*Bus de Tránsito Rápido*) en las principales vías de la ciudad de La Paz. Ante esta estrategia, resulta necesario diferenciar dos elementos desde una perspectiva basada en la complejidad: la planificación territorial tradicional concentra sus esfuerzos en el tipo de transporte, aspecto éste que no ha contribuido a una disminución del problema de congestión vehicular ni ha aumentado la demanda de la población de este servicio. Por estas razones, se considera que el problema central no es únicamente el transporte. La resolución

del congestionamiento y tráfico vehicular en el área metropolitana de La Paz y El Alto, debe considerar las necesidades inherentes de los habitantes que desarrollan sus actividades. En consecuencia, el problema central radica en un inexistente plan de área metropolitana que analice los bioflujos de desplazamiento y, con ello, la conexión de las membranas físicas y mentales de ambas ciudades. Este aspecto es esencial ya que, según Antoni Gutiérrez Rubí,

las ciudades [...] del siglo XXI ya no son solo un territorio, un espacio delimitado, definido por sus límites administrativos. Por este motivo, ya no podemos gobernar únicamente con mapas [...]: hay que ver todas las capas de la realidad si queremos transformarla. Las capas de relaciones, flujos, datos, vínculos y causalidades que generan la actividad de las personas y su dinámica composición organizativa. Las administraciones locales y metropolitanas ya no pueden limitarse a su actuación sobre la dimensión física, si desean gobernar el bien común y ampliar el espacio de lo público. Un mundo de regulaciones (del tráfico o del suelo, por ejemplo) es imprescindible, aunque no suficiente, para embridar el desarrollo autónomo de la actividad humana, que tiende siempre al desorden que hipoteca el futuro o divide el presente de los más desfavorecidos⁹.

En consecuencia, el área metropolitana de La Paz y El Alto se encuentra articulada por flujos vehiculares que responden a múltiples intereses de los conductores. Pero las intervenciones llevadas a cabo por parte de los gobiernos municipales y la gobernación de La Paz se han limitado a proyectos de mantenimiento o ampliación vial en el sector de la autopista, dejando de lado la planificación de flujos complejos que tejen ambas ciudades. Por otro lado y de acuerdo al artículo 298 de la CPE, se señala que, entre las competencias privativas del Estado, se encuentra la creación, control y administración de las empresas públicas estratégicas, aspecto éste que sirvió de base para la implantación de dos líneas de teleférico que articulan La Paz y El Alto. Esta intervención sobrepasa la administración municipal de ambas ciudades, así como también la propia delimitación de límites. Sin embargo, es una intervención pensada para el área metropolitana.

En este sentido, la presente investigación abordó la problemática de articulación y congestionamiento vehicular entre las ciudades de La Paz y El Alto a través del modelo de planteamiento y planificación de los bioflujos que articulan ambas ciudades. Este estudio se centró en ocho puntos de conexión e interrelación (ver mapa 1) y su objetivo central ha sido el de contribuir, desde una perspectiva urbana y teniendo en cuenta la plasticidad, la innovación y los nuevos elementos de análisis para geografía alternativa aportados por el sistema basado en bioflujos, a la profundización de la democracia territorial. Asimismo, este estudio introduce elementos de análisis en la discusión sobre un modelo finito de optimización combinatoria, con una prospectiva a largo plazo, orientado a dicha área metropolitana.



Mapa 1. Lugar de investigación: municipios de La Paz y El Alto



Foto 1. Congestionamiento vehicular: ciudad de El Alto
Fuente: Vania Calle (2017).

Materiales y Métodos

Los materiales y métodos empleados en la investigación se basaron en la recogida de datos cualitativos y cuantitativos a través de la realización de encuestas y entrevistas a los conductores de movibilidades interciudad. De igual manera, se realizó una prospección de información existente en las dependencias encargadas del transporte de las ciudades de La Paz y El Alto.

Tipo de investigación

El tipo de investigación, es de carácter prospectivo¹⁰, esto es, un enfoque con una visión global, sistémica, dinámica y abierta que explica los posibles futuros, no sólo apoyándose en los datos del pasado, sino teniendo en cuenta también las evoluciones futuras de las variables cuantitativas y cualitativas, así como los comportamientos de los actores implicados. De esta manera, se trata de reducir la incertidumbre, aclarar la acción del presente y aportar mecanismos que conduzcan hacia un futuro aceptable, conveniente o deseado.

Muestra

Se diseñó cuatro preguntas de carácter abierto que fueron formuladas a los conductores de transporte interciudad. Dichas preguntas fueron las siguientes: 1. ¿Usted considera que aumentó el congestionamiento vehicular en comparación con hace 5 años?; 2. ¿En su sindicato de transporte, cuantos nuevos afiliados se han incorporado en los últimos 5 años?; 3. ¿Cuántos recorridos realiza al día?, ¿ha disminuido el número de recorridos en comparación con los últimos 5 años?, ¿ha notado una pérdida económica por el congestionamiento vehicular?; 4. Si tuviera que hacer menor recorrido en su trayecto, con mayor carga de pasajeros por hora ¿aceptaría un cambio?

De acuerdo a las respuestas obtenidas se obtuvieron los siguientes datos. En primer lugar, el 100% de los entrevistados considera que el congestionamiento vehicular aumentó en estos últimos 5 años debido a las siguientes razones: aumentaron nuevas líneas de transporte provenientes de las juntas vecinales, no existen rutas alternativas para superar los congestionamientos, la aduana autoriza el ingreso de vehículos en grandes cantidades, el parque automotor no responde a la infraestructura vial, los vehículos interciudad provenientes de municipios como Laja y Viacha congestionan la red vial, los micros se ven afectados por la presencia de minibuses en las horas punta, el congestionamiento vehicular aumentó debido a la presencia de los comerciantes que se asientan en aceras y áreas de circulación vehicular.

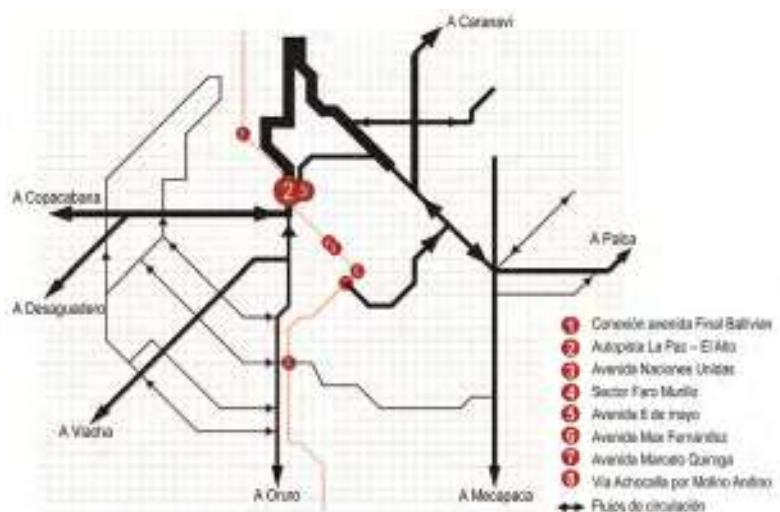
Por otra parte y de acuerdo a los resultados de la encuesta, el ingreso de nuevos afiliados en algunos sindicatos es muy restrictivo (siendo 10 el número más bajo), mientras que en otros casos existe una variación notable de nuevos integrantes, oscilando entre 45, 241 y hasta 758 nuevos afiliados. A su vez, los conductores indicaron que realizan entre 2 (como mínimo), 6 y hasta 15 recorridos al día por las siguientes razones: tienen que hacer fila y esperar el turno de cada movilidad para liberar la calle ocupada, existe un gasto económico de gasolina en puntos de congestión vehicular, existen también minibuses parados que ocupan el espacio de las vías. En comparación con años anteriores, han disminuido los recorridos hasta llegar a la mitad, pero el costo de mantenimiento de vehículos ha aumentado en comparación con años pasados (una llanta costaba 300 bolivianos y ahora cuesta 700 bolivianos). En tal sentido, el 60% de los entrevistados estaría de acuerdo con un cambio en el diseño de rutas (tienen la perspectiva de que podría mejorar su situación), mientras que el 40% de los conductores todavía teme grandes cambios ya que consideran que no sería beneficioso para su sector.

Resultados

Modelo actual de circulación del transporte en el área metropolitana de La Paz y El Alto

De acuerdo a los datos, desplazamientos y direcciones vehiculares, el modelo actual de flujos del transporte sigue una estructura centralizada, siendo los nodos de la autopista La Paz-El Alto y la Avenida Naciones Unidas las de mayor carga de pasajeros (alcanzando un promedio de 1383 minibuses de intercambio, lo que representa un total de 19.362 pasajeros en hora punta)¹¹. El actual modelo centralizado de circulación vehicular en el área metropolitana de La Paz y El Alto se compone de dos nodos centrales. Este hecho genera un impacto significativo a nivel metropolitano, regional y nacional, debido a que la vía de la autopista La Paz-El Alto se encuentra catalogada, por parte de la *Administradora Boliviana de Carreteras* (ABC), como parte de la red vial fundamental.

De entre los fenómenos que se producen en el modelo centralizado de flujos vehiculares cabe destacar los siguientes: concentración del poder de control del espacio público por parte de algunos sindicatos, se restringe el paso al transporte privado, poca efectividad de las políticas públicas, inequidad social e inequidad territorial, elevación de los costos sociales y económicos, pérdida económica en los conductores de transporte público, pérdida económica para los productores, inseguridad social y alta concentración de contaminación ambiental.



Esquema 1. Modelo actual de circulación del transporte en el área metropolitana de La Paz y El Alto. Fuente: Elaboración propia

Modelo Prospectivo para el Sistema de Bioflujos del Transporte

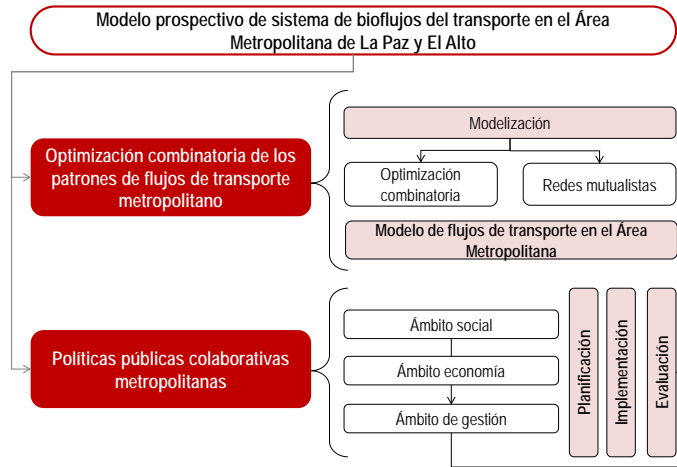
El Modelo Prospectivo para el *Sistema de Bioflujos del Transporte* contempla dos aspectos centrales que se describen a continuación:

A) *Optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano.* Se refiere a la modelización a partir de los algoritmos que constituyen el flujo de desplazamientos, teniendo en cuenta, además, su optimización combinatoria y las redes mutualistas que se derivan de la bioinspiración.

B) *Políticas públicas colaborativas metropolitanas de los sistemas de transporte y actividades.*

Tiene que ver con el diseño de los ejes de actuación a nivel social, económico y de gestión para la adecuada planificación, implementación y evaluación de los sistemas de actividades y el transporte.

Este planteamiento, en definitiva, responde a la necesidad de poder contribuir a una adecuada reproducción social y económica en el área metropolitana de La Paz y El Alto. Por lo tanto, se propone la siguiente estrategia de actuación:



Esquema 2. Modelo prospectivo para para bioflujos del transporte
Fuente: Elaboración propia

La propuesta contempla el concepto de sistema de bioflujos, cuya composición se articula con base en factores de complejidad que se encuentran sujetos, por un lado, a las acciones sociales de los actores que intervienen en el territorio y, por otro lado, a las actuaciones de los gobiernos municipales que administran el territorio. Por tanto, es importante que las políticas públicas y la resolución de los problemas existentes se planifiquen de forma consensuada.

Optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano

Al haber elegido como estructura el modelo matemático de optimización, tenemos que elegir variables de decisión de tal forma que maximicen o minimicen la función objetivo, ya que estará sujeta a posibles restricciones que puedan surgir en el proceso. Para poder definir el modelo matemático, se debe contemplar el modo en que se modificaría la solución ante un cambio en los valores de los parámetros. De esta manera, se realizaron modelaciones con el software *grafos*, que trabaja con algoritmos de funciones combinatorias para hacer posible el análisis de caminos mínimos, arboles de recorridos máximos y mínimos, revisión de flujos y rutas, etc. En lo que se refiere al lugar concreto de la investigación, se procedió a la modelización en dos escenarios, uno, el actual, y otro, el prospectivo. Para tal fin se trabajó con las vías primarias que articulan las ciudades de La Paz y El Alto.

Los resultados de la optimización se obtuvieron a partir de la relación de menor recorrido y menor tiempo de distancia, identificándose el punto de conexión de equilibrio (29), en la Av. 8 de mayo, la cual se articula desde la Av. Cívica y Av. Panorámica en El Alto y con la Av. Julio Téllez en la Ciudad de La Paz. Este punto

se encuentra a una distancia de 732 metros de la estación del Teleférico Amarillo Parque Mirador. Según los resultados obtenidos por el algoritmo de Dijkstra, se ha comprobado que el recorrido vehicular entre las ciudades de La Paz y el Alto por la Autopista y Av. Naciones Unidas no es óptimo, debido a que se emplea mayor distancia y tiempo y, al mismo tiempo, los costos económicos, sociales y medioambientales son mayores.

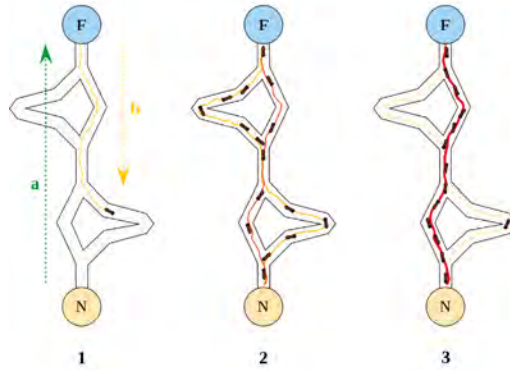
De igual modo, se encontró un segundo punto de conexión (31), en la Av. Marcelo Quiroga, que está conectada con la Av. Max Fernández en la Ciudad de La Paz y con la Av. Circunvalación en El Alto. Este punto es estratégico porque permite una articulación con la Av. Buenos Aires, que conecta con el Centro y Villa Fátima. También puede articularse con la Av. Los Sargentos que conecta con la Zona Sur y Mallasa.

Es importante destacar que la optimización será eficaz siempre y cuando la distancia y tiempo de recorrido vehicular se correspondan con las articulaciones viales. Por lo tanto, para despejar el sector de la Ceja de El Alto, se plantea la recomendación de establecer un puente de articulación desde la Av. Juan Pablo II hasta la Av. Panorámica. Esta conexión permitiría reducir la cantidad de vehículos que se concentran en la Ceja de El Alto, además de democratizar el espacio que se extiende por el sur de la frontera entre La Paz y El Alto.

Algoritmo de colonia de hormigas

La *Optimización por Colonia de Hormigas*, *Ant Colony Optimization* (ACO), es una metaheurística que pertenece a la rama de la *Inteligencia de Enjambres*, *Swarm Intelligence*. Fue propuesta por Marco Dorigo en 1992¹², quien analizó el comportamiento comunicativo de las hormigas que se guían por las feromonas para buscar de alimento. Estas sustancias bioquímicas van señalando los caminos por donde se desplazan las hormigas. De tal modo que, a mayor cantidad de feromonas mayor será la cantidad de hormigas que atraviesen un determinado sector y, en consecuencia, menor camino recorrido. Este mecanismo particular se conoce como *stigmergia*¹³, concepto planteado en 1959 por el biólogo francés Pierre-Paul Grassé, y que proveniente del término stigma, esto es aquello que deja marcas y signos químicos en el ambiente para coordinar el trabajo ergon.

Si tenemos en cuenta un punto de inicio F, y un punto de alimento de nutrientes final para las hormigas N, este enfoque analiza el recorrido que realiza una hormiga mientras libera feromonas o marcas durante su recorrido. Cuando la cantidad de hormigas aumenta se va haciendo más fuerte la concentración de feromonas a lo largo del camino más corto, lo que posibilita que el resto de hormigas caminen en el camino marcado. Véase al respecto el siguiente esquema:



Esquema 3. Optimización por colonia de hormigas

Fuente: Ideas sobre la estigmergia humana (2010).

<https://pseudopodo.wordpress.com/2010/09/30/ideas-sobre-la-estigmergia-humana/>

El algoritmo¹⁴ tiene tres fórmulas claves: la probabilidad de ir de un punto x a un punto y, la actualización de feromonas y el depósito de feromonas. Véase al respecto las siguientes fórmulas:

Probabilidad de ir de x a y:

$$p_{xy}^k = \frac{(t_{xy}^\alpha)(n_{xy}^\beta)}{\sum (t_{xy}^\alpha)(n_{xy}^\beta)}$$

Donde:

p_{xy}^k = Probabilidad de que la hormiga k recorra la distancia entre x-y del lugar L que no se ha visitado

(t_{xy}^α) = Feromona

(n_{xy}^β) = Distancia, costo

La distancia entre ciudades se obtiene por: $n_{xy} = \frac{1}{d_{xy}}$

Actualización de feromonas:

$$t_{xy} \rightarrow (1 - \rho)t_{xy} + \sum_k \Delta t_{xy}^k$$

Donde:

t_{xy} = Actualización de feromona total

$(1 - \rho)t_{xy}$ = Evaporación de feromona (se asigna un número entre 0 y 1 que es la tasa de evaporación)

$\sum_k \Delta t_{xy}^k$ = Depósito, activo de feromona, k= cantidad de hormigas total

Depósito de feromona

$$\Delta t_{xy}^k = \begin{cases} Q \setminus L_k \\ 0 \end{cases}$$

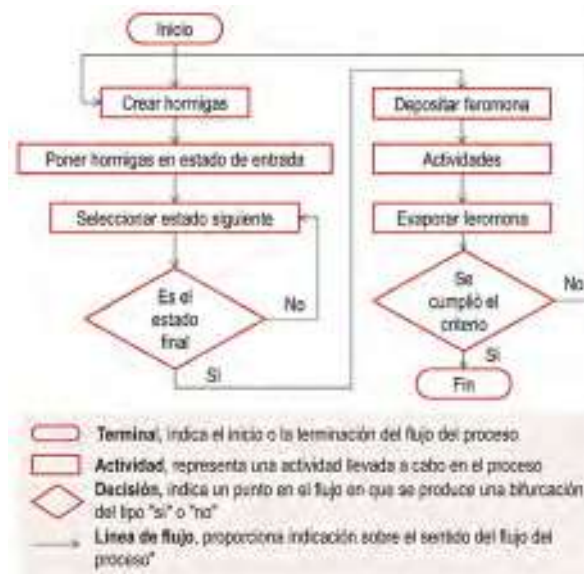
Donde:

Δt_{xy}^k = Depósito de feromona

Q = Constante que se fija por el investigador

L_k = Es la longitud del recorrido en los nodos por la hormiga¹⁵

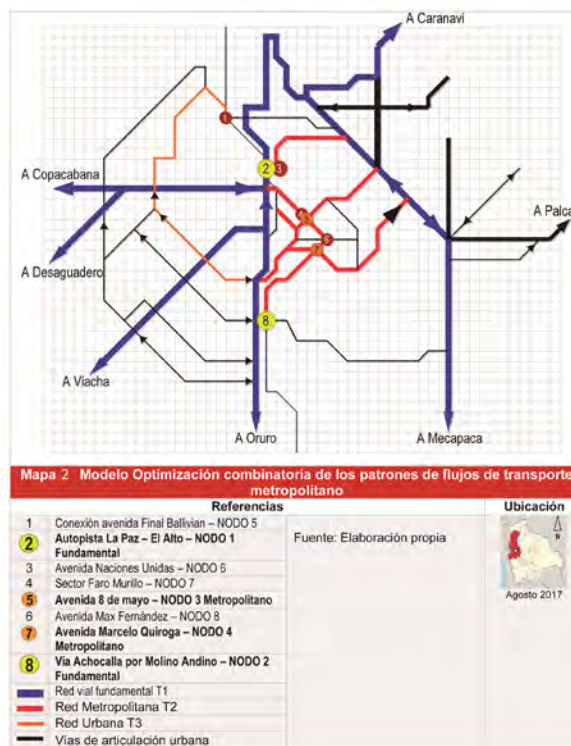
En consecuencia, el diseño del algoritmo sería el siguiente:



Esquema 4. Diagrama de flujo del algoritmo de colonia de hormigas
 Fuente: Elaboración propia con base en <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=71>

Para el cálculo de algoritmo de colonia de hormigas se aplicaron las tres fórmulas claves, es decir, la probabilidad de ir de un punto x a un punto y, la actualización de feromonas y el depósito de feromonas. Para hacer efectivo los recorridos se hizo uso del algoritmo de simulación de hormigas *java fx: Ant Algorithm Simulation*¹⁶.

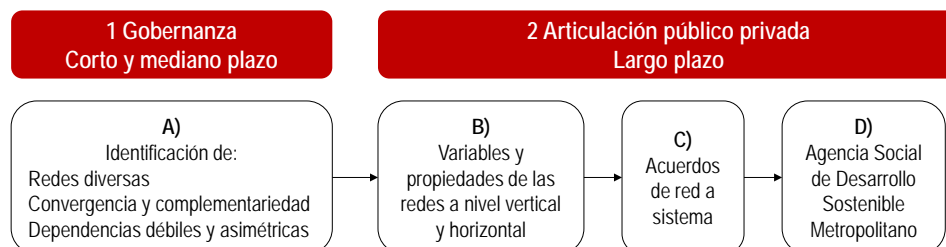
Basándonos en los estudios previos, se procedió a analizar los flujos de recorrido vehicular entre las ciudades de La Paz y El Alto tomando en consideración las rutas de mayor circulación. De esta forma, se ratifica que la menor distancia entre el punto A y el punto B se localiza en el nodo de la 8 de mayo. Se da la circunstancia añadida que ese punto es, precisamente, el de mayor preferencia por parte de las hormigas confirmando, de esta forma, los resultados del *algoritmo de Dijkstra*. Por tanto, resulta de gran importancia orientar los flujos de transporte a partir de un diseño específico de los nodos de articulación, de manera que puedan descongestionarse, a su vez, los nodos más concurridos. En este contexto, se proponen las siguientes jerarquías de nodos para los bioflujos de transporte metropolitano de acuerdo al modelo de optimización combinatoria.



Mapa 2. Modelo Optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano

*Redes mutualistas*¹⁷

Los actores sociales que presentan mayor cantidad de interacción son los gobiernos municipales de La Paz y El Alto y la gobernación del departamento de La Paz. Este panorama implica que las actuaciones políticas y de gestión urbana se enmarcan en una estrategia de gobernabilidad, concepto definido como “la capacidad de gobierno” que, en este caso, remite a un desarrollo territorial jerarquizado y piramidal, de arriba abajo. De esta manera, e preciso indicar que las interacciones actuales no acompañan al desarrollo del área metropolitana, debido a actuaciones particulares relacionadas con planes, programas y proyectos fraccionados y parciales puestos en práctica por cada municipio. En ese sentido, para la construcción territorial y la gobernanza del área, es importante poder generar un plan metropolitano que se encargue del diseño de políticas cuyo propósito sea articular los flujos socioeconómicos y ambientales en el área metropolitana. Para ello se propone el siguiente proceso a fin de que pueda ser asumido por los gobiernos municipales y sindicatos en primera instancia:



Esquema 5. Proceso para la construcción de gobernanza y articulación público-privada
Fuente: Elaboración propia

Gobernanza. Se plantea que se articule una estrategia de gobernanza a corto y mediano plazo cuya finalidad sea la identificación de redes diversas que sean convergentes y complementarias, además de dependientes, débiles y asimétricas. En esta etapa se deberá armar una matriz por cada tipo de articulación según corresponda. Una vez que se hayan obtenido los resultados, se deberá pasar a la articulación por parte de actores públicos y privados.

Articulación público privada. Se identificarán variables y propiedades de las redes a nivel vertical y horizontal. Las redes horizontales están referidas a la interacción entre los actores que se desarrolla en el territorio, y las redes verticales se centran en la interacción entre los diversos actores localizados en diferentes municipios

de la región.

Acuerdos de red a sistema. Los acuerdos deben llevarse a cabo en todo el proceso, con un cronograma establecido y con la participación activa de todos los actores. El resultado esperado es conseguir la conversión de las redes en sistemas vivos.

Agencia Social de Desarrollo Sostenible Metropolitano. Tras el diseño de la hipótesis y de los escenarios futuros sobre el grado de relación entre actores, se recomienda se crear la *Agencia Social de Desarrollo Sostenible Metropolitano*. Esta entidad, que generará un espacio de coparticipación conjunta entre los municipios de La Paz y El Alto, las redes y sistemas sociales, y el resto de los actores sociales, buscará consolidar su área de competencia mediante planes y programas, fortalecerá alianzas y estructurará las redes políticas públicas mediante la articulación con los actores de la región.

Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos, se confirma la hipótesis que sostiene la ineficacia del actual modelo de desplazamiento vehicular que articula las vías primarias del área metropolitana de La Paz y El Alto, a causa de los costos económicos de operación, de la contaminación y de las frecuentes demoras que tiene como efecto generar una situación de insostenibilidad, tanto para los municipios, como para los usuarios, transeúntes y conductores. Por tal razón, la modelación a través de la biomimesis, de la colonia de hormigas y redes mutualistas constituye una estrategia que permite una optimización de los flujos en las áreas urbanas y metropolitanas. De esta forma, la planificación territorial, al adoptar un enfoque crítico y complejo, adopta otra perspectiva para la resolución de problemáticas que tiene en cuenta la óptima reproducción socioeconómica de sus habitantes.

Conclusión

Las conclusiones que derivan de la presente investigación son las siguientes:

Según datos del censo 2012, el 67,3% de la población del país habita en áreas urbanas y el 32,7% en áreas rurales. Esto significa que la población en zonas urbanas ha aumentado en un 4,9% respecto al censo del 2001, motivo por el cual están surgiendo problemas urbanos que, en el caso de las ciudades de La Paz y El Alto, constituyen un freno para el desarrollo conjunto y para inversiones pri-

vadas. Uno de los problemas que identificó la encuesta realizada el año 2016 el *Observatorio La Paz como vamos*, de la *Fundación para el Periodismo*, tenía que ver con que la gente percibe como mayor problema el ordenamiento del transporte. Igualmente, en los talleres de Jornadas de investigación organizados por la UPEA, *Dirección de Ciencia y Tecnología* (DICyT), se recogieron demandas por parte de la *Federación de Juntas Vecinales El Alto* (FEJUVE), en las que se manifestaba como problema significativo el congestionamiento vehicular.

Entre las actuaciones propuestas por parte del estado y los gobiernos municipales de La Paz y El Alto para solucionar la demanda de transporte y el congestionamiento vehicular destaca la implementación del teleférico por parte del gobierno central a través de la creación de la empresa estatal *Mi Teleférico* y, por parte de los Municipios, la compra e implementación de los buses Puma Katari y Wayna Bus. No obstante, según datos del estudio de tesis de Maestría de la Ing. Micaela Álvarez, *Future Transit Network of La Paz Metropolitan Area-Bolivia* del año 2016, el 3.73% de la población utiliza el transporte del teleférico, y el 1,77% de la población usa el Bus Puma Katari. Estos datos dan cuenta de que el 71.57% de la población todavía usa el transporte público de minibuses o buses. Por tanto, las políticas adoptadas por el estado central y gobiernos municipales no ofrecen una solución en el contexto actual y menos a escala metropolitana.

De acuerdo a la nota CITE: SMM-DPTA Of. N° 103/2017 del 22 de agosto del 2017, se indica que, como medida para el descongestionamiento vehicular, desde el gobierno autónomo municipal de La Paz, “funciona el plan de restricción vehicular al centro paceño en días establecidos”. De igual modo, se señala que para articular La Paz y El Alto el teleférico y el bus Puma Katari forman parte del *Programa Integral de Transporte*. Por otro lado, según la nota CITE: SMMUS/DPMUS//UPMUS/060/2017 del 24 de julio de 2017, el gobierno autónomo municipal de El Alto pone de relevancia que en la actualidad se vienen realizando estudios centrados en los flujos de transporte. En conclusión, estas actuaciones por parte de los municipios y gobierno central, todavía no han dado resultados objetivos en tiempo y espacio. En este sentido, se considera que la visión tradicional de la planificación física del territorio sostenida por las instituciones públicas y el transporte en relación con los flujos vehiculares en el área metropolitana de La Paz y El Alto es problemática, debido a que las ciudades empiezan a tener otras dinámicas de actuación en sus ámbitos sociales, económicos y de gestión.

Como parte de las exploraciones que tratan de encontrar nuevas formas de resolución a problemáticas urbanas, se entendió adecuado asumir el pensamiento de las ciencias meta-heurísticas (más allá, encontrar) que trabajan con algoritmos. Desde este punto de vista, se considera importante integrar la visión aportada por la biomimesis como estrategia para emular el comportamiento de las colonias de hormigas y de otras redes mutualistas, en la medida en que vienen siendo un

ejemplo natural de beneficio mutuo entre plantas y animales. Estas nuevas exploraciones permitieron comprender mejor el desplazamiento más óptimo de los vehículos desde un punto origen a un punto destino.

En lo correspondiente al análisis histórico y social, se llevó a cabo una recopilación histórica sobre el desarrollo vial en el área metropolitana de La Paz y El Alto. De este estudio se pudo concluir que la autopista, realizada en 1977, fue el primer proyecto de articulación oficial entre La Paz y El Alto, a pesar de que la problemática del congestionamiento vehicular ha estado presente desde 1950 en la ciudad de La Paz. En este sentido, el modelo centralizado de distribución vial en la ciudad de El Alto se consolidó con la aparición de la autopista La Paz-El Alto, dando lugar a un fuerte flujo vehicular en el encuentro de las vías Juan Pablo II, y Av. 6 de marzo. En base a los datos recabados y a la clasificación vial, este proyecto identificó las vías de primer orden y 8 puntos de articulación vial entre La Paz y El Alto.

De igual manera, se realizó una lectura de las principales leyes a nivel nacional, departamental y municipal, referidas al transporte, al congestionamiento vehicular y a las vías. Como resultado de este análisis, cabe indicar que la gobernación de La Paz declara como prioridad y necesaria la conformación de una región metropolitana, fundamentada en la Ley de Autonomías, la Ley General del Transporte y la Ley Departamental de Régimen Tarifario del Sistema de Transporte por cable. Estos documentos normativos plantean el concepto de transporte intermunicipal como un medio de articulación, regulación, planificación y coordinación que debe existir entre dos o más ciudades. Por otro lado, el concepto de “sistema” es aplicado al transporte terrestre, por cable y de movilidad urbana, pudiendo incluirse también, a través de la gestión de convenios para la articulación con las rutas del teleférico, el transporte sindicalizado. Sin embargo, ninguna de estas leyes y decretos revisados hace mención a articulaciones intermunicipales por razones productivas o de empleo.

Al respecto de lo anterior, se realizó también una encuesta a los conductores que operan entre las ciudades de La Paz y El Alto, quienes manifestaron, en un 100%, que el congestionamiento vehicular aumentó en estos últimos 5 años debido a que no existen rutas alternativas y a que los comerciantes o vehículos que vienen desde Laja o Viacha ocasionan congestionamiento en las vías primarias que unen las ciudades de La Paz y el Alto. Por otro lado, la cantidad de nuevos afiliados a los sindicatos ha aumentado de 10 a 758 nuevos socios y, a su vez, ha disminuido en un 50% los recorridos que hace 5 años hacían por la cantidad de horas de espera en fila. Tal circunstancia ocasiona un gasto adicional en gasolina y pérdida económica para los conductores. Ante este panorama, un 60% de los entrevistados aceptaría un cambio en la planificación de su recorrido diario que le supusiese mayor ingreso económico y menor cantidad de horas de trabajo.

En base a los datos obtenidos de la encuesta, se realizó un estudio de demanda social del transporte que tuvo en cuenta los lugares de frecuente desplazamiento y los destinos con mayor demanda. De esta forma, se encontraron 4 rutas de mayor volumen. Por otra parte, los datos del Instituto Nacional de Estadística INE, sobre “Estadísticas del Parque Automotor, 2003-2016”, reflejan que durante el año 2016 en el área metropolitana existían 388.061 vehículos. Con este dato se llevó a cabo la proyección para el año 2025, en el que habría un total de 390.188 vehículos, distribuidos en su mayoría, en un 31%, por vagonetas, seguido en un 23% por automóviles y en un 11% por motos y minibuses. Comparando este panorama con el hecho de que el 71,57% de habitantes utilizan el transporte público, se puede sacar la conclusión de que las personas están adquiriendo con mayor fuerza vehículos particulares.

Respecto al cálculo del costo social producido por la congestión vehicular, se entrevistó a los conductores que operan entre La Paz y El Alto, obteniendo de esta forma tres escenarios de análisis. Escenario 1: conductor con renta de movilidad y con voceador. Escenario 2: conductor con vehículo propio y sin voceador. Y escenario 3: conductor con vehículo propio y con voceador. Teniendo en cuenta estos datos, se calculó el gasto económico a partir del planteamiento de una fórmula que tiene como indicadores la productividad, los precios de bienes por el incremento de los costos del transporte y el gasto de combustible quemado durante el congestionamiento. Los resultados fueron para el escenario 1 una pérdida económica de 109 bolivianos por hora de congestionamiento, para el escenario 2 una pérdida de 85 bolivianos, y para el escenario 3 una pérdida de 93 bolivianos. Estas cifras se cruzaron con la cantidad de vehículos parados en congestiones el día 11 de mayo del presente año en hora punta, teniendo como resultado una pérdida económica de 1.635.821,92 bolivianos por cada hora de congestionamiento vehicular para el escenario 1. Por tanto, éste es uno de los motivos por los cuales la ciudad es inviable en términos de reproducción socioeconómica, tanto en lo que respecta a los habitantes como a los conductores. Este panorama, caracterizado por un modelo centralizado de circulación del transporte en el área metropolitana de La Paz y El Alto genera una concentración del poder de espacio público por algunos sindicatos y la elevación de costos sociales y económicos, provocando inseguridad social y una alta concentración de contaminación ambiental.

Para poder optimizar el diseño actual se propuso el concepto de Modelo Prospectivo para el Sistema de Bioflujos del Transporte, que cuenta con dos ejes de actuación: una optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano y el establecimiento de políticas públicas colaborativas, a nivel metropolitano, en materia de transporte. Se realizó, de este modo, un trabajo de modelación para la optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano con el software grafos, que trabaja con el algoritmo de Dijkstra las

4 rutas más transitadas entre La Paz y El Alto. Con este sistema se localizaron otros nodos de desplazamiento que implican menor tiempo y distancia, comprobando de esta forma que las articulaciones de la Autopista y la Av. de Naciones Unidas no son óptimos para un desplazamiento más eficiente. Igualmente, se trabajó con los algoritmos de colonia de hormigas para hallar caminos más cortos y que supusiesen menor tiempo de desplazamiento. Las conclusiones fueron similares y ratificaron los resultados anteriores.

En este escenario, es importante mencionar que cabe la posibilidad de optimizar los bioflujos de transporte a partir de la jerarquización de los nodos que conectan La Paz y El Alto, considerando también la conexión de la Av. Panorámica con la Av. Juan Pablo II en la Ciudad de El Alto y la jerarquización vial metropolitana para La Paz.

Para el enfoque relacionado con las redes mutualistas, se ha propuesto un modelo de articulación de actores sociales teniendo en consideración su rol, el grado de incidencia en el territorio, el grado de relación o vínculo entre los actores y su grado de intervención. Y ello con el propósito de plantear futuras movilizaciones sociales en pro de una búsqueda de alianzas que construyan una gobernanza en el ámbito del transporte y una complementación entre lo público y privado. De esta manera, a partir de una matriz de interacción de las redes mutualistas se pudo concluir que las instancias estatales se encuentran en una situación de mayor cohesión en relación con otros actores. Partiendo de esta situación, se propusieron 4 pasos para que las redes sociales actuales puedan, a largo plazo, constituirse en sistemas de actores que busquen la articulación de otros municipios en aras de lograr construir una Región Metropolitana.

NOTAS

¹ “La ocupación actual de territorio visualiza las características generales, físico-geográficas, la historia de la ocupación territorial y la jerarquización de los centros poblados de acuerdo a su magnitud”, Documento *Lineamientos Metodológicos para la Formulación de Planes Territoriales de Desarrollo Integral para Vivir Bien* (PTDI), del Ministerio de Planificación del Desarrollo -Viceministerio de Planificación y Coordinación, 2016:18.

² Hugo Arrillaga, *et.al.* 2002: 234.

³ Hugo Arrillaga, *et.al.* 2002: 250.

⁴ Las ciencias empíricas vienen del concepto “experiencia” de hechos vividos previamente.

⁵ Dato recopilado el año 2016 de la Dirección General La Paz Bus del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz.

⁶ Dato recopilado de la Dirección General La Paz Bus del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, de los años 2011 y 2012.

⁷ Ahora cambio su nombre a Wayna Bus.

⁸ https://www.weforum.org/es/agenda/2017/06/vivir-trabajar-y-pensar-en-la-era-del-big-data?utm_content=buffer4471f&utm_medium=social&utm_source=facebook.com&utm_campaign=buffer,02/07/2017.

⁹La prospectiva se articula con el paradigma sociocrítico, el cual incorpora criterios históricos, contextuales, valorativos e ideológicos para resolver la dicotomía sujeto/objeto de forma dialógica y holística, además de luchar contra el excesivo objetivismo que posee el paradigma positivista. La investigación sociocrítica parte de la concepción social y de los acontecimientos que se suscitan como fundamento para su desarrollo.

¹⁰Según datos de *Reingeniería Total SRL*, 2007.

¹¹M. Dorigo. *Optimization, Learning and Natural Algorithms* (in Italian). Phd, Politecnico di Milano, Milan Italy, 1992.

¹²La estigmergia es la “colaboración a través del medio físico en sistemas descentralizados, como hacen las hormigas. Este concepto, introducido por Pierre-Paul Grassé, se ha extendido a una serie de algoritmos de la inteligencia artificial para estudio de sistemas colaborativos. Gary Greenfield genera obras de arte algorítmico con simulaciones de estos modelos matemáticos de procesos naturales. Lo hace con la morfogénesis celular, el comportamiento de un enjambre o los hormigueros de la especie *T. albipennis*. Asignando radios y colores a nidos de hormigas virtuales construye una serie de círculos con los centros en una circunferencia y tangentes entre sí que a distancia se ven con simetría y color. Estas formas litografiadas constituyen su obra *Stigmmetry*.” Estigmergia, 07-07-2017, <http://www.fotomat.es/estigmergia/>

¹³Un algoritmo es un conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problemas.

¹⁴*Optimización por Colonia de Hormigas*, Marco Antonio Castro Liera, 19-04-2016, <http://posgrado.itlp.edu.mx/mcastro/AH/aco.pdf>.

¹⁵Este programa de simulación fue creado por Numan Karaaslan.

¹⁶Es el grado de relación existente entre especies en la naturaleza. Se extrajo este concepto de la biomimesis.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, M. (2016). *Future Transit Network of La Paz Metropolitan Area-Bolivia*. Seúl: Kyonggi University.
- APARICIO, F. *et al.* (2008). *Ingeniería del Transporte*. Madrid: CIE Inversiones Editoriales DOSSAT 2000.
- ASCHER, F. (2012). *Los nuevos principios del urbanismo*. Madrid: Alianza Editorial.
- BAR-YAM, Y. (1997). *Dynamics of complex systems*. Massachusetts: Addison Wesley Longman, Inc.
- BENYUS, J. (2012). *Biomímesis*. Barcelona: Tusquets Editorial.
- CALLE, V. (2011). *Ecosofía Andina para la Planificación en el Contexto del Cambio*. Madrid: Editorial Académica Española.
- CARO, A. (2002). El paradigma de la complejidad como salida de la crisis de la posmodernidad. *Revista internacional de semiótica y teoría literaria*, 16-17, 69-83.
- DIRECCIÓN GENERAL LA PAZ BUS. (2016). El inicio de la transformación del transporte en La Paz, Servicio de Transporte Municipal SETRAM. La Paz: Dirección General La Paz Bus.
- EARLS, J. (2011). *Introducción a la Teoría de Sistemas Complejos*. Lima: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
- LA RAZÓN (2017). Cancelan viajes al interior y a Yungas. Noticia obtenida de http://www.la-razon.com/ciudades/Paro-Fejuve-cancelan-viajes-interior-Yungas-40-puntos-bloqueos_0_2744125579.html.
- MACARIO, R. *et al.* (2013). *Algoritmo de hormigas. Proyecto final de Ingeniería de Sistemas*. Obtenido de <http://coloniadehormigas.weebly.com/blog/proyecto-final-algoritmo-colonia-de-hormigas>.
- MARQUEZ, M. (2013). Las metaheurísticas: tendencias actuales y su aplicabilidad en la ergonomía. *Universidad Nacional Experimental del Táchira*, 7, IV (12).
- MEDEL, R. *et al.* (2009). *Ecología y evolución de interacciones planta-animal*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- MIKLOS, T. & TELLO, M. E. (2007). *Planeación Prospectiva: Una estrategia para el diseño del futuro*. Mexico D. F.: Limusa.
- MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO. (2016). *Lineamientos Metodológicos para la Formulación de Planes Territoriales de Desarrollo Integral para Vivir Bien (PTDI)*. La Paz: Ministerio de Planificación del Desarrollo.
- ORTUZAR, J. (2016). *Modelos de demanda de Transporte*. Santiago de Chile: Alfaomega.
- PUCHADES, V. *et al.* (2008). Aplicación de la Teoría de Grafos para mejorar la planificación de rutas de trabajo de una empresa del sector de la distribución automática. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la empresa*, Vol. I, 6.
- RAMIREZ, I. (2013). *Apuntes de Metodología de la Investigación*. Sucre: Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca.
- RAMOS, A. *et al.* (2010). *Modelos Matemáticos de Optimización*. Madrid: Universidad Pontificia ICAI ICADE.
- Revista La Paz ¡Así Vamos!* (2016). La región metropolitana, 7, pp. 6-83.
- SAINZ, J. & PARDO, L. (2005). *Estrategia de Desarrollo Económico Local (EDEL)*, GAMEA. El Alto: Gobierno Autónomo Municipal El Alto.

- SAINZ, J. & CALLE, V. (2015). *Memorias del Primer Foro Debate Internacional sobre el Sistema Vial y de Transportes en la Región Metropolitana de La Paz*. La Paz: UMSA.
- SAINZ, J. y CALLE, V. (2017). *Metropolización en la Región de La Paz y El Alto*. La Paz: Observatorio La Paz como vamos.
- SARAVIA, J. *et al.* (1976). *Modelo de Crecimiento Ciudad de La Paz*. La Paz: HAM.
- WOLFGANG, S. (1981). *Ciudades Bolivianas*. La Paz: Editorial Los Amigos del Libro.
- SUSTAITA, B. *et al.* (2013). *Algoritmo de Optimización por Colonia de Hormigas (ACO)*. Obtenido de <http://2013sistemasadaptativos.blogspot.com/2013/09/algoritmo-de-optimizacion-por-colonia.html>.
- ZOIDO, F. *et al.* (2013). *Diccionario de urbanismo, geografía urbana y ordenación del territorio*. Madrid: Ediciones Cátedra.
- VÁSQUEZ, D., JORDANO, P., & BASCOMPTE, J. (2009). Redes complejas de interacciones mutualistas planta-animal. En Medel, R. *et al.* (Eds.). *Ecología y evolución de interacciones planta-animal*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.

Innovación ecológica: la biomimesis como una nueva forma de pensar y actuar ecológicamente

Vincent Blok

Bart Gremmen

School of Social Sciences. Wageningen University (Países Bajos)

En este artículo, reflexionamos de manera crítica sobre el concepto de biomimesis. A partir de un análisis de esta noción en la literatura académica existente y de su origen filosófico, hacemos una distinción entre un concepto fuerte y uno más débil de biomimesis. El fundamento del concepto fuerte de biomimesis está relacionado con la idea de que la naturaleza es vista como una medida para juzgar la corrección ética de nuestras innovaciones tecnológicas, pero, al mismo tiempo, su debilidad estriba en una serie de presuposiciones cuestionables. Estas presuposiciones son abordadas a través del concepto más débil de biomimesis, pero al precio de que ya no cabe distinguir entre un tipo de innovaciones tecnológicas que fomenten la explotación y otro tipo de innovaciones de carácter ecológico. En ese sentido, el texto es una comparación de los conceptos relativos a la biomimesis mediante la reflexión crítica sobre cuatro dimensiones del mismo: mimesis, tecnología, naturaleza y ética.

Introducción

Debido a las crecientes presiones sobre los recursos y el medio ambiente, se reconoce cada vez más que tenemos que buscar alternativas para resolver los problemas derivados de la destrucción tecnológica de los ecosistemas originados durante el periodo industrial (véase Comisión Europea, 2012). En consecuencia, la demanda de materiales reciclables y biodegradables está aumentando. En el contexto de la Unión Europea, por ejemplo, se argumenta que “en un mundo con presiones crecientes sobre los recursos y el medio ambiente, la UE no tiene más remedio que apostar por la transición hacia una economía circular eficiente y, en última instancia, regenerativa en el uso de los recursos” (Comisión Europea 2012, p. 1).

Con el transcurso de los años, las aproximaciones biomiméticas hacia la tecnología y a la innovación han recibido cada vez más atención como una alternativa

factible a las tecnologías convencionales que han provocado la destrucción de ecosistemas durante el periodo industrial. La biomimesis o biomimética es “una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza y los imita o toma inspiración de estos diseños y procesos para resolver problemas humanos” (Benyus 2002, I). La naturaleza se ve desde esta perspectiva como una fuente inspiradora de conocimiento -por ejemplo, una célula solar inspirada en una hoja-, lo que permite el desarrollo de innovaciones basadas en la naturaleza, como, por ejemplo, ciertos materiales reciclables y biodegradables. Otros ejemplos incluyen edificios sostenibles inspirados en termiteros que establecen una regulación térmica o diseños de automóviles inspirados en la forma en que los árboles y los huesos optimizan su resistencia y sus materiales.

Según los defensores de la biomimesis, este concepto introduce un enfoque nuevo y respetuoso con el medio ambiente, que ya no se basa en el dominio y en la explotación de la naturaleza, sino en el aprendizaje y en la exploración. Benyus, por ejemplo, argumenta que la primera revolución industrial se caracteriza por la dominación y explotación de la naturaleza, mientras que la segunda revolución industrial -biomimética- se caracteriza por el aprendizaje y la exploración de la naturaleza. Al “hacerlo de la manera natural”, nuestras innovaciones tecnológicas pueden estar mejor integradas y en una relación armónica con los ecosistemas naturales del planeta (Benyus 2002, ver Hawken *et al.*, 2000). Una orientación similar se puede encontrar en el enfoque *Cradle to Cradle* de McDonough y Braungart:

En lugar de preguntar ¿cómo puedo cumplir con los estándares ambientales actuales?, los diseñadores empezaron a cuestionarse lo siguiente: ¿en qué medida mis decisiones en el campo del diseño tienen sentido dentro del contexto global del mundo natural? Irónicamente, este enfoque sobre la tierra adopta el verde del diseño verde, porque seguir las leyes de la naturaleza es simplemente avanzar por el camino hacia un diseño óptimo y de alta calidad. En el mundo natural, los procesos de cada organismo en un sistema vivo contribuyen a la salud del conjunto. El desperdicio de un organismo se convierte en alimento para otro, y los nutrientes y la energía fluyen perpetuamente en ciclos cerrados de crecimiento, descomposición y renacimiento. Comprender estas cualidades regenerativas nos permite reconocer que todos los materiales que utilizamos como diseñadores, -incluso los materiales sintéticos de alta sofisticación técnica-, también se pueden ver como nutrientes. ...Las leyes de la naturaleza son, pues, la base de un buen diseño, en la medida en que contribuyen a conformar un conjunto cohesivo de prácticas de diseño basadas en la ciencia que denominamos *Cradle to Cradle Design* (McDonough & Braungart 2002).

Sin embargo, según los opositores a la biomimética, el concepto es tan amplio que uno podría preguntarse si no es más que un lema forjado por los químicos

para desempeñar un papel significativo en el campo de la sostenibilidad (véase Bensaude-Vincent *et al.*, 2002). Desde esta perspectiva, se pone en duda que la biomimesis sea una verdadera revolución, y hay un cuestionamiento sobre si es capaz de cumplir sus objetivos y en qué condiciones. Si la discusión actual acerca de la potencialidad de la biomimesis como una nueva forma de pensar y de actuar de manera ecológica muestra una cosa es que, precisamente, el concepto mismo y sus implicaciones están poco desarrollados desde un punto de vista filosófico (véase Mathews, 2011). Esta es una omisión importante porque es posible que la biomimesis acabe conceptualizándose implícitamente de manera ambigua o en categorías - tecnología versus naturaleza, descubrimiento versus intervención, explotación (tecnológica) versus exploración (ecológica), etc.,- lo que desembocaría en un estancamiento de su propio desarrollo.

A fin de profundizar en la conceptualización de la biomimesis como una forma ecológica de innovación tecnológica, en este texto reflexionamos críticamente en torno a esta noción. En la sección correspondiente a la “*Introducción*”, analizamos los elementos que constituyen el concepto de biomimesis y su origen filosófico, centrado en la dicotomía naturaleza y mimesis. Además de lo anterior, distinguimos un concepto fuerte y uno más débil, aunque más sofisticado, de biomimesis. Posteriormente, en la sección denominada “*Dos conceptos de biomimesis*”, comparamos ambos enfoques (la biomimesis fuerte y la débil) a través de una reflexión crítica sobre cuatro dimensiones que atraviesan este concepto: mimesis, tecnología, naturaleza y ética.

Dos conceptos de biomimesis

La biomimesis y la conceptualización de la naturaleza

La primera pregunta que nos gustaría abordar se refiere a la forma en que se presupone el concepto de naturaleza en la literatura en la que se trata la biomimesis. Durante las últimas décadas, varios filósofos y científicos han conceptualizado la naturaleza en sus diferentes trabajos sobre este asunto. Según Philip Ball, editor asesor de *Nature*, la biomimesis “decodifica y elucida la maquinaria molecular de la célula pieza por pieza” (Ball, 2001, p. 413); esto significa que la naturaleza es considerada aquí como un hecho tecnológico, es decir, como una máquina. Esta idea es confirmada por el químico de materiales Julian Vincent, quien conceptualiza la naturaleza como “el resultante de un proceso de Investigación y Desarrollo de 4 mil millones de años” (Vincent, 2001, p. 321). En una línea similar, Benyus argumenta que la naturaleza “ya ha resuelto los problemas que estamos luchando por resolver” en un proceso de “3.800 millones de años de investigación y desarrollo”

(Benyus, 2002). La naturaleza se considera aquí como una gran laboratorio de I + D. En un estudio histórico del concepto de biomimesis, Bensaude-Vincent *et al.*, argumentan incluso que la naturaleza puede ser entendida como un ingeniero en prácticas biomiméticas: “Biólogos, químicos, químicos físicos e ingenieros se reúnen en torno a un problema común: ¿cómo podemos crear, desarrollar, mantener y, finalmente, reciclar una estructura funcional con propiedades óptimas? Con base en ello, comenzaron a considerar a la naturaleza como un artista, un ingeniero incomparable del que podemos aprender muchas lecciones” (Bensaude-Vincent *et al.*, 2002, p. 2). De esta forma, en la literatura sobre biomimesis, la naturaleza es vista como un *ingeniero* que está involucrado en un programa permanente de I + D con el objeto de resolver problemas comunes.

Llama la atención que el objetivo de la biomimesis es imitar a la naturaleza, pero aquí la naturaleza ya se entiende en términos tecnológicos, es decir, como una “tecnología natural” (Vincent & Mann, 2002) y la propia biomimesis como una vía de *transferencia* de tecnología desde la naturaleza hacia el hombre (Bensaude-Vincent *et al.*, 2002). Es en este punto donde encontramos una primera ambigüedad con respecto al concepto de naturaleza. Por un lado, la idea de naturaleza se encuentra enraizada en una concepción tecnológica: la tecnología natural o la naturaleza como artista, *tektoon*, *techne*, o tecnología. Por otro lado, la dicotomía tradicional entre la naturaleza y la tecnología se ignora bajo el enfoque biomimético, o, como dice Ball, en los métodos biomiméticos de desarrollo de tecnología e innovación, en la medida en que “esta disparidad entre el arte de fabricación natural y el sintético comienza a disminuir” (Ball 2001, p. 413). Bajo esta perspectiva cabe reconocer un planteamiento marxista que sostiene que toda la tecnología humana está integrada en la naturaleza y, por lo tanto, es una expresión de ésta, ya sea sostenible o no. Esta primera ambigüedad, al mismo tiempo, plantea dos preguntas. Por un lado, cabe cuestionar si es posible superar las dicotomías fundamentales (como la que existe entre la naturaleza y la tecnología), que están tan profundamente enraizadas en nuestra cultura, y revitalizar los debates públicos sobre la modificación genética en la producción de alimentos, en la mejora humana, etc., (Bensaude-Vincent *et al.*, 2002). Por otro lado y más importante para lo que nos ocupa, es posible también preguntarse sobre cuál es la diferencia real entre la primera y la segunda revolución industrial si la disparidad entre la naturaleza y la tecnología comienza a disminuir. Dada la convicción de los defensores de la biomimesis a la hora de reivindicar un nuevo enfoque acerca de la tecnología y de la innovación que esté *integrado* en la naturaleza y en armonía con los ecosistemas naturales del planeta, es al menos sorprendente que la imitación de la naturaleza suponga, en realidad, imitar un modelo tecnológico de la naturaleza.

La ambigüedad entre la naturaleza y la tecnología bajo la perspectiva biomi-

mética no sólo está presente en la investigación actual; también se vislumbra en la tradición filosófica. Por ejemplo, en su *Física* Aristóteles, al explorar el concepto de naturaleza, también utiliza referencias provenientes del dominio de la *techne* -el jarrón, la estatua- para entender la *phusis*. En el tercer capítulo del libro tres, por ejemplo, Aristóteles introduce cuatro causas de los seres naturales como constituyentes esenciales de su cambio físico (Aristóteles, 194b20-25). Sin embargo, al explorar las cuatro causas de los seres *naturales*, sigue recurriendo a modelos *tecnológicos*, como el bronce de la estatua a la hora de ejemplificar la causa material, el intervalo entre dos notas como ejemplo de la causa formal, el artesano que hace la estatua como un ejemplo de la causa eficiente y, finalmente, el ejercicio por el bien de la salud como ejemplo de la causa final (Aristóteles, 1980, 194b25-35). Esto significa que el concepto de naturaleza desarrollado por Aristóteles presupone, de hecho, una comprensión tecnológica de la misma.

Dicha circunstancia resulta aún más clara en la ecuación realizada por el Estagirita de la tecnología con la naturaleza en su *Física*. Según Aristóteles, tanto la tecnología (*techne*) como la naturaleza (*phusis*) se consideran productivas (*poiesis*). La diferencia entre *techne* y *phusis* es que los seres naturales tienen el principio de su productividad en sí mismos, mientras que los artefactos son producidos por un agente externo, como un artista o ingeniero (Aristóteles, 192b8-34); *techne* es una producción humana o *poiesis* elaborada por un agente externo y *phusis* es una producción natural o auto-fabricación (*auto-poiesis*). Debido a que tanto *techne* como *phusis* están estrechamente vinculados a la *poiesis*, ambos son esencialmente lo mismo según Aristóteles (véase Aristóteles, 199a10-20)¹. Sin embargo, la decisión de pensar la naturaleza en términos de *poiesis* implica que la naturaleza se entiende en términos tecnológicos, es decir, en términos de productividad o capacidad de fabricación (véase Heidegger, 1999, p. 88).

La primera conclusión que podemos extraer, por lo tanto, es que la identidad de *techne* y *phusis* en la tradición aristotélica constituye el origen filosófico de la conceptualización tecnológica de la naturaleza en la literatura que trata sobre la biomimesis. Tanto la tradición aristotélica como la investigación biomimética actual presuponen un concepto tecnológico de la naturaleza y, por lo tanto, son incapaces de conceptualizar la naturaleza *en tanto que* naturaleza.

Biomimesis y la conceptualización de la mimesis

Dejemos por un momento el concepto tecnológico de la naturaleza que se presupone en la filosofía de Aristóteles y centrémonos en la manera en que éste conceptualizó de forma explícita la relación entre *techne* y *phusis*. La razón de ello es que en la *Física* de Aristóteles también es posible encontrar la definición clásica de *mimesis*. Según Aristóteles, *techne* y *phusis* son esencialmente el mismo fenómeno.

no, no sólo porque ambos están asociados a la *poiesis* (véase la sección 1.1), sino también porque la tecnología imita a la naturaleza (Aristóteles, 194a20-25). La *techne*, en función de la *phusis*, consigue o perfecciona lo que la *phusis* no es capaz de realizar, o, en su caso, imita (*mimētai-mimesis*) a la *phusis* (Aristóteles, 199a20-25). Por lo tanto y de acuerdo a Aristóteles, existen dos tipos de *mimesis* tecnológica sobre la naturaleza. En primer lugar, está la copia mimética o la reproducción de lo dado naturalmente que podríamos encuadrar bajo una perspectiva naturalista de mímica -con la que ya estamos familiarizados-. Sin embargo, es importante reconocer que Aristóteles distingue también otro tipo de *mimesis*, centrada en la deficiencia de la naturaleza. La naturaleza no es capaz de producir o efectuar todo y, en este caso, la imitación complementa productivamente las capacidades de aquella (véase Lacoue-Labarthe, 1998). ¿Cuál de los dos tipos de *mimesis* se utiliza en los estudios sobre biomimesis y cuál de los dos tipos es adecuado para ser utilizado en la segunda revolución biomimética industrial?

Según algunos defensores de la biomimesis, el mimetismo no es la explotación de biomateriales para generar aplicaciones tecnológicas, sino que consiste en aprender de la naturaleza y explorarla (véase Benyus, 2002). Los científicos biomiméticos intentan “elucidar cómo la vida crea estructuras jerárquicas complejas, integrando muchas funciones, para comprender las estrategias químicas y físicas empleadas por los sistemas vivos y así aplicarlas, con las modificaciones adecuadas, al campo del diseño tecnológico” (Bensaude-Vincent *et al.*, 2002, p. 2). En lugar de inventar nuevas tecnologías, la biomimesis descubre procesos naturales y aplica estos procesos al diseño tecnológico. ¿Es posible afirmar con claridad que Benyus *cum suis* opta por la biomimesis como una copia o reproducción de procesos naturales y que, por lo tanto, adopta el concepto naturalista de biomimetismo? De hecho, tenemos que distinguir entre un concepto fuerte y uno más débil de biomimesis.

El concepto fuerte de biomimesis es representado, sin duda, por Janine Benyus. Ella conceptualiza la biomimesis de una manera naturalista, esto es, poniendo el acento en la imitación de los modelos de la naturaleza para resolver problemas humanos. El objetivo principal de la biomimesis, de este modo, es “hacerse eco” de las ideas de la naturaleza para nuestras propias vidas. Los científicos biomiméticos “están explorando las obras maestras de la naturaleza: -la fotosíntesis, el autoensamblaje, la selección natural, los ecosistemas autosostenibles, los ojos y oídos, la piel y las conchas, las neuronas parlantes, las medicinas naturales, etc.-, y copian estos diseños y procesos de fabricación para resolver nuestros propios problemas. Yo llamo biomimesis a su búsqueda, a la emulación consciente del genio de la vida, a la innovación inspirada en la naturaleza” (Benyus, 2002, pp. 4-5). Aunque la mímica está inspirada en la naturaleza, dicha inspiración se entiende principalmente como el descubrimiento y la imitación de la misma y viene

a representar, por lo tanto, el concepto naturalista de mímica que encontramos en la *Física* de Aristóteles.

Este concepto fuerte de biomimesis está, según Benyus, parcialmente motivado por la idea de que la naturaleza es una medida para juzgar la corrección ética de nuestras innovaciones tecnológicas (Benyus, 2002). Debido a que se supone que los principios naturales son principios que conducen a la salud ecológica y la integridad de los ecosistemas del planeta tierra, puede afirmarse que la tecnología biomimética y la innovación son éticamente correctas². Al utilizar los mismos principios de diseño que las entidades y sistemas naturales, y al modelar nuestro diseño tecnológico sobre principios naturales, la biomimesis se adhiere a una ética bioinclusiva que nos permite resituar nuestro diseño tecnológico dentro de los límites ecológicos de la biosfera: “Si nosotros como seres humanos debemos actuar desde dentro de la naturaleza’, el *ethos* de la biomimesis implica que debemos aplicar a nosotros mismos, a nuestra agencia, el requisito de recursividad. Debemos permitir que nuestros fines y nuestros medios, nuestros diseños, estén formados por aquello que existe en nuestro entorno” (Mathews, 2011, p. 373). En este sentido, el concepto fuerte de biomimesis asume que la naturaleza constituye un principio normativo para la propiciación de la salud e integridad ecológicas en el campo del diseño, es decir, un estándar de ética ecológica que se contrapone a aquellas aproximaciones biomiméticas que contemplan estos principios naturales en términos exclusivamente mecanicistas.

No obstante, la adhesión a los principios naturales como estándares normativos en el desarrollo tecnológico y del diseño exige que el mimetismo se entienda como una copia o una reproducción de la naturaleza. Por un lado, al copiar o hacerse eco de los principios de diseño de la naturaleza, se entiende que nuestras innovaciones tecnológicas pueden ser más “naturales” y más “adaptativas” a las capacidades de la biosfera (Benyus, 2002). Por otro lado, nuestros diseños biomiméticos solo pueden pretender ser éticamente ventajosos si realmente han copiado estos principios naturales. En otras palabras, el propio significado que se atribuye a la biomimesis como copia o reproducción de procesos naturales permite a Benyus *cum suis* afirmar que la biomimesis es bioinclusiva y éticamente “correcta”.

Sin embargo, hay al menos tres presunciones latentes en este concepto fuerte de mimesis que son cuestionables. Primero, el concepto fuerte de biomimesis presupone una distinción estricta entre el mero descubrimiento de entidades o sistemas que ya existen y que se copian -esto es, los principios naturales-, y la invención de cosas recién creadas como artefactos. Esta distinción estricta es cuestionable desde la propia perspectiva aristotélica, porque la mimesis no se refiere solo a la imitación o reproducción de lo que se da en la naturaleza, tal y como hemos visto, sino también a la perfección suplementaria de lo que la naturaleza no es capaz de producir por sí misma. Esta dificultad para distinguir entre descu-

brimiento e invención se confirma a la hora de analizar la historia del concepto de innovación por parte de Godin (2008), la idea de novedad es clave en el concepto de invención, en contraste con el concepto de imitación, pese a que la invención puede usarse tanto para encontrar como para hacer. Finalmente, si reconocemos la carga teórica de la percepción (Popper, 1974), tenemos que admitir que cada descubrimiento, como cualquier invención, ya implica una construcción.

Una segunda presunción subyacente en el concepto fuerte de biomimesis tiene que ver con nuestra suficiencia epistémica para “conocer” los diseños de la naturaleza; dicho de otra manera, para ‘hacerse eco de las ideas de la naturaleza’ o ‘tomar prestados diseños de un sistema de vida más amplio’, deberíamos poder tener acceso completo a la naturaleza y, de este modo, poder comprender y conocer los procesos naturales en sí. Sin embargo, es del todo punto cuestionable que los procesos naturales sean totalmente accesibles y comprensibles para nosotros. La complejidad y la idiosincrasia de los fenómenos naturales limitan la posibilidad de que descubramos y nos hagamos eco de los modelos de la naturaleza para resolver problemas tecnológicos (véase Bensaude-Vincent *et al.*, 2002).

Cabe encontrar una tercera presunción procedente del concepto fuerte de biomimesis en la distinción estricta entre la intervención tecnológica en la naturaleza -identificada con la explotación de la primera revolución industrial- y la receptividad pura de la naturaleza -ligada a la percepción y el aprendizaje de la naturaleza de la segunda revolución industrial-. Si reconocemos la complejidad y la idiosincrasia singular de la naturaleza, también debemos reconocer la necesidad de traducir e interpretar los fenómenos naturales para explorar su aplicabilidad en el contexto de los problemas tecnológicos. Sin embargo, con la introducción del concepto de traducción e interpretación, la ventaja ética del diseño biomimético se vuelve cuestionable, porque ya no se puede hacer una distinción estricta entre reproducción e invención.

Debido a lo cuestionable de estas tres presunciones que subyacen bajo el concepto fuerte de biomimesis, parece legítimo recurrir a un concepto de biomimesis más débil pero más sofisticado, como el desarrollado por Joanna Aizenberg, codirectora del Instituto Kavli de Ciencia y Tecnología Bionano de la Universidad de Harvard. Durante una charla de TED (*Technology, Entertainment, Design*)³ celebrada el 5 de marzo de 2012, introdujo una idea de biomimesis que ponía el énfasis en “una estrategia para imitar soluciones de alta tecnología que la naturaleza nos puede proporcionar, reformular materiales naturales, estrategias naturales y crear nuevos materiales y dispositivos que superan todo lo que tenemos hoy” (Aizenberg, Ted 2012). Desde este enfoque sofisticado de biomimesis, el mimetismo no consiste en la reproducción o duplicación de soluciones naturales; más bien, se toman como fuente de inspiración para crear nuevos materiales y dispositivos o, tal y como Bensaude-Vincent *et al.*, han indicado: “la biomimesis...es una cues-

tión de inspiración que debe entenderse, más bien, en el sentido poético, esa es la intención de formas o procesos originales que, a partir de un motivo natural, han resuelto un problema similar ya sea tomando prestado elementos directamente a los seres vivos, o imitando estructuras, funciones y procesos de la naturaleza...” (Bensaude-Vincent *et al.*, 2002).

Contrariamente a la concepción fuerte de biomimesis, el enfoque débil percibe el mimetismo no como la duplicación de soluciones naturales, sino principalmente como una solución creativa inspirada por la naturaleza (véase Ball, 2001). Al margen de la segunda y la tercera presunción que se asocia al concepto fuerte, el concepto más débil reconoce que “se requiere alguna forma o procedimiento de interpretación o traducción desde la biología a la tecnología” (véase Vincent *et al.*, 2006). De esta forma, por lo tanto, se reconoce la complejidad y la singularidad de los fenómenos naturales, así como la necesidad de la traducción para transferir la resolución natural de problemas a la resolución tecnológica de problemas.

Esto plantea la pregunta crítica de qué es lo que ocurre con nuestro deseo de un nuevo enfoque biomimético de la naturaleza que ya no domina y explota la naturaleza si se admite el concepto más débil de biomimesis. ¿Todavía existe diferencia entre la tecnología tradicional, caracterizada por la explotación de la naturaleza, y la tecnología biomimética, si la naturaleza ya no es el modelo y el estándar ético de nuestras innovaciones tecnológicas, sino que simplemente se entiende en términos mecánicos? ¿Cuál es, en otras palabras, la diferencia entre la primera y la segunda revolución industrial si la biomimesis es concebida bajo el enfoque débil? Y es que el concepto débil de biomimesis no puede pretender establecer una ética bioinclusiva, puesto que no asume los principios naturales como un estándar normativo, sino que se centra en la recreación de la naturaleza para fines humanos. Bajo esta aproximación, la naturaleza se considera puramente como un “almacén de diseños listos para que podamos llevar a cabo experiencias de mezcla y combinatoria a fin de satisfacer nuestros propósitos de consumo” (Mathews, 2011, p. 373), es decir, la naturaleza acaba siendo un recurso para fines útiles (ver Schyfter, 2012). Con la introducción de un concepto más débil pero más sofisticado de biomimesis, las ventajas específicas de este planteamiento, centradas en la posibilidad de aprender de la naturaleza más allá de la explotación de ésta, amenazan con desvanecerse.

Antes de que sea factible responder a la pregunta acerca de cuál de los dos tipos de biomimesis resulta adecuado para su desarrollo en la segunda revolución biomimética industrial, es preciso establecer una comparación entre ellos mediante la reflexión crítica de cuatro dimensiones específicas: *mimesis*, naturaleza, tecnología y ética.

Comparación entre las concepciones fuerte y débil de la biomimesis

Mimesis

Como hemos visto en la sección anterior, el concepto de *mimesis* no puede entenderse desde las oposiciones clásicas tales como el descubrimiento *versus* la invención. En la tradición aristotélica, la *mimesis*, no es solo la imitación mecánica de la naturaleza tal como es descubierta (esto es, la naturaleza como modelo), sino también la emulación o perfección de este modelo, es decir, una “invención” (*poiesis*). Sin embargo, la *mimesis* no puede entenderse como una invención inspirada en la naturaleza, porque la *mimesis* solo puede ser una emulación o perfección de la naturaleza si se aproxima a la naturaleza como modelo. La distinción entre descubrimiento e invención no ayuda a caracterizar la naturaleza de la biomimesis y parece introducir una categoría completamente nueva.

El filósofo francés Lacoue-Labarthe ha reflexionado extensamente sobre el concepto de *mimesis* (Lacoue-Labarthe, 1990 & 1998). Según este autor, la *mimesis* no es una invención completamente nueva, porque perfecciona lo que ya está, en cierto modo, y, al mismo tiempo, no está: es decir, la naturaleza. La razón de ello es que, si ya existía por completo, no tendría que ser perfeccionado por una *mimesis* tecnológica. Entonces, por un lado, la *mimesis* imita lo que ya existe, y, por otro lado, solo existe en el sentido estricto de la palabra a causa de la actividad imitadora de la *techne*.

Lacoue-Labarthe conceptualiza esta relación entre *techne* y *phusis* en términos de una suplementariedad original (Lacoue-Labarthe, 1990, p. 58ff). La *techne* aporta algo nuevo al proceso mimético de la naturaleza. Se trata de un suplemento, y sólo este suplemento tecnológico proporciona acceso a la *phusis* y se constituye en el origen de la *mimesis* porque, de acuerdo a Lacoue-Labarthe, la perfección de la *phusis* por la acción de la *techne* implica una deficiencia en la naturaleza. La naturaleza es deficiente porque no puede producir todo y tiene que ser perfeccionada por la tecnología. Sobre la base de la famosa tesis de Heráclito de que la naturaleza tiene la tendencia a ocultarse, es posible conceptualizar esta deficiencia de la *phusis* como aquella tendencia a ocultarse presente en la naturaleza y, por lo tanto, ésta tiene que ser complementada por una re-presentación tecnológica para que aparezca ante nosotros (véase Blok, 2014a, Heidegger, 2000). Como re-presentación de la *phusis*, la *mimesis* tecnológica debe ser entendida como una adición o complemento de la *phusis* original. Al mismo tiempo, esta re-presentación forma parte constitutiva de nuestra experiencia de la *phusis*. En la medida en que la *phusis* tiende a ocultarse, solo un suplemento o representación técnica de la *phusis* puede darnos acceso a la *phusis* original, según Lacoue-Labarthe. Por lo tanto, la *mimesis*, no es solo una reproducción de la *phusis* original sino que a la

vez es constitutiva de esta naturaleza original. A este respecto, Lacoue-Labarthe considera que la *techne* y la *phusis* son co-originales (véase Peperstraten, 2005).

Lo que deja claro la exploración de Lacoue-Labarthe es que el concepto de *mimesis* está teóricamente subdesarrollado en la literatura actual en torno a la biomimesis, pero que su análisis conceptual podría proporcionar posibles pautas para futuras investigaciones en este campo. El concepto de suplementariedad podría, por ejemplo, ser útil en prácticas biomiméticas, porque puede ayudarnos a reconsiderar la dicotomía entre la recepción y el descubrimiento, por un lado, y la invención y la intervención, por el otro. La biomimesis no es, entonces, el descubrimiento del modelo de la naturaleza y la copia de procesos naturales para nuestros diseños tecnológicos, como es habitualmente defendido bajo el concepto fuerte de biomimesis. Esta perspectiva es muy ingenua, porque la copia exitosa de la naturaleza es bastante rara; la imitación del ala de un pájaro, por ejemplo, no da como resultado la capacidad de volar, si atendemos a la historia de las técnicas aerodinámicas (Vogel, 1998). La cuestión es, sin embargo, cómo se debe entender en la práctica una complementación del concepto de biomimesis, y cuáles son las consecuencias de ello para el cumplimiento del propósito de integrar armónicamente las innovaciones biomiméticas en los ecosistemas del planeta.

Naturaleza

Como ya se ha visto en la sección “*Introducción*”, el concepto de naturaleza que se presupone tanto en la tradición filosófica como en la literatura específica que ha tratado la biomimesis parte de un modelo tecnológico; la naturaleza se entiende, en términos tecnológicos, como productiva y realizable. Bajo el concepto fuerte de biomimesis, la producción de la naturaleza es, en sí, perfecta y únicamente debería reproducirse en tecnologías biomiméticas; las tecnologías de la primera revolución industrial son imperfectas y deberían ser perfeccionadas por las que se generen en la segunda revolución industrial mediante la imitación de la naturaleza. Mathews, por ejemplo, argumenta: “Si nosotros, como seres humanos, debemos ‘actuar desde dentro de la naturaleza’, como así implica el espíritu de la biomimesis, entonces el requisito de la recursividad también se aplica a nosotros mismos, a nuestra agencia. Debemos permitir que nuestros fines y nuestros medios, nuestros diseños, estén formados por aquello que se encuentra en nuestro entorno” (Mathews 2011, p. 373). Al mismo tiempo, hemos demostrado en la sección “*Biomimesis y la conceptualización de la naturaleza*” que la consideración de la biomimesis como reproducción de la naturaleza es altamente ingenua y que toda imitación implica introducir un complemento o una reproducción en la dimensión productiva de la misma. Por lo tanto, a pesar del deseo presente en el concepto fuerte de la biomimesis de volver a realizar una producción perfecta de la na-

turalaleza, una reproducción tan pura es muy ingenua e incluso imposible, dado el carácter complementario de todo proceso mimético. Esta suplementariedad existente en la reproducción mimética parece ser mejor reconocida a través del concepto débil de la biomimesis. Sin embargo, si el mimetismo se entiende como una reproducción suplementaria de la naturaleza, lógicamente se deduce que la naturaleza misma ya no se considera perfecta, sino imperfecta o deficiente.

El carácter deficiente de la naturaleza no es un rasgo nuevo que se relacione exclusivamente con el concepto débil de biomimesis, sino que se encuentra arraigado en una larga tradición filosófica, desde Platón a Nietzsche, en la que la tecnología humana se considera un “remedio” para solventar la deficiencia o incompletitud biológica de nuestra existencia genética e instintiva (ver Nicolosi, 2014). En este sentido, la biomimesis puede incluso entenderse como un esfuerzo por superar los límites de la naturaleza. De esta manera, la deficiencia de la naturaleza puede ser considerada como una razón sólida para rechazar un concepto fuerte de biomimesis. Es decir, si la naturaleza es deficiente, lo que se plantea en el concepto fuerte de biomimesis ya no es deseable porque la tecnología humana no debería imitar esta deficiencia sino desarrollar un remedio precisamente para ella. Y es éste el enfoque que subyace bajo el concepto más débil de biomimesis.

Pero, ¿es inevitable aceptar este supuesto que da por sentado la deficiencia de la naturaleza? Este asunto resulta de gran importancia porque nos sitúa en el modo en que estas características de la naturaleza como agente productivo y como realidad deficiente pueden relacionarse entre sí dentro del concepto débil de biomimesis. ¿Es factible llegar a la conclusión de que la naturaleza es deficiente a causa de su carácter productivo (*poiesis*)? Si reconocemos que la deficiencia de la naturaleza es el resultado de su conceptualización como realidad productiva (*poiesis*) -la naturaleza es productiva pero deficiente porque no puede producir todo-, la pregunta que surge es la siguiente: ¿es posible pensar la naturaleza de manera negativa como deficiente si no existe previamente una definición de la naturaleza basada en un modelo de tecnología? ¿Cuál es la esencia de la naturaleza en general y cuál es el estado ontológico de la “deficiencia” de la naturaleza en particular? ¿Es necesario conceptualizar la naturaleza negativamente como deficiente o, por ejemplo, es posible conceptualizarla en términos más neutros como realidad que se oculta a sí misma (véase la sección “*Biomimesis y la conceptualización de la naturaleza*”) o, en el léxico de Lacoue-Labarthe, bajo el enfoque de *desistimiento* de la naturaleza? Desistencia significa originalmente retirarse o retirarse, y el *desistimiento* de la naturaleza se relaciona tanto con el retiro de la naturaleza como con el ser retirado de la naturaleza (véase Derrida, 1998; Martis, 2005; Blok, 2014b).

El concepto de *desistencia* podría ser útil en las prácticas biomiméticas porque nos permite entender y reconocer la complejidad fundamental y la singularidad de los procesos naturales que la biomimesis está tratando de imitar. Por un lado,

una formulación tan neutra del *desistimiento* de la naturaleza deja espacio para el concepto fuerte de biomimesis. Sin embargo, por otro lado, el problema que debe abordarse desde el concepto fuerte es cómo integrar esta *desistencia* de la naturaleza en nuestros diseños tecnológicos. Benyus, por ejemplo, argumenta que no sólo los diseños de productos deben buscar una inspiración de la naturaleza, sino también los procesos de producción y la propia infraestructura que facilita esta producción (Benyus, 2002; véase Mathews, 2011). Parece, en otras palabras, que el concepto débil de biomimesis posee una mayor flexibilidad para abordar la cuestión de cómo el *desistimiento* de la naturaleza debe conceptualizarse e integrarse en diseños biomiméticos concretos. Sin embargo, mientras la naturaleza se comprenda, desde el enfoque biomimético, sobre la base del modelo tecnológico, no va a ser posible pensar la naturaleza en tanto que naturaleza, es decir, comprender el propio estado ontológico de esta “deficiencia” existente en la naturaleza.

Tecnología

La complementariedad de las tecnologías biomiméticas presupone la continuidad entre la naturaleza y la tecnología, porque ésta última se enfrenta al objetivo de perfeccionar la naturaleza. Pero, de modo simultáneo, implica una situación de discontinuidad entre la naturaleza y la tecnología porque se alude a una suplementación de la naturaleza. Si la tecnología biomimética es esencialmente suplementaria y no puede reducirse a la propia naturaleza, el estado ontológico de esta complementariedad de la tecnología no está claro. ¿Qué es exactamente eso que no es natural en la tecnología biomimética? En este sentido, se puede argumentar que la biomimesis es quizá capaz de imitar una función real de un organismo o un ecosistema, -por ejemplo, la función de un geco para caminar sobre el techo-, pero, al contrario de lo que ocurre en los sistemas vivos, los objetos tecnológicos producidos no pueden imitar la capacidad de adaptación de los sistemas vivos a las nuevas circunstancias como resultado de los cambios en el medio ambiente. La complementariedad de la tecnología biomimética se refiere, entonces, al hecho de que es posible realizar una copia de una función actual y fija de un organismo o sistema natural mediante su extracción del contexto y de la historia espacio-temporal. Esto significaría que la complementariedad de la tecnología biomimética se limita a reproducir fenómenos naturales sin su contexto espacio-temporal específico, lo que supone, en el fondo, una constante dependencia de los procesos naturales a la hora de encontrar nuevas funciones posibles que puedan ser reproducidas de una manera tecnológica. No obstante, cabe entender la complementariedad de la tecnología biomimética de otra manera. Si la tecnología biomimética copia una función fija de un organismo sacándolo de su contexto espacio-temporal, el carácter suplementario de esta tecnología biomimética podría desembocar en la produc-

ción de una narrativa con un nuevo contexto espacio-temporal.

Si algo está claro es que esta concepción que identifica un componente en la tecnología biomimética tiene consecuencias importantes para nuestro concepto de biomimesis como tal. Por un lado, la complementariedad de la tecnología biomimética limita la constatación fuerte de una supuesta naturalidad. Por otro lado, la complementariedad tecnológica también limitaría el concepto más débil de la biomimética como solución creativa, ya que esta inspiración depende en gran medida de la dinámica de los sistemas naturales. ¿Es posible entonces mantener un concepto fuerte de biomimesis si la complementariedad tecnológica implica que ya no puede verse este proceso como algo natural? ¿O es posible mantener un concepto débil de biomimesis que parte de la complementariedad entre la ausencia de naturalidad en las tecnologías biomiméticas y el desarrollo de un nuevo contexto espacio-temporal para nuestros diseños tecnológicos?

La ambigüedad de la discontinuidad de la naturaleza y la tecnología lleva, en definitiva, a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el estado ontológico de la complementariedad de la tecnología biomimética si no es natural en el sentido estricto de la palabra?

Ética

Hemos visto que la naturaleza opera como un estándar normativo para juzgar la “rectitud” o “naturalidad” bajo el concepto fuerte de biomimesis, porque se supone que los principios son los que conducen a la salud ecológica y a la integridad de los ecosistemas del planeta tierra. Tenemos que reconocer que el concepto fuerte tiene la ventaja de posibilitar la incorporación en la naturaleza y la armonización con los ecosistemas naturales del planeta, mientras que el concepto más débil puede justificarse para explotar y destruir la naturaleza. Sin embargo, es cuestionable la alusión estricta a la naturaleza como medida ética en las prácticas biomiméticas. Por un lado, tenemos que admitir que es imposible cumplir con los requisitos de la ética bioinclusiva de Benyus debido a la necesidad de traducir e interpretar la resolución natural de problemas y su consiguiente transferencia a las problemáticas humanas. Por otro lado, se puede argumentar que se comete la falacia naturalista cuando se recurre a la naturaleza como una medida para juzgar la corrección ética de nuestras innovaciones tecnológicas (Moore, 1903).

Según Moore, la falacia naturalista consiste en argumentar que algo es bueno *porque es natural*. Es más general que la falacia de Hume, consistente en afirmar que una conclusión debe derivarse de premisas conectadas lógicamente. Mientras que el concepto débil de biomimesis evita la falacia naturalista, el concepto fuerte comete la falacia naturalista porque afirma que las innovaciones tecnológicas son buenas dado que se basan en los principios de la naturaleza.

Los defensores de un concepto fuerte de biomimesis pueden sostener que su componente normativo -la protección de la salud y la integridad de los ecosistemas del planeta tierra- es independiente de su componente descriptivo -la descripción de los principios naturales que conducen a la salud e integridad ecológicas-; al imitar estos principios naturales, la biomimesis contribuye a la protección de los ecosistemas del planeta sin cometer la falacia naturalista. Aunque ésta es una posible defensa, de hecho resulta, por lo menos, ambigua, porque Benyus *cum suis* también sugiere que los principios de la naturaleza son éticamente buenos en sí mismos: “La biomimética está descubriendo lo que funciona en el mundo natural, y más importante, lo que dura. Después de 3,8 mil millones de años de investigación y desarrollo, los fallos acaban siendo fósiles, y lo que nos rodea es el secreto para la supervivencia. Cuanto más se vea y hagamos funcionar nuestro mundo como este mundo natural, es más probable que se nos acepte en este hogar que es nuestro, pero no sólo nuestro” (Benyus 2002, p. 3). Además del riesgo de cometer la falacia naturalista, se puede plantear la cuestión de hasta qué punto puede decirse que la naturaleza, en tanto que es “aquello que dura”, es éticamente buena en absoluto.

Podemos, por ejemplo, argumentar que la naturaleza es el producto de una lucha por la existencia. En tal sentido, es cuestionable que la medida evolutiva de la supervivencia sea, a su vez, una buena medida del comportamiento ético; no podemos afirmar que los más aptos para sobrevivir sean automáticamente los éticamente buenos. En segundo lugar, la I + D natural puede ser el resultado de 3.800 millones de años de procesos de prueba y error que desembocaron en hermosos diseños naturales -y que culminaron en los seres más aptos para sobrevivir- pero también en enormes cantidades de desechos (véase Zwiers *et al.*, 2015). La resolución de los problemas humanos no puede permitirse esta cantidad de residuos y necesita prácticas de gestión que eviten la pérdida de generaciones y mejoren el comportamiento ético. Incluso se puede argumentar que la ética es contraria a los procesos naturales de la lucha por la existencia. En consecuencia, la transferencia de I + D natural al contexto de la resolución de problemas humanos siempre está limitada por nuestros estándares éticos, y estos estándares éticos en sí mismos no se derivan principalmente de la naturaleza (mimetismo) sino que se imponen a la naturaleza. Esto lleva a la paradoja de que una ética biomimética en sí misma no es ecológica o natural. Con todo, varios ejemplos de tecnologías biomiméticas, como edificios sostenibles inspirados en montículos de termitas que se enfrían por sí mismos, sugieren que este tipo de tecnologías están mejor integradas y en armonía con los ecosistemas del planeta tierra. No obstante, el riesgo de cometer la falacia naturalista es, por lo tanto, un problema extraordinario para el concepto fuerte de biomimesis.

La ambigüedad de la naturaleza, entendida como medida para la incorporación de nuestras innovaciones tecnológicas en los ecosistemas del planeta, y la conside-

ración de la naturaleza como un actor posiblemente no ético plantea la siguiente pregunta: ¿en qué medida la ética bioinclusiva de la biomimesis deriva de la naturaleza o, más bien, se impone a ella?

Conclusiones

En este artículo, hemos reflexionado críticamente en torno al concepto de biomimesis. Sobre la base de un análisis del origen filosófico de los conceptos de naturaleza y de la *mimesis* como constitutivos del enfoque biomimético, concluimos, en primer lugar, que tanto la tradición aristotélica como la investigación biomimética actual conceptualizan la naturaleza en términos tecnológicos, es decir como tecnología natural. Aunque el objetivo de la biomimesis es imitar a la naturaleza, de hecho es imposible conceptualizar la naturaleza en tanto que naturaleza. Sin embargo, la conceptualización de la naturaleza en tanto que naturaleza es importante para la biomimesis, porque la diferencia entre la primera y la segunda revolución biomimética industrial amenaza con desvanecerse si la biomimesis no consigue desarrollar una ética bioinclusiva, es decir, una ética que parta de la naturaleza como medida para la incrustación de nuestras innovaciones tecnológicas en los ecosistemas del planeta. La potencia del concepto fuerte de biomimesis se sustenta en la idea de que la naturaleza es vista como una medida para juzgar la corrección ética de nuestras innovaciones tecnológicas. No obstante, su debilidad se encuentra en tres supuestos cuestionables; (a) una distinción estricta entre el mero descubrimiento de entidades o sistemas que ya existen -los principios naturales-, que se copian, y la invención de cosas recién creadas como artefactos, que se inventan; (b) nuestra suficiencia epistémica para ‘conocer’, aprender y aplicar los diseños de la naturaleza; (c) una distinción estricta entre la intervención tecnológica en la naturaleza -la explotación de la primera revolución industrial- y la receptividad pura de la naturaleza -basada en la percepción y el aprendizaje de la naturaleza de la segunda revolución industrial-. Estas presuposiciones son abordadas por el concepto más débil de biomimesis, pero al precio de que ya no es posible distinguir entre un tipo de tecnología explotadora y dominante y un tipo exploratorio y ecológico de tecnología biomimética.

Para determinar cuál de los dos tipos de biomimesis es adecuado para ser utilizado en la segunda revolución biomimética industrial, comparamos ambos conceptos al reflexionar críticamente cuatro dimensiones que están presentes en la noción de biomimesis: mimesis, naturaleza, tecnología y ética. La Tabla 1 resume los resultados de nuestra comparación:

	Mímesis	Naturaleza	Tecnología	Ética
Biomimesis fuerte	Conceptualización ingenua de <i>mimesis</i>	Presupone la perfección de la naturaleza	No puede tratar la sub-plementariedad de la tecnología biomimética	Riesgo de cometer la falacia naturalista.
Biomimesis Débil	Reconoce la suplementariedad de la <i>mimesis</i>	Presupone la <i>desistencia</i> de la naturaleza	No puede tratar la suplementariedad de la tecnología biomimética	Evita la falacia naturalista

Tabla 1. Comparación entre el concepto fuerte y débil de biomimesis

De la Tabla 1 concluimos que, desde una perspectiva filosófica, el concepto fuerte de biomimesis es más problemático que el concepto débil de biomimesis. En las cuatro dimensiones, el concepto fuerte tiene problemas importantes que resolver, mientras que el concepto débil tiene que abordar los principales problemas en solo dos dimensiones. Antes de que podamos responder a la pregunta de si el concepto fuerte de biomimesis puede ser una forma más “responsable” o “ecológica” de innovación tecnológica o si deberíamos cambiar al concepto más débil de biomimesis, la investigación futura debe responder al menos a las siguientes preguntas de investigación:

- (1) ¿Cómo deberíamos entender la suplementariedad de la biomimesis en la práctica, y cuáles son las consecuencias de la idea de que las innovaciones biomiméticas están mejor integradas y en armonía con los ecosistemas del planeta?
- (2) ¿Cómo debe conceptualizarse e integrarse el desistimiento de la naturaleza en diseños biomiméticos concretos?
- (3) ¿Cuál es el estado ontológico de la suplementariedad de la tecnología si no es natural en el sentido estricto de la palabra?
- (4) ¿En qué medida la ética bioinclusiva de la biomimesis deriva de la naturaleza o se impone a ella?⁴

NOTAS

¹ En la siguiente sección, exploramos un argumento adicional sobre por qué, según Aristóteles, la naturaleza y la tecnología son esencialmente lo mismo.

² La suposición de que los principios naturales conducen a la salud ecológica no implica que los principios no naturales conduzcan necesariamente a ecosistemas no saludables. Es posible descubrir principios de diseño que no se pueden encontrar en la naturaleza pero que sin embargo conducen a la salud ecológica, y con esto, es posible diseñar tecnologías e innovaciones basadas en principios

no naturales, que cabe afirmar que son éticamente correctos. Pero este no es un argumento en contra de la afirmación del concepto fuerte de biomimesis de que las innovaciones biomiméticas son éticamente correctas. Los defensores de un concepto fuerte de biomimesis no tienen que negar la posibilidad de una medida no natural para juzgar la rectitud ética de las innovaciones tecnológicas. Sólo argumentan que los principios naturales conducen a la salud ecológica y, por lo tanto, puede afirmarse también que las tecnologías biomiméticas y las innovaciones son éticamente correctas.

³TED (*Tecnología, Entretenimiento, Diseño*) es una organización sin fines de lucro cuyo objetivo declarado es hacer accesibles las grandes ideas y suscitar el debate (www.ted.com).

⁴Nos gustaría agradecer a los revisores del *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* sus comentarios sobre un borrador anterior de este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- ARISTOTLE. (1980). *The Physics*. Cambridge/London: Loeb Classical Library/Harvard UP.
- BALL, P. (2001). Life's lessons in design. *Nature*, 409, 413-416.
- BENSAUDE-VINCENT, B., ARRIBART, H., BOULIGAND, Y., & SANCHEZ, C. (2002). Chemists and the school of nature. *New Journal of Chemistry*, 26, 1-5.
- BENYUS, J. M. (2002). *Biomimicry. Innovation inspired by nature*. New York: Harper Perennial.
- BLOK, V. (2014a). Reconnecting with Nature in the Age of Technology. The Heidegger and Radical Environmentalism Debate Revisited. *Environmental Philosophy*, 11(2), 307-332.
- BLOK, V. (2014b). Being-in-the-World as Being-in-Nature: An ecological Perspective on Being and Time. *Studia Phaenomenologica*, 14, 215-235.
- DERRIDA, J. (1998). Desistance. In P. Lacoue-Labarthe (Ed.), *Typography* (pp. 1-42). Stanford: Stanford UP.
- EUROPEAN COMMISSION. (2012). *Manifesto for a resource-efficient Europe*. Obtenido de http://europa.eu/rapid/pressrelease_MEMO-12-989_en.htm.
- GODIN, B. (2008). *Innovation: The history of a category*. Working paper.
- HAWKEN, P., LOVINS, A., & LOVINS, L. H. (2000). *Natural capitalism: Creating the next industrial revolution*. Boston: Little, Brown & Company.
- HEIDEGGER, M. (1999). *Contributions to philosophy (from enowning)*. Indiana: Indiana UP.
- HEIDEGGER, M. (2000). *Introduction to metaphysics*. New Heaven & London: Yale UP.
- LACOUÉ-LABARTE, P. (1990). *Heidegger, art and politics*. Oxford: Basil Blackwell Inc.
- LACOUÉ-LABARTE, P. (1998). *Typography*. Stanford: Stanford UP.
- MARTIS, J. (2005). *Representation and the loss of the subject*. New York: Fordham UP.
- MATHEWS, F. (2011). Towards a deeper philosophy of biomimicry. *Organization & Environment*, 24(4), 364-387.
- MCDONOUGH, W., & BRAUNGART, M. (2002). *Cradle to cradle. Remaking the way we make things*. New York: North Point Press.
- MOORE, G. E. (1903). *Principia ethica*. Cambridge: Cambridge University Press.
- NICOLOSI, G. (2014). *On the traces of hephaestus. Skills, technology and social participation*. Ph.D. Thesis, Wageningen.
- PEPERSTRATEN, P. (2005). *Sublieme Mimesis*. Budel: Damon.
- POPPER, K. R. (1974). *Conjectures and refutations. The growth of scientific knowledge*. London: Routledge & Kegan Paul.
- SCHYFTER, P. (2012). Standing reserves of function: A Heideggerian reading of synthetic biology. *Philosophy & Technology*, 25, 199-219.
- VINCENT, J. (2001). Structural biomaterials and biomimetic strategies. In C. Sanchez (Ed.), *Biomimétisme et matériaux*. Paris: OFTA.
- VINCENT, J., BOGATYREVA, O., BOGATYREVA, N., BOWYER, A., & PAHL, A.-K. (2006). Biomimetics: Its practice and history. *Journal of the Royal Society, Interface*, 3(9), 471-482.
- VINCENT, J., & MANN, D. (2002). Systematic technology transfer from biology to engineering. *Philosophical Transactions from the Royal Society A*, 360(1791), 159-173.
- VOGEL, S. (1998). *Cat's paws and catapults. Mechanical worlds of nature and people*. New York & London: Norton & Co.
- ZWIERS, J., BLOK, V., LEMMENS, P., & GEERTS, R. J. (2015). The ideal of a zero-waste humani-

ty: Philosophical reflections on the demand for a bio-based economy. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 28 (2), 353-374.

“Yachay Tinku”: una contribución indígena desde el choque entre saberes para la Educación para la Ciudadanía Mundial en diálogo con la Biomimesis y la Didáctica de las Ciencias Sociales

Joseba I. Arregi-Orue

Dpto. Didáctica de las Ciencias Sociales (UPV / EHU)

Unai Belaustegi

Dpto. de Historia Contemporánea (UPV / EHU)

Aritza Saenz del Castillo

Dpto. Didáctica de las Ciencias Sociales (UPV / EHU)

Jon Bustillo Bayón

Dpto. Didáctica y Organización Escolar (UPV / EHU)

Entre las amenazas que caracterizan la agenda internacional en las prostrimerias del año 2020 destaca el desafío del cambio climático, fruto de una intensa actividad humana que trastoca los equilibrios climáticos desarrollados durante siglos y que pone en serio peligro la compleja red que hace posible la existencia de vida en nuestro planeta.

En el esfuerzo de generar nuevas estrategias para combatir esta amenaza las Naciones Unidas en 2015 acordaron la defensa de los Objetivos del Desarrollo Sostenible apostando por una Educación para la Ciudadanía Mundial (Collado, 2017) como herramienta para trabajar una educación transformadora en clave global. Esta propuesta innovadora en el ámbito educativo “aspira a ser un factor de transformación, inculcando los conocimientos, las habilidades, los valores y las actitudes que los educandos necesitan para poder contribuir a un mundo más inclusivo, justo y pacífico. ... adopta un enfoque polifacético, utilizando conceptos y metodologías que ya se aplican en otros ámbitos, entre ellos la educación para los derechos humanos, la educación para la paz, la educación para el desarrollo sostenible y la educación para el entendimiento internacional y procura que se alcancen sus objetivos comunes”(UNESCO, 2015:15). La propuesta mencionada contribuye a la consecución de los ODS 4 (especialmente 4.7) y 16.

En este esfuerzo de inspirar y construir una ciudadanía global transformadora resulta especialmente atractiva la propuesta de biomimesis que se presenta como una superación del paradigma antropocéntrico dominante en los debates sobre desarrollo durante décadas. Se trata de generar una “triple reforma epistemológica, política y educativa” (Morin, 2011 en Ruano, 2017, p. 37). Para lograr este objetivo resulta fundamental contar con visiones que nos ayuden a replantear los modelos tradicionales de desarrollo, integrando epistemologías que decodifiquen la ciudadanía global cosmopolita, liberándolas de las remoras generadas por la modernidad colonial dominante.

En una iniciativa desarrollada en los grados de Educación Infantil y Primaria de la Facultad de Educación y Deporte de la UPV/EHU de Vitoria-Gasteiz (Euskadi) en 2016, el caso indígena y su contribución al Desarrollo Sostenible (en adelante DS) fue integrado en las estrategias educativas tras haberse identificado la existencia de indígenas-otavalo en varias aulas vascas. Fruto de esta constatación se realizó un seminario sobre Interculturalidad y la Contribución de los PI al Desarrollo Sostenible, con participación de educadores indígenas de la Sierra y la Amazonia ecuatoriana que presentaron la realidad de la Educación Intercultural Indígena (de aquí en adelante EIB) centrando su presentación en la centralidad del Sumak Kawsay (en adelante SMK).

El caso ecuatoriano resulta especialmente interesante porque la Constitución de Montecristi de 2008 fue pionera en reconocer los derechos de la Naturaleza. Este hito surgió como fruto de un intenso y enriquecedor diálogo entre saberes “donde las epistemes de la ciencia moderna occidental se fusionaron con los conocimientos y saberes de los diferentes pueblos, etnias, culturas y naciones que configuran la complejidad del país andino. Aquí se reconoció, de manera horizontal y transdisciplinar, que nuestro déficit espiritual es la causa principal que nos aboca al consumo desenfrenado de los recursos naturales de la Pachamama” (Collado & Malo-Larrea, 2019, p. 348).

La pertinencia del SMK como alternativa indígena al modelo dominante de “desarrollo” aumenta en la medida en que Heziberri 2020, currículo vasco para la enseñanza obligatoria, identifica al Desarrollo Sostenible (en adelante DS) como uno de los ejes temáticos principales en Ciencias Sociales. Heziberri propone que, junto a la Historia y Geografía, es fundamental trabajar el DS en sus diferentes escalas, desde lo local a lo global. El SMK y su modelo de relación con la naturaleza ofrecen grandes posibilidades para trabajar desde la Didáctica de las Ciencias Sociales las contribuciones al bienestar global realizadas por los PI a la generación de aproximaciones innovadoras al DS, en la línea de la propuesta desarrollada por

la biomimesis.

Biomimesis en diálogo con Pueblos Indígenas para evitar nuevas formas de colonialismo

La biomimesis, como propuesta alternativa de innovación tecnológica desarrollada dentro del paradigma del DS (Block, 2019), surge en un periodo de fuerte desarrollo de las tecnologías de la ingeniería, la cibernética, las ciencias de la comunicación e información y la biogenética. Se propone estudiar o imitar modelos presentes en la naturaleza con el objetivo de resolver problemas que afectan actualmente a los seres humanos (Benyus, 2002, en Block & Gremmen, 2019, p. 186), y hacerlo mediante el aprendizaje y exploración de la naturaleza. Sin embargo, esta propuesta inicialmente atractiva es un arma de doble filo que puede degenerar en una visión utilitarista que considere a la naturaleza como un gigantesco almacén de diseños listo para que la biomimesis actúe con el objetivo de satisfacer de manera más eficiente y menos lesiva nuestros objetivos de consumo (*Ibidem*, p. 193). De hecho, estos autores alertan de que “la transferencia de I+D natural al contexto de la resolución de problemas humanos siempre está limitada por nuestros estándares éticos, y estos estándares éticos en sí mismos no se derivan principalmente de la naturaleza (mimentismo) sino que se imponen a la naturaleza. Esto lleva a la paradoja de que una ética biométrica en sí misma no es ecológica o natural” (*Ibidem*, p. 199). El problema ético de la biomimesis surge desde el momento en que caemos en la cuenta de que mucha de la naturaleza de la que hablamos existe y pervive en ecosistemas que se encuentran en territorios indígenas, donde culturas indígenas y ecosistemas conforman un sistema complejo y adaptativo que supera la concepción binaria occidental de cultura-naturaleza. Esta realidad nos interpela y nos enfrenta al caso de culturas con un saber tradicional que se ha desarrollado en profunda interrelación con las diferentes especies vegetales y animales presentes en cada ecosistema, que ellos denominan “red-de-vida” (Arregi, 2012). “Esta idea de armonía con la Tierra ha estado presente en el ideario de las cosmovisiones ancestrales de los pueblos indígenas y aborígenes originarios, al defender la Pachamama como un sistema orgánico vivo, y no como una entidad muerta que únicamente nos provee de materias primas para su facturación. De ahí el carácter transdisciplinar adyacente a la biomimesis, cuya ecología de saberes científicos y no científicos convergen para crear un meta-modelo epistémico que nos abre las puertas a una convivencia socio-ecológica más resiliente. Es por esa

razón que muchos científicos están volviendo a estudiar todas aquellas epistemes que abogan por rescatar y defender a todos los organismos vivos y no vivos de la naturaleza por encima del lucro económico que impone la globalización imperante” (Collado-Ruano & Malo-Larrea, 2019, pp. 347-48). Para estos autores, “la biomimética es una ciencia compleja que comprende a la naturaleza como un meta-punto de encuentro civilizatorio transhistórico entre todas las sociedades del mundo...Resulta obvio que la biomimética no es una idea nueva, ya que los humanos siempre han observado la naturaleza en busca de respuestas para solucionar problemas simples y complejos de su existencia” (*Ibidem*). Por esta razón, “la biomimesis se ve reforzada cuando admite su coexistencia con otros valores culturales en entornos sociales, económicos, políticos que todavía preservan una cosmovisión de respeto con la naturaleza y que, en suma, se traduce en un estímulo de la libertad individual y colectiva para conservar los recursos naturales (Bernal, 2019, p. 337).

Educación y culto al indígena desaparecido

En el esfuerzo de construir espacios de diálogo y aprendizaje conjunto alineada con la propuesta de Educación para la Ciudadanía Mundial, el Seminario realizado en Vitoria en 2016 generó un espacio de conocimiento y conciencia, que mediante el testimonio directo, logró superar estereotipos presentes y anacrónicos sobre los PI y desarrollar un intercambio de experiencias en torno al DS y a la EIB en clave contemporánea. Esta experiencia y las cuestiones desarrolladas en la investigación resultan relevantes para el desarrollo de debates futuros sobre la biomimesis en diálogo con PI.

Consideramos que la aportación indígena, encarnada en el SMK, resulta fundamental para construir propuestas altermundistas e integrar la epistemología, las culturas minoritarias y la naturaleza en el mundo educativo. El SMK se conforma como una herramienta de descolonización que propone un choque de saberes con el fin de generar un conflicto cognitivo, capaz de reconsiderar narrativas y despertar un espíritu crítico, a través de un aprendizaje dialógico. Esta propuesta contribuye a una mejor conceptualización de las propuestas de biomimesis, en clave intercultural y decolonial, que tengan como objetivo desarrollar una presencia en el mundo educativo.

Previamente al inicio del seminario, los alumnos participantes habían trabajado los conceptos básicos sobre los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible. El ob-

jetivo del seminario era establecer un diálogo en torno a la EIB y la aportación indígena al Desarrollo Sostenible (de aquí en adelante DS). Se partió de una constatación: entre los ODS no se hace mención directa al papel de la cultura(s) indígena(s) y campesinas del mundo que resulta fundamental para el desarrollo de los ODS, y por ende, debe ser contemplada en cualquier iniciativa en el área de la biomimesis. Especialmente cuando los objetivos 4 y 16 se refieren a la educación de calidad y la paz, justicia e instituciones sólidas.

Esta constatación choca con abundantes reconocimientos realizados durante las últimas décadas a la importancia de las culturas indígenas y la aportación de los PI al DS y la lucha contra el cambio climático. Como ejemplos de estos reconocimientos internacionales citar el artículo 30 de la Convención de los Derechos de la Infancia de 1989 y el artículo 26 de Agenda 21 que conforman referencias fundamentales en nuestro entorno académico-educativo. Como corolario de ambas: la Convención 169 de la OIT y la Declaración de Derechos de los Pueblos Indígenas de 2007. Estos instrumentos internacionales conforman el marco legal internacional que debe guiar cualquier modalidad de colaboración y trabajo conjunto con los PI. Todos ellos enfatizan la importancia de las culturas indígenas y el derecho a mantener el control tradicional sobre sus territorios.

Como paso previo al encuentro con los ponentes indígenas, y para generar un conflicto cognitivo, capaz de reconsiderar narrativas y despertar el espíritu crítico del alumnado, se partió de un análisis de conocimientos previos e imágenes sociales vigentes que tenía nuestro alumnado sobre PI, mediante el trabajo en grupos y una discusión en grupo grande.

Los resultados muestran la primacía de una imagen social de los indígenas en negativo, que recoge diferentes estereotipos generados en diferentes fases del colonialismo y de la historia aprendida-enseñada. La mayoría de los estereotipos surgidos eran altamente negativos con una combinación de estereotipos históricos, ligados a la colonización española y otros más modernos ligados a sus visiones del “desarrollo”. En la discusión en grupo grande se constató la existencia de estereotipos propios del discurso dominante sobre “desarrollo” que identifican a los PI con “subdesarrollo”, “pobreza”, “miseria”, “atraso”, carencias materiales y formativas, y como “objetos de ayuda” o ejemplos de “subdesarrollo”. Es relevante la falta de imágenes y contribuciones de los PI en positivo y la percepción de las culturas tradicionales como freno al desarrollo-modernidad.

Estas imágenes sociales coinciden con aquellas representadas en los textos escolares, donde siguen primando narrativas de colonización y discursos etnocéntricos que tiende a encubrir la experiencia y realidades de los PI contemporáneos.

Esta narrativa dominante, genera unas imágenes sociales de los PI donde prima una visión centrada en la experiencia colonial y los grandes imperios (inca, azteca y maya) de la primera etapa de contacto con los conquistadores, dando así al lugar al mito del “indígena desaparecido” (Arregi, 2012). El resultado es un proceso de “invisibilización” de las culturas indígenas que tienden a ocultar experiencias contemporáneas de resistencia alternativas al modelo globalizador imperante. Fruto de esta realidad, la mayoría de los estereotipos surgidos durante la puesta en común eran altamente negativos, con una combinación de estereotipos históricos, ligados a la colonización española, y otros más modernos, ligados a sus visiones del “desarrollo”.

La experiencia descrita demuestra que cuando hablamos de indígenas es difícil liberarnos de las imágenes y estereotipos creados por las diferentes olas de colonización, que los han descrito como unos seres pre-modernos, bárbaros, violentos, salvajes, primitivos. Entre los elementos que perfilan negativamente a los PI destaca su cultura tradicional descrita como local y estática, incapaz de integrarse en la moderna civilización tecno-industrial de nuestros días. Debido a ello, aparecen en nuestro imaginario colectivo actual como realidades pertenecientes al pasado y antítesis de la modernidad, y como obstáculos al desarrollo globalizador, cuyo destino casi predeterminado es desaparecer y ser asimilados dentro de las sociedades mayoritarias. Como consecuencia de esta visión construida, la sociedad dominante desarrolla una ceguera cultural y política (Spicer, 1992, en Arregi, 2012), que genera una desvalorización de las culturas indígenas, legitimando y facilitando la dominación y la imposición de una compleja estructura de discriminación. Esta visión colonial sobre los indígenas niega su contemporaneidad, su autonomía y sobre todo su categoría de sujeto político, presentándolos como meros objetos pasivos, que sufren la acción de actores o procesos exteriores.

Durante el desarrollo del seminario y fruto de la contribución indígena, pudimos identificar dos líneas que son desarrolladas en la presente investigación: 1) el SMK como alternativa al concepto de desarrollo mundializado que explota a la naturaleza y reduce su diversidad ecológica y étnica y 2) el conocimiento indígena tradicional y sus contribuciones a la agenda global en favor del DS. Ambas líneas de pensamiento chocan con los paradigmas dominantes en materia de desarrollo y sistemas de conocimiento científico y nos interpelan sobre la necesidad de construir nuevas aproximaciones teórico-prácticas que den respuesta a los problemas que asolan en futuro de nuestra humanidad.

Colonialidad dentro de las políticas de desarrollo

Los PI han sufrido el ataque de los agentes de la globalización que han ocasionado situaciones de profunda crisis, grave deterioro físico y psicológico, tanto a nivel individual como colectivo. Esta situación agónica queda reflejada en los índices de desaparición de la diversidad lingüística del planeta y en numerosos estudios internacionales sobre la pobreza, realizados por el Banco Mundial e instituciones afines, que muestran claramente una correlación entre miseria y PI (Deruyttere, 2001). Entre los impactos más negativos destaca la aplicación de políticas de asimilación con resultado de etnocidio, fundamentadas en imágenes muy negativas de los PI, vinculadas al subdesarrollo, la pobreza y la marginalidad. Simultáneamente, predomina una narrativa que ensalza el desarrollo nacional basado en estrategias extractivas de recursos inexplorados, existentes en territorio indígena. El profundo vínculo entre naturaleza y PI ha jugado en su contra desde el tiempo de los primeros asentamientos europeos y ha sido un tema mencionado desde Locke hasta nuestros días, siendo una de las justificaciones históricas para la invasión y ocupación de territorios indígenas a nivel mundial (Arregi, 2012).

Este discurso de colonización-por-asentamiento, popularizado por la literatura, el cine y los textos escolares, tiene su reflejo en narrativas de la historia y la geografía en América, en general, y en Latinoamérica, en particular, que ensalzan las gestas de las élites eurocéntricas, describiendo a los territorios indígenas como territorios baldíos, entornos salvajes e inhóspitas zonas de frontera sin explotar, llenas de oportunidades abiertas a la civilización y el progreso (Mariotto & Pagès, 2014). Paralelamente, en los textos escolares latinoamericanos y españoles se describe a los PI como realidades homogéneas, estáticas, pretéritas e identificadas con los grandes imperios existentes al comienzo de la colonización (Jara & Salto, 2016). Son culturas y realidades vinculadas a estadios iniciales del “desarrollo” humano, con conocimientos y tecnologías descritas como rudimentarias frente a los modelos de progreso encarnados por los estados-nación (Da Silva & Pagès, 2016), apoyados por las transnacionales del “desarrollo”. En estas narraciones el papel de la naturaleza y la conquista de territorios y recursos inexplorados anteriormente resulta fundamental para la construcción del ideario colonizador.

Yachay Tinku. Un choque de cosmovisiones en clave de SMK

En este periodo de profunda crisis civilizatoria urge replantear nuestros patrones

de interacción invasiva y destructiva con la naturaleza, aprender de los errores pasados y redefinir nuestras sociedades en clave de adaptación (Jiménez & Ramírez, 2019). Este cambio de paradigma debe ser radical y buscar la superación de las propuestas tecno-optimistas que consideran posible encontrar una solución basada en el desarrollo científico y que requieren cambios profundos pero no estructurales del modelo de globalización imperante. Hay que superar la visión tradicional que distingue entre cultura y naturaleza, vinculando el conocimiento con el poder y el control sobre el mundo natural y migrar a un modelo de coexistencia que está presente en las cosmovisiones y propuestas contemporáneas de los PI. Estas visiones tradicionales coinciden con las impulsadas por diferentes autores que apuestan por la biomimesis (Ibidem) y destacan el carácter sistémico y complejo de la relación entre ecosistemas y pueblos, que depende de los sistemas sociales, las estructuras de poder, y los paradigmas científicos dominantes en cada periodo histórico. Esta realidad nos plantea la necesidad de considerar la dimensión política-social que encarnan los PI del planeta que gestionan y encarnan la riqueza ecológica y étnica del planeta (Arregi, 2012). Así, siendo apenas un 5% de la población del planeta sus territorios abarcan 22% de la superficie del planeta y albergan el 80% de la biodiversidad existente (Sobrevila, 2008, p. xii). Se trata de ampliar nuestras opciones y enriquecerlas con aportaciones que contribuyan al diseño de nuevos modelos adaptados a las nuevas condiciones derivadas del desafío climático imperante que amenaza la sostenibilidad del planeta.

Como alternativa al discurso de desarrollo-extractivista dominante a nivel mundial, se ha impulsado una visión global encarnada en el DS y los ODS. En este marco se lleva más de dos décadas hablando de un diálogo entre saberes, que ofrezca voz y presencia a los PI que quieren ser protagonistas de su propia educación. Esta propuesta resulta atractiva pero su desarrollo práctico implica grandes retos que queremos resaltar a la hora de plantear esquemas de investigación-acción desde la Didáctica de las Ciencias Sociales. “Aún así la brecha existente entre el saber tradicional indígena y el científico parece no dar posibilidad de algún tipo de unificación. La realidad es bastante clara, la ciencia occidental tiene sus parámetros tan definidos que no permite la inclusión de algún otro tipo de ciencia que no se ajuste a sus lineamientos. Lo que significa que la esperanza de unificación de estos dos conocimientos está bastante alejada ya que siempre habrá una subordinación de la cultura más débil a la más fuerte y lo que se observaría es un uso sobre la parte de interés lo demás correría con el riesgo de ser excluido. Por lo tanto, el diálogo intercultural solo es posible mantenerlo desde una de las culturas, de hecho, desde la más fuerte. Es el respeto lo que funda la posibilidad

misma del diálogo, pero no es una condición suficiente para la existencia de un discurso parte inherente a dos cosmovisiones diferentes. Sí una de las dos cosmovisiones incluye un elemento de juicio para establecer lo que pertenece y lo que no pertenece a él, como es el caso del occidente moderno, el intercambio se hace imposible” (Gainza, Barracuda & Bernal, 2008, p. 26).

Desde que en 2007 la ONU aceptase la Declaración de Derechos de los Pueblos Indígenas, se ha constatado un renovado interés por ofrecer alternativas al modelo exógeno-occidental de “desarrollo” y potenciar modelos de etnodesarrollo (Stavenhagen, 1992, en Arregi, 2012), o la más reciente de SMK, cuya popularidad se debe en gran parte a su inclusión en las constituciones de Ecuador (2008) y Bolivia (2009).

El desafío inicial aparece a la hora de enfrentar al menos tres problemas que están interrelacionados: 1) el problema de la supervivencia del fardo colonial de las ciencias sociales y de la naturaleza neo-colonial de la investigación científica; 2) el problema de la arrogancia académica producto de la racionalidad indolente que asume que el conocimiento científico es superior, más valioso que el producido por los actores sociales; 3) y, la cuestión de la política de la producción del conocimiento que incluye, por una parte, el interés y la práctica de producir conocimiento que contribuya a transformar condiciones de opresión, marginación y exclusión de los estudiados; y, por otra, a producir análisis académicos más ricos y profundos a través de la experiencia de co-labor (Leyva & Speed 2008, pp. 2-3). Estas cuestiones resultan fundamentales tanto para el desarrollo futuro de la biomimesis como para su posterior introducción en el entorno académico formal en iniciativas de Educación para la Ciudadanía Mundial.

En su propuesta de EIB, los PI plantean un Yachay Tinku (un choque de cosmovisiones), una confrontación de modelos y saberes que encarna la interculturalidad basada en el SMK. Pigott (2013, pp. 17-20) nos ofrece una interesante definición de este término fundamental en la cosmovisión y filosofía andina. Según este autor tinku contempla el encuentro-choque reflexivo con el otro, con el objetivo de conseguir un alto grado de apertura intelectual fruto de la convergencia derivada del reconocimiento de la diferencia entre los opuestos. Este autor, citando a Stobart (2006), sugiere la idea de “harmonía violenta” y se refiere al Yachay Tinku como un estado superior, un proceso de profunda transformación resultante en una realidad distinta a la inicial, fruto del encuentro con el otro (Howard, 2009 en Pigott, 2013, p. 18), y de la adquisición de conocimiento en el marco dentro del ciclo vital humano (Crickmay, 2002, en *Ibidem*). Este principio resulta fundamental para el desarrollo de un diálogo de cara a generar sistemas viables y relevantes

para la biomimesis y el DS desde una perspectiva integradora y anticolonialista.

La propia idea de imitación en contextos interculturales resulta en un complejo desafío cognitivo ya que “presenta mecanismos cognitivos y aspectos semánticos, representacionales y simbólicos muy diversos, en extremo complejos y en gran medida distantes de los patrones conceptuales que predominan en la biomimesis” (Sierra, 2019, p. 369).

El SMK hunde sus raíces en la tradición andina de los PI de Ecuador, Bolivia y Perú y constituye una propuesta alternativa a la concepción tecno-industrial, lineal, extractivista, individualista y colonialista subyacente en las teorías del “desarrollo” globalizador (Mignolo, 2002). El hecho de aparecer con su denominación original en lengua quechua constituye un ejemplo de empoderamiento indígena y de valoración de sus saberes y culturas, insólito sólo hace algunos años en los ámbitos políticos o académicos de Occidente. Asimismo, sitúa la contribución indígena en una visión del SMK que Hidalgo y Cubillo (2014, p. 30) califican de indigenista-pachamamista, caracterizada por una preponderancia de los modelos ancestrales de organización social y la importancia de elementos espirituales y conocimiento tradicional.

El SMK constituye un ideal de vida en plenitud, contrapuesta a su experiencia de “maldesarrollo” deshumanizador de raíz colonial y occidental que quiebra individuos y comunidades. Partiendo de las cosmovisiones, historias, resistencias y movilizaciones actuales, el SMK se presenta como un modelo profundamente local (Altman, 2017) y de carácter alternativo al “desarrollo” globalizado en sus múltiples versiones (Choqueuanca, 2010; Huanacuni, 2010). De hecho, se trata de una propuesta genuina alternativa y no una visión indígena porque tal concepto no existe en la cosmovisión andina (Hidalgo & Cubillo, 2014, p. 32).

El SMK propone un modelo cosmocéntrico frente a los modelos antropocéntricos o ecocéntricos dominantes en el debate actual sobre DS (Acosta, 2008). Este modelo se encuentra más cercano al descrito por Ruano (2017, p. 38) que aboga por modelos que conceptualizan al “ser humano como una parte integrante de la totalidad cósmica...y alberga, además, el imperativo ético de desarrollar una cultura de paz”. El SMK propugna un modelo de equilibrio con los otros seres que constituyen la red de la vida, basado en un reconocimiento de la espiritualidad existente en sus espacios naturales, que está siendo destruida por el extractivismo globalitario. En su concepción existen diferentes mundos y realidades vinculados por los principios de interdependencia, igualdad, reciprocidad, equivalencia, complementariedad y equilibrio, que se asemejan al principio de sostenibilidad del Desarrollo Sostenible. Esta visión, de raíz profundamente local

(Altman, 2017), trastoca y cuestiona muchas de las categorías universalistas utilizadas en los discursos sobre “desarrollo” presentes en nuestras manifestaciones sobre las Ciencias Sociales.

Yacahay Tinku: SMK, Ciencias Sociales y sus consecuencias para la Didáctica de las Ciencias Sociales

En el campo científico de la Didáctica de las Ciencias Sociales, las cuestiones relacionadas con el espacio y el tiempo, la idea de progreso, de cambio social-continuidad y causalidad son fundamentales. Pero desde el punto de vista indígena se trata de concepciones que junto a la idea de “desarrollo” surgen de la modernidad como marco cultural de referencia y por tanto son rechazadas por el SMK (Hidalgo & Cubillo, 2014). De hecho, estas concepciones colisionan con la concepción indígena que considera el espacio-tiempo como una unidad -pacha en quechua- y que rechaza una división entre pasado-presente-futuro. Hablan de una simultaneidad donde prima un presente continuo y el carácter cíclico y espiral del tiempo (Arce, 2007; Zenteno, 2009). No es posible concebir la historia como proceso lineal progresivo, sino que en esta visión priman conceptos como la circularidad, diferentes formas de presente, el futuro que al mismo tiempo es pasado, con periodos cíclicos de estabilidad y cambio (Zenteno, 2009). Por otro lado, resulta fundamental el tiempo experimentado que se rige por los ciclos naturales del movimiento de los planetas con su reflejo en los ciclos estacionales y agrícolas (Leff, 2000).

En la economía y el “desarrollo” se produce, según Chuji (2008), un rechazo a los conceptos de “propiedad privada”, “desarrollo”, “beneficio-acumulación”, “riqueza”, “productividad” o “pobreza”. El choque entre cosmovisiones deriva de oponerse a la idea de “vivir mejor”, mediante el acaparamiento, el consumo y la explotación de la naturaleza. EL SMK critica que el “progreso” se ha basado en la acumulación por desposesión y en la explotación intensiva de pueblos y ecosistemas. No les gusta la idea de competición, el acopio, el individualismo, la insolidaridad, la productividad y la falta de preocupación sobre los efectos en comunidades y ecosistemas. Y se declara enemigo del lujo, del despilfarro y del consumismo imperante, que quiebra comunidades y ecosistemas en nombre de un progreso que les ha resultado históricamente esquivo. Por el contrario, en su racionalidad económica prima la propiedad colectiva con uso individual, la sostenibilidad y producción basada en la relación armónica con el entorno y el uso

respetuoso de los recursos naturales para el bienestar de toda la comunidad (Quilaqueo, 2007). Por lo tanto, en la economía indígena rigen los principios de reciprocidad y redistribución para que todos los miembros de la comunidad tengan acceso a los mismos niveles de bienestar. En este contexto rechaza la categoría de “pobres” que frecuentemente les aplican los expertos en “desarrollo” y enfatizan la sostenibilidad-riqueza existente en sus territorios, encarnada en su patrimonio cultural, su organización social armónica y la ausencia de los niveles de crisis y desestructuración que son observables en las sociedades modernas (Deruyttere, 2001).

Por lo que respecta a la ciencia política, el SMK defiende los modelos tradicionales de organización institucional que les han permitido resistir a sucesivas generaciones de colonialismo; así como la conciencia de constituir realidades anteriores a la formación de los estados-envolventes en los que residen. También su experiencia de resistencia frente a los innumerables intentos de ocupar sus territorios, explotar sus recursos y gobernar sus comunidades (Choquehuanca, 2010). En la base de este modelo se encuentran el “ayllu” (comunidad vinculada a ecosistemas y territorios concretos, base de la identidad individual y comunitaria) y el principio de reciprocidad y búsqueda del bien común. La organización social indígena y el ejercicio de autoridad y poder reflejan estos mismos principios de armonía, equilibrio y consenso. La democracia indígena es participativa y enfatiza la necesidad de diálogo y búsqueda continua de acuerdos, priorizándose el papel de los ancianos como las autoridades cuya sabiduría y mayor cercanía al mundo de los ancestros pueden ejercer mejor su celo y vigilancia sobre el equilibrio y el bienestar de la comunidad (Huanacuni, 2010). Esta búsqueda de equilibrio y bienestar comunitario también se refleja en los sistemas de salud, que ponen énfasis en el mantenimiento del equilibrio del individuo con la comunidad, con el medio natural y con el mundo de los ancestros y de los espíritus (McGuire-Kishebakabaykwe, 2010).

Conocimiento Indígena: una contribución local de relevancia global

Junto con la radical oposición entre concepciones de desarrollo que encarna el SMK, las cuestiones relacionadas con el Conocimiento Indígena (de aquí en adelante CI) resultan altamente relevantes. Chambers (1983, en Arregi 2012) define al CI como un sistema integral que comprende conceptos, creencias y percepciones, así como las formas en que estas son preservadas, acumuladas, diseminadas

y aumentadas. Este cumulo de conocimientos resultan relevantes para el mantenimiento de la biodiversidad y etnodiversidad del planeta y para alcanzar el DS (Singh, 1997, en Arregi 2012). Para poder entender mejor lo que es CI resulta efectivo contraponerlo al Conocimiento Científico (de aquí en adelante CC) que resulta altamente accesible y dispone de una multitud de soportes que lo hacen fácilmente diseminable a nivel global (Seini, 2003 en Arregi 2012). Por el contrario, el CI resulta difícilmente accesible por estar encapsulado en una complejo “jerga” antropológica, y requiere una larga experiencia de estudio para poder desentrañarlo. Esta dimensión endémica del conocimiento presenta ventajas y desventajas que debe ser tenidas en cuenta por los partidarios de la biomimesis. El conocimiento indígena se basa en la observación de fenómenos que han ocurrido en territorio indígenas durante siglos y que han sido considerados fundamentales para el desarrollo y preservación de estas culturas (Warren, 1994, en Arregi 2012). Se trata de una visión sistémica y totalizadora que integra diferentes campos de nuestras ciencias que van desde la lingüística, medicina, psicología clínica, botánica, zoología, etnología, agricultura y artesanía entre otros (Shahidullah, 2007, en Arregi 2012). Actualmente, estas prácticas relacionadas con el CI se encuentran integradas en diferentes campos. Por ejemplo, en la medicina podemos encontrar a médicos tradicionales practicando en la periferia de los sistemas de salud occidentales (Organización Mundial de la Salud, 2013). En el caso de la gestión de uso de recursos tales como la pesca, la gestión forestal o de los recursos hídricos y gestión animal es frecuente la participación de expertos locales que aportan sus conocimientos tradicionales, sus conocimientos y capacidades (Leff, 2013). El trabajo de estos expertos tiene semejanza con el realizado por los científicos en la medida en la que observan, clasifican, catalogan, investigan, experimentan y predicen resultados (Chambers, 1983, en Arregi 2012).

La conciencia derivada del potencial de estrategias de reconocimiento de las contribuciones indígenas y del diálogo con los PI resultan fundamentales para evitar modelos de biomimesis que repitan los errores de un pasado-presente colonialista y extractivo. Se trata de evitar que la “tierra incógnita” (Jimenez & Ramirez, 2019) llena de posibilidades que desvela la biomimesis desemboque en un “terra-nullius intelectual” (Posey, 1992, en Arregi 2012) y que perpetua una lógica de expropiación y saqueo del mundo natural (Keats 2017, en Sierra 2019). Este terra-nullismo amenaza con replicar y profundizar en situaciones de crisis agónica que sufren los PI del planeta. En la medida en que la biomimesis tiene la voluntad evitar los errores de la pasada revolución industrial resulta fundamental mantener la conciencia de que “la civilización industrial justificó la explotación

y destrucción de sociedades enteras y la expansión sin consideración a la soberanía de los pueblos; fomentó el individualismo, la competición y el egoísmo como rasgos virtuosos del carácter” (Dunbar-Ortiz, 2018). Históricamente, los instrumentos legales en defensa de la propiedad corporativa han jugado en contra de los sistemas de conocimiento y propiedad comunitaria de los PI. Sierra (2019, p. 369) anuncia ese peligro al denunciar que “las esporádicas alusiones a los conocimientos tradicionales...en la disciplina biomimética...acaban integrándose en la lógica implícita de traducción y ajuste de las coordenadas discursivas de la techno-ciencia moderna. Se trata pues de “una resignificación de la estructura perceptivo-conceptual de la praxis ambiental indígena en los términos fijados por los esquemas epistémicos comprensibles desde occidente” (*Ibidem*). Fruto de esta realidad ambivalente, debemos enfrentarnos al peligro que supone una práctica de la biomimesis que considere a los ecosistemas del mundo, muchos de ellos en tierras indígenas, “los últimos horizontes epistémicos a los que aplicar, hasta el agotamiento, el principio de utilidad de acuerdo a la lógica competitiva del mercado a la escala global” (*Ibidem*, p. 381).

Como resultado, la apuesta por una biomimesis-terra-nullista, degeneraría en una profundización en los mecanismos de apropiación, extracción y despojo genocidas que asolan a los PI.

Consciencia de la carga colonial y la arrogancia académica

Nuestros contactos con PI están condicionados por el desarrollo de un proceso colonial que a través de los siglos ha colocado a los PI en situación agónica, imponiéndoles estructuras de aculturación científica y religiosa que amenazan su identidad y sus saberes, convertidos en realidades subalternas. Especialmente, la ciencia y la tecnología se han destacado como instrumentos colonizadores y formas sofisticadas del conocimiento consideradas como las únicas válidas, objetivas y universales (Fonseca & Jerrems, 2012). En este contexto, las otredades indígenas encarnada en “las otras formas de ser, las otras formas de organización de la sociedad, las otras formas del saber, son transformadas no sólo en diferentes, sino en carentes, en arcaicas, primitivas, tradicionales, premodernas. Son ubicadas en un momento anterior al desarrollo histórico de la humanidad, lo cual dentro del imaginario del progreso enfatiza su inferioridad” (Lander, 2000, p. 24).

Este proceso de aculturación durante los siglos XX y XXI ha sido acometido principalmente dentro de políticas de desarrollo que han generado imágenes muy

negativas de los PI vinculándolos a estadios previos de desarrollo y altos niveles de pobreza. En esta construcción en negativo de la otredad indígena ha sido fundamental el papel de las Ciencias Sociales y su contribución a los diferentes paradigmas del desarrollo (Fonseca & Jerrems, 2012). “El desarrollo como discurso y dispositivo de poder, al apoyarse en las ciencias sociales como garantes de conocimiento objetivo de los paisajes a intervenir-desarrollar, determina por consiguiente, la validez del conocimiento occidental como forma apropiada para la concreción del tal propósito, a la vez que desconoce y descarta en principio el ‘conocimiento tradicional’, el conocimiento de los ‘otros’ o las modalidades locales de configurar-explicar el mundo. De esta forma, el conocimiento de los expertos y técnicos entrenados en el saber occidental -de manera general y específicamente en el marco del desarrollo-, al alcanzar centralidad en tanto referente ‘superior’ y ‘universal’, subordina e incluso presenta al conocimiento local como un óbice a la tarea de transformación-redención que preconiza el desarrollo. El desarrollo a través del conocimiento experto logra la obtención de una matriz ‘científica’ o una radiografía acerca de los paisajes biofísicos y culturales necesitados de intervención-desarrollización, privilegiando el potencial que en términos de recursos alcanzan significación en el contexto de nuevas dinámicas económicas” (Quijano, 2002, p. 75). Es una relación caracterizada por el diferencial de poder entre saberes que tiene importantes consecuencias en la cotidianidad indígena por ser causa de procesos de cambio exógeno en sus vidas y comunidades. Esta realidad es observable en el uso de un discurso experto relacionado con diversas ciencias sociales que interactúan en la cooperación al desarrollo. Así pues, “desarrollo, biodiversidad, sustentabilidad, necesidades básicas, planificación, etc., son discursos expertos a través de los cuales se definen problemas, se diseñan instituciones, y se interviene y administra gran parte de la vida de las comunidades y ciudadanos” (Escobar, 1996b, p. 355) en diferentes zonas del planeta. Junto a esta presencia de las Ciencias en el presente indígena resalta también una narrativa de la historia y la geografía en Latinoamérica que ensalza las gestas de las élites eurocéntricas (Correa & Saldarriaga, 2012) y que continúa describiendo a los territorios indígenas como “territorios baldíos”, entornos salvajes e inhóspitas zonas de frontera sin explotar que ofrecen oportunidades a la civilización y el progreso representados en la idea de desarrollo. Paralelamente, en los textos escolares latinoamericanos y españoles se describe a los PI como realidades homogéneas, estáticas, identificadas con los grandes imperios existentes al comienzo de la colonización (Jara & Salto, 2016) y mayoritariamente vinculadas a estadios pretéritos del “desarrollo humano”, con conocimientos y tecnologías caracterizadas como rudimentarias

frente a los modelos encarnados por los estados-nación (Da Silva & Pages, 2016). Existen muy pocas voces indígenas que hablen en primera persona de sus culturas y realidades contemporáneas.

Así pues, queda manifiesto “que los modelos analíticos de las ciencias sociales, hacen parte de un mismo dispositivo normalizador, donde se conjuga la colonialidad del poder y la colonialidad del saber, en tanto eslabones de un proyecto de organización y control de la vida, la cultura y la naturaleza. Es preciso recordar cómo las ciencias sociales y en consecuencia el conocimiento experto se soportan en un imaginario ideológico colonial, constituyéndose como un fenómeno propio o aditivo de las formas de organización política que apunta a la cristalización de las relaciones de producción” (Quijano 2002, p. 74).

Recogiendo las propuestas realizadas por do Santos, Zeballos (2015, NET) denuncia que las Ciencias Sociales generan una situación de epistemicidio fundamentado en las siguientes monoculturas: 1) del saber y del rigor que descacredita los conocimientos alternativos 2) del tiempo lineal y la idea de que la historia tiene un sentido de progreso, de desarrollo al que deben de aspirar los otros pueblos no europeos 3) de la naturalización de las diferencias que ocultan las jerarquías 4) de la escala dominante donde lo global es hegemónico y lo particular-local no cuenta, y 5) del productivismo capitalista que se aplica tanto al trabajo como a la naturaleza y desecha toda otra lógica productiva.

Fruto de lo anteriormente señalado, los PI sufren de un fenómeno agudo de aculturación “que, entre otras graves consecuencias, ha supuesto para muchos hombres y mujeres indígenas, especialmente para los que viven en el medio urbano, la pérdida de su propia identidad. Tales procesos conllevan la desvalorización individual y colectiva, así como el desprecio y abandono de la propia lengua, costumbres y conocimientos indígenas, lo que finalmente quiebra las estructuras sociales, económicas y políticas propias” (Martín, 2007 p. 33). Este fenómeno aparece también entre los profesores indígenas de la EIB consultados que, a pesar de ser indígenas y dominar el quechua, reconocen la existencia de dificultades a la hora de desarrollar su actividad porque gran parte de su desarrollo académico se ha producido en el sistema occidental dominante. Esta realidad genera contradicciones y una baja autoestima fruto de la aculturación y epistemicidio que han sufrido durante siglos. Esta realidad que se contrapone con la imagen idealizada de algunos de nuestros alumnos europeos que conciben a los indígenas como culturas en los márgenes de la sociedad moderna y en aislamiento relativo pero que con una identidad étnica fuerte y gran autoestima. Los indígenas sufren los diferentes niveles de impacto de una sociedad globalizada que ha penetrado

y condicionado sus culturas fruto de las políticas de desarrollo impulsadas por estados e instituciones internacionales. Los procesos de extracción y apropiación propios del colonialismo avanzado actual también tienen reflejo a nivel educativo.

Evitar el colonialismo académico. La comunidad como garante y responsable de la investigación

Las investigaciones desarrolladas en el marco de la Biomimesis o la Didáctica de las Ciencias Sociales que tengan como objetivo colaboraciones relacionadas con el patrimonio indígena, tanto material como inmaterial, deben partir de respeto al derecho de autodeterminación indígena y deben recabar el consentimiento libre, consciente e informado de la comunidad beneficiaria.

Debemos tener en cuenta que el CI encarna formas complejas de conocimiento subalterno y periférico que se ha mantenido en formas de historias, leyendas, canciones, prácticas, rituales, creencias y tradiciones transmitidas principalmente de forma oral. Integrar esta oralidad en las escuelas y convertirla en un pilar fundamental de la EIB constituye uno de los retos principales en cualquier estrategia para fortalecer el CI y las culturas de los PI. En este proceso la participación de los taitas -ancianos sabios- resulta fundamental y por ende la participación de la comunidad por resultar un espacio-actor social fundamental en la cosmovisión andina. Con el fin de crear puentes entre la comunidad indígena y los especialistas locales en conocimiento tradicional ”es necesario tener muy presente el papel que juegan las autoridades tradicionales, personas ancianas, sabios y sabias, en el proceso de socialización de los más jóvenes y en la transmisión de conocimientos de la cultura propia” (Estrategia Española de Cooperación con los Pueblos Indígenas, 2007, p. 33) y habilitar cauces para su participación en actividades y en el uso de recursos externos a la escuela que ayuden a vivenciar de forma práctica.

Tanto en la educación como en cuestión de mantenimiento del CI resulta fundamental contemplar las diferentes dimensiones profundamente interconectadas que conforman la realidad indígena (individuo, familia, comunidad, pueblo) y que constituyen parte del proceso de educación-investigación y de su valoración posterior. Es necesario contemplar la importancia del diálogo y las reflexiones realizadas con la comunidad y con la familia centrada en los avances, orientación y mejora de una EIB comprometida en el reforzamiento de las prácticas culturales fundamentales identificadas por la comunidad.

La comunidad que actúa como facilitador entre los diferentes niveles de actuar

educativo debe saber cuáles son los objetivos de la investigación y sus posteriores desarrollos despejando cualquier duda que puedan tener al respecto. Se trata de trabajar un marco de acuerdo en el que la propia comunidad y pueblo indígena controle la investigación y el impacto que ésta pueda tener en el desarrollo de la EIB y la institución a la que asisten sus hijos-hijas-hijas.

Esta condición plantea un problema fundamental y que en ausencia de permiso puede tener una gran repercusión negativa en los anteriormente citados contextos de aculturación y apropiación cultural del patrimonio inmaterial indígena. En el actual contexto de colonialismo avanzado debemos ser conscientes de que “el conocimiento local efectivamente asiste a un proceso de resignificación, en la perspectiva de su posicionamiento, de una parte como epistemes que facilitan el pensar, aprehender, construir, comprender y asimilar las múltiples realidades, los múltiples ordenes de realidad, y de otra, como construcciones complementarias que recodificadas utilitariamente por la ciencia occidental, contribuyen a la conquista de territorios –especialmente las zonas de selva húmeda tropical- y de comunidades, es decir de capital natural y social que hoy interesa al desarrollo cuyo sustrato es el mercado (Quijano, 2002, p. 76). Es por ello fundamental vincular nuestra investigación con la comunidad con el fin de evitar la perpetuación de una lógica colonialista que profundice en la aculturación sufrida por los PI.

Conclusiones

Dentro del esfuerzo global para hacer frente al cambio climático y caminar hacia un modelo alternativo no destructivo, la biomimesis surge como una propuesta atractiva a la hora de concebir un modelo operativo dentro del marco del DS que resulta especialmente sugerente para ser desarrollado en el mundo de la Educación.

Junto con los ODS desde 2015, la UNESCO realizó una apuesta por una Educación para la Ciudadanía Mundial que supere y complete las visiones estatales que priman en la educación formal de los estados existentes. La biomimesis, en conjunción con la Educación para la Ciudadanía Mundial, ofrece un marco innovador para abordar temáticas propias de la Didáctica de las Ciencias Sociales (cuestiones de espacio-tiempo, la causalidad, los mecanismos de cambio y permanencia, el papel de factores y actores de cambio a través de la historia) y su impacto en los ecosistemas de todos los continentes, durante diferentes periodos históricos. Se trata de una propuesta transdisciplinar que permite combinar apor-

taciones y conceptos de distintas ciencias que responden a problemas actuales altamente relevantes a nivel global. Y hacer todo esto desde una perspectiva local que puede adquirir relevancia global ya que coadyuva en un cambio de paradigma que deje atrás aproximaciones extractivo-colonialistas.

En este largo camino por recorrer, es necesario evitar que la biomimesis replique errores históricos y degeneré en un proceso de *terra-nullius*-intelectual que profundice en procesos de apropiación cultural que históricamente han afectado a los PI de todo el mundo. Es por ello que consideramos relevante la aportación de los PI en el desarrollo de la biomimesis.

La introducción del SMK en nuestro programa de Formación del Profesorado en Interculturalidad, mediante la presencia directa de educadores indígenas, ha permitido desarrollar una experiencia de aprendizaje dialógico abordando cuestiones relacionadas con la Educación para la Ciudadanía Mundial desde una perspectiva intercultural y decolonial. Esta experiencia nos acerca a la propuesta de Morin, (2011, en Ruano, 2017, p. 37) de generar una “triple reforma epistemológica, política y educativa” mediante un choque de saberes entre profesores indígenas y alumnado europeo no indígena. Este formato innovador posibilita, asimismo, plantear cuestiones relacionadas con la globalización, la pobreza y la marginación, ofreciendo una perspectiva histórica de procesos coloniales pretéritos y contemporáneos, una foto de las complejas situaciones de violación de derechos humanos generadas y una oportunidad para trabajar procesos de resistencia y contribuciones actuales. La interacción directa con PI posibilitó a nuestro alumnado superar sus prejuicios y desarrollar un diálogo intercultural en torno a las alternativas indígenas al DS que tienen su plasmación real en la EIB. El debate permitió, además abordar la compleja temática de la educación intercultural y la ciudadanía global, escuchando los testimonios en viva voz de los PI, en su calidad de sujetos políticos activos y constructores de una ciudadanía democrática intercultural. Este testimonio nos permite introducirnos en la compleja temática del desarrollo y la ciudadanía global, mirando a la sostenibilidad, la pobreza y la desigualdad con otros ojos.

La experiencia desarrollada nos coloca en una mejor situación para avanzar en la consecución de un mundo más sostenible basado en una ciudadanía transformadora que integra y aprende. Esta ciudadanía global, parte fundamental de lo que los indígenas denominan “red de vida”, y nos permita avanzar en la consecución de los ODS contemplando las potencialidades ofrecidas por la biomimesis como un marco de teoría-acción para el afrontar las consecuencias del gigantesco desafío civilizatorio que encarna el cambio climático. Con esta colaboración es

posible facilitar el tránsito de un largo periodo histórico de conquista extractivista a uno de convivencia e interacción respetuosa con otras formas de vida existentes en nuestro planeta. En este proceso contemplamos la integración de la biomimesis como propuesta interesante dentro del SD y que puede desarrollarse en el marco de la Didáctica de las Ciencias Sociales, con iniciativas didácticas tanto conceptuales como procedimentales.

Finalmente queremos destacar la importancia de desarrollar experiencias didácticas exitosas que acerquen la riqueza y variedad del patrimonio indígena a las aulas del Norte desarrollado. Asimismo, es fundamental generar espacios de *yachay tinku* educativo en universidades no indígenas del mundo que contribuyan en los esfuerzos de generar nuevos marcos civilizatorios inspirados en la biomimesis para un mayor desarrollo humano sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, A. (2008). El buen vivir, una oportunidad por construir. *Ecuador Debate*, 75, 33-48.
- ALTMANN, P. (2017). Sumak Kawsay as an Element of Local Decolonization in Ecuador. *Latin American Research Review*, 52(5), 749–759.
- ARCE, O. (2007). Tiempo y Espacio en el Tawantisuyu: Introducción a las Concepciones Espacio-Temporales de los Incas. *Nómadas*, 16, 383-391.
- ARREGUI-ORUE, J. I. (2012). *Cuarto mundo: La acción exterior de los pueblos indígenas como instrumento de cambio y reconocimiento internacional*. Obtenido de <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2011/jiao/introduccion.html>.
- AYESTARÁN, I., & FERNÁNDEZ, Á. M. (2011). Pensamiento abismal y ecología de saberes ante la ecuación de la modernidad. En homenaje a la obra de Boaventura de Sousa Santos. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 16(54).
- SOBREVILA, C. (2008). *The Role of Indigenous Peoples in Biodiversity Conservation. The Natural but often Forgotten Partners*. Washington: Banco Mundial
- BANKS, J. A. (2008). Diversity, group identity, and citizenship education in a global age. *Educational Researcher*, 37(3), 129-139.
- BATTISTE, M. (2008). 'The struggle and renaissance of indigenous knowledge in Eurocentric education'. En Villegas, M., Neugebauer, S. R., & Venegas, K. R. (2008). *Indigenous knowledge and education: Sites of struggle, strength, and survivance*. Cambridge, MA: Harvard Educational Review.
- BLOCK, V. y GREMMEN, B. (2019). Innovación ecológica: la biomimesis como una nueva forma de pensar y actuar ecológicamente. En Sierra, C. *et alia* (2019). *Re-descubriendo el Mundo Natural. La Biomimesis en Perspectiva*. Bogota: UNAD.
- BERNAL, H. (2019) Biomimesis. La nueva cultura de las sostenibilidad para el desarrollo humano. En Sierra, C. *et alia* (2019). *Re-descubriendo el Mundo Natural. La Biomimesis en Perspectiva*. Bogota: UNAD.
- CASTELO, M. P. (2014). Los indígenas en la enseñanza de las ciencias sociales en España. Silenciamiento, burlas y romanticismo. *Clio & Asociados*, (17).
- CASTRO-GÓMEZ, S., y GROSFUGUEL, R. (2007). *El giro decolonial: Reflexiones para una diversidad epistémica más allá del capitalismo global*. Bogotá: Siglo del Hombre Editores.
- CHOQUEHUANCA, D. C. (2010). Hacia la reconstrucción del Vivir Bien. *América Latina en Movimiento*, 452, 8-14.
- CHUJI, M. (2008). 'El Estado plurinacional'. *Yachaykuna: Saberes*, 8. Instituto Científico de Culturas Indígenas.
- COLLADO RUANO, J. (2017). Biomimesis: Un abordaje transdisciplinar a la educación para la ciudadanía mundial. Obtenido de http://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____3056::08dd50938f169fb4152eb247f701067d.
- COLLADO-RUANO, J y Malo-Larrea, A. (2019) Biomimética y ciencias de la complejidad: fundamentos para el desarrollo regenerativo. En Sierra, C. *et alia* (2019). *Re-descubriendo el Mundo Natural. La Biomimesis en Perspectiva*. Bogota: UNAD.
- CORREA MUÑOZ, M. E., y Saldarriaga Grisales, D. C. (2014). The Latin American Indian epistemicide: Some thoughts from decolonial critical thinking. *Revista CES Derecho*, 5(2), 154-164.

- DA SILVA, A. y PAGES, J. (2016). La identidad y la alteridad en el currículo de historia de secundaria de Brasil y de España. Un caso: América latina. En AUPDCS (Ed.), *Deconstruir la alteridad desde la didáctica de las ciencias sociales. Educar para una ciudadanía global*. Las Palmas de Gran Canaria: AUPDCS.
- DE SOUSA SANTOS, B. (2010). *Refundación del estado en América Latina: Perspectivas desde una epistemología del sur*. La Paz/Bolivia: Plural editores.
- DERUYTTERE, A. (2001). *Pueblos indígenas, globalización y desarrollo con identidad: Algunas reflexiones de estrategia*. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo.
- FONSECA, M., y JERREMS, A. (2012). Pensamiento decolonial: ¿una "nueva" apuesta en las relaciones internacionales?. *Relaciones Internacionales*, (19), 103.
- GUERRERO, M. M. L. (2016). Alteridad y educación: Aprendiendo a conocer la llegada de europeos a tierras americanas. En AUPDCS (Eds.). *Deconstruir la alteridad desde la didáctica de las ciencias sociales. educar para una ciudadanía global*. Las Palmas de Gran Canaria: AUPDCS.
- HIDALGO-CAPITÁN, A., y CUBILLO-GUEVARA, A. (2014). Seis debates abiertos sobre el Sumak Kawsay. *Iconos. Revista de Ciencias Sociales*, (48), 25-40.
- HUANACUNI, F. (2010). *Buen Vivir / Vivir Bien. Filosofía, políticas, estrategias y experiencias regionales andinas*. Lima: CAOI.
- JARA, M. Á., y SALTO, V. (2016). La construcción del indio en el discurso y la enseñanza de las ciencias sociales y la historia. En AUPDCS (Ed.). *Deconstruir la alteridad desde la didáctica de las ciencias sociales. educar para una ciudadanía global*. Las Palmas de Gran Canaria: Asociación Universitaria de Profesorado de Didáctica en las Ciencias Sociales (AUPDCS).
- JIMENEZ, N y RAMIREZ, O. (2019) Biomimesis y consumo responsable. En C. Sierra *et alia* (Coord.) *Re-descubriendo el Mundo Natural. La Biomimesis en Perspectiva*: Bogota: UNAD.
- KING, L., y SCHIELMANN, S. (2004). *El reto de la educación indígena: Experiencias y perspectivas*. Paris: Unesco.
- LEFF, E. (2001). Espacio, lugar y tiempo. *Nueva Sociedad*, (175), 32.
- LEYVA, X., y SPEED, S. (2008). Hacia la investigación descolonizada: Nuestra experiencia de co-labor. En Xochitl Leyva, Araceli Burguete y Shannon Speed (Coord.). *Gobernar (En) La Diversidad: Experiencias Indígenas Desde América Latina*. Hacia La Investigación De Colabor. México, Ecuador y Guatemala: CIESAS y FLACSO.
- MAMANI, F. H. (2010). *Buen Vivir/Vivir Bien. Filosofía, políticas, estrategias y experiencias regionales andinas*. Lima: Coordinadora Andina de Organizaciones Indígenas-CAOI.
- MARIOTTO, O. y PAGÈS, J. (2014). Los actores invisibles de la Historia: un estudio de caso de Brasil y Cataluña. En J. Pagès y A. Santisteban (ed.). *Una mirada al pasado y un proyecto de futuro: investigación e innovación en didáctica de las ciencias sociales*. Barcelona: AUPDCS y Universidad Autónoma de Barcelona.
- MCGUIRE-KISHEBAKABAYKWE, P. D. (2010). Exploring resilience and indigenous ways of knowing. *Pimatisiwin: A Journal of Aboriginal and Indigenous Community Health*, 8, 117-131.
- MIGNOLO, W. D. (2002). Geopolitics of Knowledge and the Colonial Difference. *South Atlantic Quarterly*, 103(1), 57-96.
- MILLALEO-HERNÁNDEZ, S. (2019). Recursos genéticos y pueblos indígenas: La tesis de la propiedad cultural indígena frente al dominio público. *Acta Bioethica*, 25(1), 51-61.

- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. (2013). Estrategia de la OMS sobre medicina tradicional 2014-2023. Obtenido de <https://apps.who.int/medicinedocs/es/m/abstract/Js21201es/>
- PÉREZ RUIZ, M. L., y ARGUETA VILLAMAR, A. (2011). Saberes indígenas y diálogo intercultural. *Cultura y Representaciones Sociales*, 5(10).
- PIGOTT, C. M. (2013). Voices of the mountains: Language and identity in andean songs. Obtenido de <https://search.proquest.com/docview/1535044144>
- PIGOZZI, M. J. (2006). A UNESCO view of global citizenship education. *Educational Review*, 58(1), 1-4.
- QUILAQUEO, D. (2007). Representación social mapuche e imaginario social no mapuche de la discriminación percibida. *Atenea (Concepción)*, (496), 81-103.
- RAPPAPORT, J., y PACHO, A. R. (2005). Una historia colaborativa: Retos para el diálogo indígena-académico. *Historia Crítica*, 29, 39-62.
- RUIZ, C. R. G., DORESTE, A. A., y MEDIERO, B. A. (2016). *Deconstruir la alteridad desde la didáctica de las ciencias sociales. educar para una ciudadanía global*. Las Palmas de Gran Canaria: AUPDCS.
- SIERRA, C. (2019) Imaginarios sobre ecología y tecnociencia. El trasfondo epistemológico de la biomimesis. En Sierra, C. *et alia* (2019). *Re-descubriendo el Mundo Natural. La Biomimesis en Perspectiva*. Bogota: UNAD.
- SEMALI, L. M., & KINCHELOE, J. L. (2002). *What is indigenous knowledge?: Voices from the academy*. Routledge: London.
- UNESCO. *Educación para la ciudadanía mundial: temas y objetivos de aprendizaje*. UNESCO: Paris.
- WALSH, C. (2001). ‘¿Qué conocimiento (s)? reflexiones sobre las políticas de conocimiento, el campo académico y el movimiento indígena ecuatoriano’. *Comentario Internacional. Revista Del Centro Andino De Estudios Internacionales*, (2).
- ZEBALLOS, A. P. (2017). Epistemicidio: Así es como la modernidad suprime formas marginales de conocimiento. Obtenido de <http://www.unitedexplanations.org/2015/12/03/31787/>
- ZENTENO BRUN, H. (2009). Acercamiento a la visión cósmica del mundo Andino. *Punto Cero*, 14(18), 83-89.

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, “artefactos naturales” y “artefactos 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 “artefactos 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 (Zimbabue) 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.

La disciplina emergente de la biomimesis como cambio de paradigma hacia el diseño para la resiliencia

Carlos Fiorentino

Universidad de Alberta (Canadá)

Carlos Montana-Hoyos

Instituto de Diseño e Innovación de Dubái (Emiratos Árabes Unidos)

La situación paradigmática en la que están inmersas las disciplinas de diseño como parte de la crisis global impulsada por los seres humanos -a nivel ambiental, social y económico- exige respuestas provenientes de la innovación y del cambio radical. En este contexto, la disciplina de biomimesis¹ surge como una respuesta y un nuevo paradigma de diseño, y puede ser una herramienta poderosa para el diseño de la sostenibilidad y, además, para el “diseño resiliente”. La biomimesis inspira a los diseñadores a aprender de la naturaleza en lugar de usarla como recurso material. Los sistemas naturales conforman un espacio de experimentación para una asombrosa cantidad de formas de vida en perfecto equilibrio con las fuerzas naturales, que viven en una red de mutualismo y sinergia, en una especie de circuito cíclico perpetuo. Podemos aprender de la naturaleza no solo cómo diseñar mejores materiales y artefactos, sino también cómo diseñar mejores sistemas y procesos que favorezcan la creación de mejores patrones de comportamiento. Este artículo explora, desde un punto de vista epistemológico y bajo el modelo de paradigma, la disciplina emergente de la biomimesis, como un paso evolutivo y revolucionario para el diseño, así como un camino necesario hacia un futuro sostenible. De esta forma, se presentan los puntos principales que hacen de la biomimesis un conjunto sustancial de ideas que pueden conducir a la innovación de productos y materiales y a un cambio de paradigma en el diseño, y, asimismo, se exploran diferentes perspectivas con el objeto de proporcionar marcos teóricos a la disciplina. Finalmente, este documento discute la perspectiva de la biomimesis para construir futuros sostenibles, vinculándola con el concepto de “diseño resiliente”.

Contexto

El diseño, entendido como un amplio conjunto de disciplinas, ha evolucionado

desde la industrialización, y recientemente se ha demostrado que la industrialización ha sido perjudicial para la sociedad, así como destructiva para nuestros recursos naturales y para nuestro medio ambiente (Montana-Hoyos, 2010). La crisis humana actual -ambiental, social y económica- es claramente una consecuencia de la “dinámica de una crisis ecológica” (Bateson, 1972). Esta situación, por tanto, exige respuestas que favorezcan la innovación y el cambio radical. Es imperativo que los diseñadores aprendan de las lecciones que ofrece la naturaleza para cambiar el curso de las prácticas actuales (Fiorentino, 2012) y esto lleva a una siguiente fase en la propia evolución del diseño. Animales, plantas, y todas las formas de vida que conocemos en el planeta han hecho todo lo que los humanos quieren hacer, sin consumir combustibles fósiles, contaminar el medioambiente o comprometer su futuro (Benyus, 1997). Desde la perspectiva de un diseñador, la pregunta que se plantea aquí es qué mejores modelos podrían desarrollarse. La biomimesis parte de esta perspectiva y ofrece un camino hacia el diseño para lograr la sostenibilidad y la resiliencia. Éste es un desafío paradigmático para el conocimiento asociado al diseño y una oportunidad epistemológica para la biomimesis como una disciplina emergente. En este contexto, surge una pregunta inicial: ¿De qué manera la biomimesis, como nuevo paradigma de conocimiento, puede contribuir a construir resiliencia y sostenibilidad a través del diseño? Este documento se centra en esta pregunta fundamental.

La evidencia de más de dos décadas nos indica que la biomimesis ofrece principios fundacionales útiles para los diseñadores (Baumeister, 2013). De hecho, encontrar nuevas formas de abordar el diseño sostenible -a través de los principios de la biomimesis- supone una contribución significativa a la teoría y la práctica del diseño y abre, asimismo, nuevas perspectivas dentro de sus disciplinas. No menos importante es entender también que, a través de la biomimesis, los campos relacionados con el diseño se vuelven verdaderamente interdisciplinarios, integrando no solo a profesionales de diferentes campos propiamente del diseño, sino también de la ciencia -biólogos, físicos, botánicos, entomólogos, ecólogos, etc.- y de las ciencias sociales -ecología humana, antropología, sociología, etc-. Si la sostenibilidad ha influido en el diseño, hasta el punto de ser considerada el desencadenante de un cambio de paradigma, entonces la biomimesis tiene, sin duda, un papel que desempeñar en esta visión.

Con base en la evidencia disponible, creemos que la biomimesis es un paso evolutivo en el campo del diseño; sin embargo, dicha evidencia no proviene de la epistemología del diseño tradicional, sino de un cambio de mentalidad promovido por los pioneros del diseño de inspiración biológica y por las nuevas generaciones de diseñadores que adoptan la biomimesis. Este documento explora la perspectiva biomimética y presenta los puntos principales que hacen de la biomimesis un conjunto sustancial de ideas que pueden estimular la innovación de productos

y materiales. Además de explorar y definir los conceptos, el documento también discute la perspectiva de esta disciplina emergente, entendida como un cambio de paradigma en el diseño, ya que puede constituir la base para un diseño resiliente.

Biomimesis: una aproximación contemporánea al diseño bioinspirado

El concepto de diseño bio-inspirado (o diseño inspirado en la naturaleza) ha existido desde la antigüedad. Podemos remontarnos incluso a los primeros intentos de Leonardo Da Vinci en el siglo XV por diseñar artefactos que imitaban funciones animales como, por ejemplo, la máquina voladora (imitando pájaros e insectos). En ese sentido, han sido diversos los movimientos en el ámbito de las artes, la arquitectura y el diseño que han manifestado profundas influencias e inspiración desde la naturaleza. Algunos de estos movimientos importantes fueron el *Modernismo* (1880-1910), el *Aerodinamismo*, el *Estilismo* y el *Diseño Orgánico* de mediados del siglo XX, hasta llegar a los *Blobjects* de la actualidad. La arquitectura también está llena de ejemplos de inspiración en la naturaleza, pertenecientes a una amplia gama de propuestas que van desde trabajos escultóricos modernistas y biomórficos de finales de 1800 hasta la *Arquitectura orgánica* en la década de 1930 y la *Arquitectura metabólica* en la década de 1960, por nombrar solo algunos de ellos (Montana-Hoyos, 2010). En el campo del diseño, Buckminster Fuller introdujo en la década de 1950 el concepto de sinérgica² y el diseño de las cúpulas geodésicas³ inspiradas en las funciones, la geometría y los patrones naturales (Edmondson, 2007); y Victor Papanek, en la década de 1970, estudió las relaciones naturales entre formas y funciones en su destacada obra *Diseño para el mundo real* (Papanek, 1971). En los campos del diseño asociados a la ingeniería y a la tecnología, diversos enfoques de inspiración biológica han contribuido a generar algunos de los inventos más importantes en los últimos siglos en la historia de la humanidad. No hay que olvidar que los campos de investigación como la biomecánica, la bioingeniería, la biónica, la robótica y la biomimética tuvieron su origen a mediados del siglo XX y hoy en día son campos ampliamente explorados.

Sin embargo, no fue hasta 1997, fecha en que la escritora científica Janine Benyus publicó su libro *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, cuando el concepto de biomimesis se consolidó, dando inicio al “movimiento biomimético”. Al mismo tiempo, el biólogo Steven Vogel desempeñó un papel fundamental en la definición del concepto de biomecánica a través de su libro *Cat's paws and Catapults* (1998). Casi dos décadas después, cabe afirmar que el movimiento biomimético está creciendo exponencialmente⁴ y comienza a diferenciarse de la biomecánica y otros enfoques “bio”. Si bien los límites de los diversos enfoques de inspiración biológica aún no están claros, ya que muchas de estas disciplinas se

superponen, creemos que una de las principales diferencias entre la biomimesis y otros enfoques de diseño inspirado en la naturaleza es su interés en la sostenibilidad y en la conservación del medio ambiente. La biomimesis no solo trata de emular la forma o función de la naturaleza (como la biomecánica o algunos campos de la robótica, por ejemplo), sino que imita el comportamiento, los procesos y los sistemas naturales, adoptando una perspectiva centrada en la búsqueda de soluciones que impulsen y respeten la vida.

La biomimesis (de *bios*, que significa vida y *mimesis*, que significa imitar) constituye una disciplina emergente que estudia el “genio de la naturaleza” e imita conscientemente los principios vitales de adaptación y supervivencia, emulando también formas, procesos y ecosistemas (Benyus, 1997). La biomimesis se nutre, no solo de las formas, funciones o estructuras de la naturaleza, sino también de un sentido sistémico más profundo. Benyus prescribe la biomimesis como un instrumento sostenible para el diseño al sugerir que “la vida nos enseña una lección clara: después de 3.800 millones de años de ‘investigación y desarrollo,’ los fracasos se han convertido en fósiles, y lo que nos rodea es el secreto de la supervivencia” (Benyus, 1997). Los organismos vivos han evolucionado como un conjunto de estrategias que consiguen mantener los sistemas naturales a lo largo del tiempo, y hay muchas lecciones que aprender de ellos. La biomimesis considera el entramado y las complejas sinergias que encontramos en todos los niveles de la biología -entre los genes y las células, las proteínas y los polímeros, los organismos y las especies- como un espacio de experimentación resultante del proceso de la evolución. Estos sistemas han sido moldeados por la selección natural de las especies durante miles de millones de años dentro de una red colaborativa densamente entrelazada, a partir del “mutualismo”, que llamamos vida (Woolley-Barker, 2013). Los organismos y los entornos integran y optimizan estrategias con el objeto de crear condiciones propicias para la vida. El *Antropoceno* (exacerbado por la revolución industrial y el consumismo del siglo XX) ha demostrado ser perjudicial, no solo para la supervivencia humana, sino también para muchas especies y para el medio ambiente (Crutzen, 2006).

El término *Antropoceno* se refiere a la edad geológica actual, considerada como el período durante el cual la actividad humana ha llegado a ser la influencia dominante sobre el clima y el medio ambiente. Debido a que las actividades humanas también se han convertido en fuerzas geológicas significativas, por ejemplo a través de cambios en el uso de la tierra, la deforestación y la quema de combustibles fósiles, se considera justificado asignar el término “antropoceno” a la época geológica actual. Cabe señalar que esta época puede haber comenzado hace unos dos siglos, coincidiendo con el diseño de la máquina de vapor de James Watt en 1784 (Crutzen, 2006) o aun anteriormente con el inicio de la agricultura. Desde algún punto, los seres humanos se han constituido en la especie dominante que ha

generado condiciones contrarias al desarrollo de la vida como sistema planetario. Si, como principio fundamental, la vida crea condiciones propicias para la vida, surge otra pregunta fundamental para los diseñadores: ¿Cómo puede el diseño crear las condiciones propicias para la vida? ¿Puede la biomimesis ser el eslabón perdido que redireccione el diseño para crear condiciones para todos los sistemas de vida? En este tema la contribución de la biomimesis puede ser esencial, en la medida en que su incidencia como un nuevo paradigma en el campo del conocimiento permite desempeñar un papel en la innovación del diseño que cree las condiciones para contribuir positivamente al sostenimiento de los ecosistemas del planeta.

Es importante diferenciar la biomimesis o bioinspiración con respecto a la bio-utilización o tecnologías bio-asistidas. Por ejemplo, usar bacterias para limpiar el agua, alimentos genéticamente modificados o cualquier forma de domesticación de formas de vida son todas formas de bio-utilización. A diferencia de la bio-utilización, la biomimesis estudia y analiza los fundamentos de la naturaleza para inspirar ideas de diseño: no se trata solo de usarla o replicarla, sino de aprender de ella. La biomimesis contempla la naturaleza como un modelo, como una medida y como un mentor. La naturaleza como modelo, porque imita las piezas maestras de la naturaleza -la fotosíntesis, el auto-ensamblaje, la selección natural, los ecosistemas auto-sostenibles, los sistemas sensoriales y neurálgicos, materiales como la piel y el caparazón, etc.- para ser aplicadas en el diseño y en aquellos procesos que den solución a problemas humanos (Benyus, 1997, p. 13). La naturaleza como medida, porque utiliza un estándar ecológico para juzgar la calidad de nuestras innovaciones basado en lo que funciona, lo que es apropiado y lo que perdura (Benyus, 1997, p. 13). La naturaleza como mentor, en la medida en que propone una nueva forma de ver y valorar los sistemas naturales; introduce una era basada, no en lo que podemos extraer del mundo natural, sino en lo que podemos aprender de él (Benyus, 1997, p. 13). Los biomiméticos, -es decir, los especialistas en biomimética-, creen que la naturaleza es el atlas del que el diseño y los diseñadores pueden aprender. La vida -plantas, animales y microbios- ha estado perfeccionando de modo paciente su producto durante 3.800 millones de años desde la primera bacteria. En ese momento,

(...) la vida ha aprendido a volar, circunnavegar el globo, vivir en las profundidades del océano y en lo alto de los picos más altos, fabricar materiales milagrosos, iluminar la noche, aprovechar la energía del sol y construir un cerebro auto-reflexivo (Benyus, 1997, p. 16).

Una oportunidad epistemológica para un cambio de mentalidad emergente

Para contextualizar la biomimesis desde una perspectiva epistemológica, las preguntas básicas como “¿qué podemos saber de la biomimesis?” y “¿cómo podemos conocerla?” son pasos cruciales para comprender el pasado, presente y posible futuro de esta disciplina emergente relacionada con el diseño. Esto también implica analizar el contexto en el que surge la biomimesis como una respuesta a los paradigmas generales y dominantes.

Ergon Guba (1990) en *The Paradigm Dialog* define paradigma como “un conjunto de creencias básicas que guían las acciones”. Benyus propone a través de la biomimesis no solo un conjunto de creencias básicas -por ejemplo, en el genio de la naturaleza, en la selección natural y en el poder evolutivo de la vida- sino también un nuevo enfoque para entender nuestra existencia biológica y remodelar nuestro papel como especie y como una parte armónica de nuestros ecosistemas. El cambio de enfoque propuesto a través de la biomimesis está impulsando una transformación en la mentalidad y, por lo tanto, un cambio de paradigma de diseño. Tal y como se presentó al comienzo de este artículo, el periodo previo de industrialización, a partir del cual ha evolucionado el campo del diseño, ha llevado a la actual crisis mundial: provocando cambio climático, desigualdad, inseguridad energética, alimentaria y de acceso a agua potable, entre otros problemas globales. El diseño ha sido un instrumento de progreso y un medio para la concreción de los modelos actuales de desarrollo, basados básicamente en el crecimiento económico. Todos los sistemas, artefactos, productos, edificios, ciudades, todo el mundo material y artificial que nos rodea ha sido diseñado intencionalmente por el hombre. No obstante, los recursos naturales se están agotando. Aquí hay que entender que los materiales creados, los procesos de fabricación para crear materiales y la energía demandada por esos procesos son consecuencia de este mundo diseñado por el hombre. Esta realidad hace que los diseñadores sean altamente responsables del estado actual de las cosas y, por otro lado, actores influyentes para generar una etapa de cambio. Por lo tanto, el mundo post-industrial, el mundo post-carbono del siglo XXI exige respuestas evolutivas en el campo del diseño que promuevan la innovación y el cambio radical. Este es el contexto en el que, casi al borde del abismo se sitúa la biomimesis. Sólo hay dos opciones: *cambios producidos por el diseño o cambios producidos por los desastres*.

Ver la vida como un todo -para observar lo que toda la vida tiene en común- requiere un cambio en la forma en que normalmente miramos las cosas. Debemos mirar más allá del insecto, del árbol o de la flor, y buscar una perspectiva más panorámica. Necesitamos pensar tanto en el proceso como en la estructura. Desde este punto de vista ampliado, podemos ver la vida en términos de patrones y reglas. Al usar estas reglas, la vida construye, organiza, recicla y se recrea a sí misma. (Hoagland & Dodson, 1995).

Tal y como se describió anteriormente, es posible ver en la vida y en la naturaleza ciertos patrones que indican el modo en que ésta funciona. Dichos patrones se repiten a diferentes escalas, desde organismos microscópicos y sus partes hasta grandes ecosistemas. Recurriendo a la naturaleza como inspiración, y desde un punto de vista sistémico, cabe dibujar analogías para nuestros diseños fundamentados en estos patrones (Montana-Hoyos, 2010). Hemos compilado los 16 patrones propuestos por Hoagland & Dodson (1995), en combinación con los 9 principios propuestos por Benyus (1997), para proporcionar una lista completa de algunas de las características de la vida y de la naturaleza que pueden imitarse para el diseño de ambientes artificiales. En tal sentido y tras descartar algunas ideas repetidas, hemos identificado 22 patrones o principios:

1. La vida se construye progresivamente de abajo hacia arriba (de simplicidad a complejidad)
2. La vida se ensambla en cadenas
3. La vida necesita un interior y un exterior
4. La vida usa algunos temas para generar muchas variaciones
5. La vida se organiza con información
6. La vida alienta la diversidad al reorganizar la información
7. La vida se nutre de errores
8. La vida ocurre en el agua
9. La vida funciona con azúcar
10. La vida funciona en ciclos
11. La vida recicla todo lo que usa
12. La vida se mantiene por rotación de “stocks”
13. La vida tiende a optimizar en lugar de maximizar
14. La vida es oportunista
15. La vida compite dentro de un marco cooperativo y mutualista
16. La vida está interconectada y es interdependiente (Hoagland & Dodson, 1995)
17. La naturaleza prolifera con la luz del sol
18. La naturaleza usa solo la energía que necesita
19. La naturaleza ajusta la forma a la función.
20. La naturaleza demanda conocimiento local
21. La naturaleza frena los excesos desde adentro
22. La naturaleza aprovecha el poder de los límites (Benyus, 1997)

Para validar la biomimesis como una disciplina relevante y como un elemento importante para reconocer un cambio de paradigma en el diseño, es necesario estudiar su epistemología, es decir, comprender las circunstancias que conducen a los principios resumidos por Benyus y sus recientes predecesores, así como a

su fuente de racionalidad y empirismo. La generación de pensadores -escritores, eruditos, científicos y filósofos- que preceden a Benyus en la comprensión de cómo funciona la naturaleza y cómo se puede aplicar al ingenio humano, se puede encontrar hasta en la interpretación aristotélica del universo y las fuerzas naturales. En palabras de Aristóteles: “*la naturaleza no hace nada inútilmente*”, afirmación que se alinea con muchos de los principios considerados por la biomimesis y mencionados anteriormente. Sin embargo, es preciso remitirse a la generación de ambientalistas y ecologistas que surgió en el siglo XX para identificar las fuentes que inspiraron a Benyus en la creación de un punto de vista epistemológico para la biomimesis, entre ellos Rachel Carson y su libro destacado *Silent Spring* (1962); Amory Lovins del Rocky Mountain Institute; el Biólogo E. O. Wilson, autor de *Biophilia: The human bond with other species* (1984); Hazel Henderson, y sus trabajos fundamentales *Redefining Wealth and Progress: New Ways to Measure Economic, Social, and Environmental Change* (1990), *Paradigms in Progress* (1991) y *Beyond Globalization* (1999); y Paul Hawken, autor de *The Ecology of Commerce* (1993), en cuyas páginas se acuñó el término “economía restaurativa”, en clara referencia a la resiliencia de la naturaleza aplicada a la economía humana. Todos estos influyentes pensadores se mencionan en el libro *Biomimicry*, y todos ellos comparten las bases de una visión común que define el paradigma de la sostenibilidad reconocido en nuestros días por los diseñadores e investigadores del diseño. La biomimesis ha sido entendida y evaluada predominantemente sólo desde un enfoque objetivo, como parte de la cosmovisión que fundamentalmente deriva del positivismo-modernismo (Guba, Nielsen, 1990). Este es un enfoque utilitario ya conocido en las ciencias, en la ingeniería y en la tecnología. Desde otros ángulos menos convencionales y quizás más subjetivos, la biomimesis, la biomimética y el espectro general del diseño bioinspirado pueden revelar ámbitos novedosos para la discusión especulativa. Por ejemplo, desde la perspectiva de la ecología humana, la biomimesis puede relacionarse con la Teoría de “*Affordances*” (Gibson, 1977), que es particularmente atractiva para la idea del diseño bioinspirado. El término “*affordance*” no tiene hasta el momento una traducción definida al castellano, aunque se han propuesto algunos, como “disponibilidades” o “facilitaciones”. Por esto, seguiremos usando el término inglés aquí. La *Teoría de Affordances* de Gibson reflexiona sobre cómo la calidad de los objetos y entornos permite a los humanos realizar acciones determinadas a partir de la relación entre el entorno natural y el humano (Gibson, 1977). Las “*affordances*” se utilizan ampliamente en la actualidad en el diseño de productos e interfaces, y se definen como “propiedades en las que las características físicas de un objeto o entorno influyen en su función” (Lidwell *et al.*, 2003). Es interesante observar que Gibson formuló su teoría de las “*affordances*” mientras estudiaba la naturaleza y las especies vivientes. Este enfoque ecológico abre la oportunidad de aplicar la teoría al diseño de inspiración

biológica. Con base en estas nuevas perspectivas, las preguntas epistemológicas básicas de lo que podemos saber de la biomimesis y cómo podemos conocerla se pueden abordar desde un punto de vista objetivo y subjetivo.

La biomimesis dentro de los nuevos paradigmas del conocimiento: construir futuros resilientes y sostenibles mediante el diseño

Según Thomas Kuhn (1962), un cambio de paradigma es una transformación en las suposiciones básicas dentro de la teoría dominante, predominantemente gobernada por la ciencia. El enfoque de Kuhn sugiere que hay ciertas condiciones que deben cumplirse para reconocer cuándo se completa un cambio de paradigma. Dichas condiciones se relacionan con una estructura constituida por “las tres fases de un cambio de paradigma: una fase de pre-paradigma, una fase de ‘normalidad científica’ y una fase revolucionaria” (Kuhn,1962). Kuhn, al proponer esta estructura, establece cierta afinidad con una idea cíclica. La ciencia eventualmente puede pasar por estos ciclos repetidamente, aunque Kuhn advierte que es bueno para la ciencia que tales cambios no ocurran a menudo o fácilmente (Kuhn, 1962).

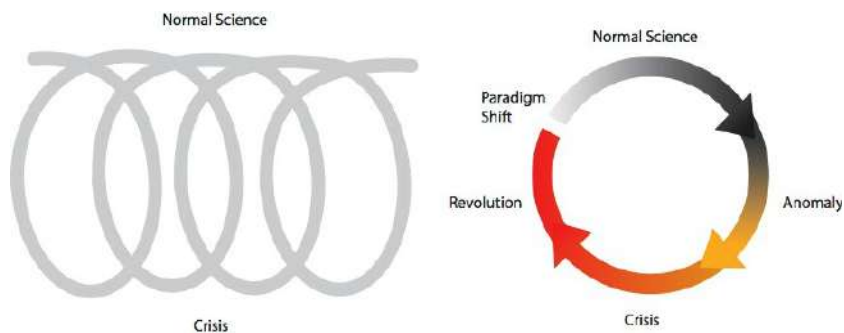


Figura 1. Este diagrama muestra la estructura cíclica de un proceso de cambio de paradigma propuesto por Kuhn. Fuente: Fiorentino, C. (2013)

Al tratar de situar la sustentabilidad en un sentido más amplio bajo esta estructura cíclica -o, en particular, el diseño sostenible y la propia biomimesis como paradigmas de resolución de problemas- resulta necesario comenzar a identificar el contexto desde el que surge la biomimesis durante la fase revolucionaria, en lugar de la fase correspondiente al paradigma dominante, ya que la biomimesis puede ser entendida como un paso revolucionario en la historia del diseño. Según Kuhn, la ciencia revolucionaria implica un cambio en las suposiciones básicas dentro de la teoría dominante o de la normalidad científica (Kuhn,1962). Entendiendo la ciencia en términos kuhnianos como el conjunto de sistemas actuales que han

llevado a un mundo insostenible, la sostenibilidad se ajustaría, entonces, a la idea de Kuhn de una fase revolucionaria. La biomimesis supone una respuesta para la sostenibilidad que se localiza entre la revolución y el pre-paradigma. Las primeras etapas de la conciencia ecológica y los diseños contemporáneos bioinspirados, iniciados por intelectuales y diseñadores pioneros -como Leopold, Carson, Lovins, Papanek, Wilson, etc.- fueron respuestas ante la emergente crisis planetaria, respuestas a las anomalías existentes en el paradigma dominante, es decir, en la cosmovisión positivista modernista heredada de la revolución industrial y acelerada por el sistema derivado de la posguerra mundial. Estas anomalías muestran valores y comportamientos contradictorios. Por primera vez en la historia del planeta, una especie amenaza a todos los ecosistemas que hacen posible su supervivencia y la de otras especies. En nombre del progreso positivista-modernista, la humanidad se dirige a la autodestrucción, devastando, a su vez, el medio ambiente del que depende. Así, el cambio de paradigma se manifiesta desde diferentes perspectivas. Por ejemplo, según el líder aborigen (Iriquoise) Oren Lyons “nos enfrentamos a un período de iluminación”⁵ en el que, como especie, nos hemos dado cuenta de que el cambio drástico es la nueva normalidad y que tenemos que actuar de acuerdo a nuestra naturaleza.

Como se ha dicho desde diferentes puntos de vista, nos enfrentamos a un “punto crítico” o un “punto de inflexión” en la evolución humana desde hace más de tres décadas, (Capra, 1982), y tal circunstancia vaticina grandes cambios tras un período de profunda crisis. Existe una suficiente y abrumadora evidencia científica que demuestra que la humanidad ya no puede continuar haciendo las cosas como acostumbraba sin enfrentarse a problemas terminales, sin tener en cuenta el cambio climático y su consiguiente inestabilidad social, política y económica. La pregunta no es *si*, sino *cuándo, cómo y durante cuánto tiempo* ocurrirán estos cambios, y qué debemos hacer para evitar grandes problemas. Todavía estamos entre el paradigma antiguo y el nuevo, con pensadores influyentes que representan al paradigma establecido, por un lado, “debatendo” (a veces negando) el cambio climático con el propósito de preservar las ideas dominantes y, por el otro, intelectuales con posturas que abogan por nuevos paradigmas que respondan a la realidad del cambio climático a través de la mitigación y la adaptación. Aplicando el modelo paradigmático de Kuhn, el cambio climático podría verse como una anomalía que crea tensión entre la normalidad científica (lo aceptado y lo habitual) y las teorías en competencia (representadas por la idea de sostenibilidad), posibilitando que nuevas disciplinas emergentes como la biomimesis desempeñen un papel en una fase pre-paradigmática y pongan las bases para una ciencia normal futura.

Acercarse a la investigación sobre la biomimesis desde un paradigma positivista-modernista supondría un enfoque erróneo y perpetuaría el modelo del pasado

que ha conducido a los problemas a los que nos enfrentamos hoy. Esta es la forma en que la palabra sostenibilidad ha sido engañosa y mal utilizada por el discurso del paradigma dominante para mantener los negocios, el orden actual y el *statu quo*. Esto puede interpretarse como un error epistemológico (Boehnert, 2011). Vale la pena recordar lo que significa la sostenibilidad en este punto. La sostenibilidad es un término controvertido, semántica y etimológicamente, y complejo en todas sus posibles interpretaciones. Es una “palabra reciente” que ha evolucionado rápidamente en su corta vida (Fiorentino, 2012). Sin embargo, la definición más aceptada de sostenibilidad no aborda la sostenibilidad en toda su extensión, sino más bien, se trata de una definición aplicada a otro concepto: el desarrollo. De hecho, la palabra sostenibilidad no estuvo presente en los diccionarios tradicionales hasta hace poco tiempo. La definición más aceptada de sostenibilidad fue introducida en 1987 por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas (la Comisión Bruntland), foro en donde se acuñó el término de desarrollo sostenible. En dicho informe se define la sostenibilidad como la acción de “*satisfacer las necesidades de la presente generación sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades*” (Bruntland *et al.*, 1987). Por ejemplo, una industria basada en el uso de combustibles fósiles puede satisfacer nuestras necesidades a corto plazo pero comprometerá las necesidades de generaciones futuras. A pesar de esto, en distintos lugares del mundo escuchamos en las principales noticias y en discursos corporativos y gubernamentales declaraciones interesantes como “desarrollo sostenible de la industria del petróleo” (<http://www.energy.alberta.ca/Initiatives/3214.asp>).

La investigación sobre la biomimesis como un camino hacia la sostenibilidad debe enmarcarse en el contexto de un cambio de paradigma en el campo del diseño. Siguiendo la línea de razonamiento de Kuhn, el diseño puede jugar un papel importante al provocar un cambio y la sustitución de una fase por otra dentro del conflicto entre paradigmas. Aplicando el modelo de Kuhn, la investigación sobre la biomimesis se sitúa en un contexto específico, entre una fase revolucionaria ya iniciada a mediados del siglo XX (en respuesta al industrialismo) y una fase previa al paradigma, donde el conocimiento está todavía fragmentado pero en proceso de ser unificado.

Para abordar la pregunta inicial sobre cómo la biomimesis, considerada como un nuevo paradigma de conocimiento, contribuye a construir la resiliencia y la sostenibilidad a través del diseño, es necesario averiguar dónde se sitúa exactamente la biomimesis en el proceso y en la etapa de la fase pre-paradigmática. Lo que está claro es que, en una línea de tiempo imaginaria, la biomimesis de hoy todavía está lejos de la fase de normalidad científica. Aun así, la perspectiva a corto plazo nos hace ser optimistas. La sola idea de sustituir la forma lineal de hacer las cosas por una forma cíclica es una gran transformación en el modo en que la

industria moderna fabricará productos y cambiará el rol de los diseñadores a un nivel paradigmático. Este mismo principio es ampliamente explorado por el enfoque denominado “de cuna a cuna”, en inglés “*cradle to cradle*” (*Cradle to Cradle*, McDonough & Braungart, 2002). Michael Pawlyn, un arquitecto que ha aplicado ampliamente la biomimesis, da un ejemplo de la diferencia de perspectivas:

(...) la manera en que tendemos a usar los recursos es extrayéndolos, convirtiéndolos en productos de vida corta y eliminándolos. La naturaleza funciona de manera muy diferente: en un ecosistema, los desechos de un organismo se convierten en nutrientes para otros organismos del ecosistema (Pawlyn, 2010)⁶.

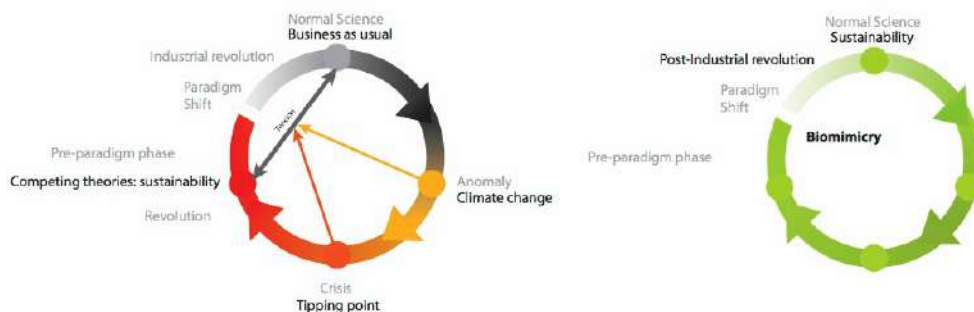


Figura 3. Al aplicar el modelo de paradigma de Kuhn, el cambio climático es visto como una anomalía, y esto genera una tensión entre la ciencia normal (que incide en una lógica convencional de negocios) y las teorías competitivas que surgen como respuesta a la crisis (que promueve la sostenibilidad). Esta situación permite que nuevas disciplinas emergentes como la biomimesis desempeñen un papel en una fase previa al paradigma y establezcan el terreno para un cambio de paradigma y para la ciencia normal futura. Fuente: Fiorentino, C. (2013).

Guba & Nielsen (1990) sugieren que nuestra cosmovisión actual está dominada por tres paradigmas de conocimiento generales: post-positivismo, idealismo crítico y constructivismo⁷. No es una tarea simple ubicar la sostenibilidad o la biomimesis dentro de los límites de estos paradigmas mencionados, ni clasificar la biomimesis o la sostenibilidad bajo ninguna etiqueta disciplinaria (ecologismo, diseño ecológico, etc.). En cambio, la idea de jugar un rol dentro de un “diálogo de paradigmas” de conocimiento abierto que pueda aplicarse pragmáticamente a múltiples disciplinas (Lincoln & Guba, 1996) parece ajustarse mejor a los principios de la sostenibilidad y biomimesis. Este punto de vista puede quizás describirse como parte de una visión posterior al “postmodernismo”, como sugieren algunos autores.

Cabe considerar el surgimiento de la biomimesis como parte de la transición hacia una fase previa al paradigma en la que “*todavía no hay consenso sobre ninguna teoría particular, sin embargo, los métodos de investigación podrían considerarse*

de naturaleza científica” (Kuhn, 1996). Esta fase se caracteriza básicamente por la fragmentación de ideas y enfoques, y por la combinación de teorías incompatibles e incompletas. Una vez más, es difícil determinar cuándo terminará esta fase, si ahora estamos en un período de transición hacia la fase normalidad de la ciencia o qué tan lejos estamos de ella. Las condiciones relativas a una fase de normalidad científica se consolidan cuando los extremos se conectan y las incertidumbres se resuelven dentro del contexto del paradigma dominante. En esta etapa del proceso (el cambio de paradigma), nuestra visión del mundo actual parece estar lejos de alcanzar una “visión del mundo sostenible” y la visión del mundo del diseño en particular parece estar lejos del diseño sostenible, tal y como se plantea en la fase de normalidad científica kuhniana. En este contexto, se comienza a reconocer el valor de la sabiduría de la naturaleza y a desarrollar soluciones inspiradas -nuevos materiales, nuevos artefactos y sistemas- pero aún estamos lejos de aplicar los conceptos universalmente del modo en que lo describe Benyus. Sin embargo, ya se ha dado inicio a un proceso de cambio hacia esta dirección y la aparición y progresiva consolidación de la biomimesis como disciplina es la prueba de ello.

La teoría de la resiliencia aplicada a la biomimesis

Además del marco conceptual dado por la biomimesis, y como respuesta a la crisis impulsada por los seres humanos, el concepto de resiliencia entra en juego y desempeña un papel importante en el contexto de la biomimesis y la sostenibilidad. Desarrollar la capacidad de recuperación es quizás la característica más fascinante que la vida puede enseñarnos, en concordancia con las leyes, estrategias y principios de la naturaleza, tal como se resumió anteriormente. La *Alianza de la Resiliencia* (www.resalliance.org) define la resiliencia “*como la capacidad de un ecosistema para tolerar las perturbaciones sin colapsar y derivar en un estado cualitativamente diferente controlado por un conjunto diferente de procesos*” (Resilience Alliance, 2010). Un ecosistema resiliente puede resistir los impactos y reconstruirse cuando sea necesario.

Los humanos formamos parte del mundo natural. Dependemos de los sistemas ecológicos para nuestra supervivencia pero continuamente impactamos los ecosistemas en los que vivimos a escala local y a escala mundial. La resiliencia es una propiedad de estos sistemas socio-ecológicos vinculados. La resiliencia, aplicada a los ecosistemas o a los sistemas integrados de personas y el medio ambiente natural, posee tres características definitorias:

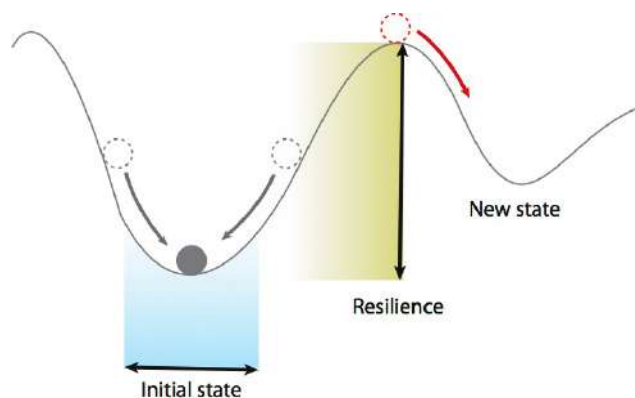


Figura 4. La metáfora de la “bola en una cuenca” explica cómo funcionan los sistemas resilientes. Si se empuja la bola un poco, volverá al fondo del tanque, es decir, a su estado inicial. Si se empuja la pelota con la fuerza suficiente, abandonará la cuenca y finalmente se establecerá en otro lugar, es decir, en un estado adicional. La altura de la cuenca, así, corresponde con la capacidad de resiliencia: cuanto más alta es la cuenca, más fuerte es el empuje que la pelota puede soportar y aun así regresar a su etapa inicial. Fuente: Fiorentino, C. (2013).

- Un sistema es resiliente cuando puede experimentar cierta cantidad de cambios y, a pesar de ello, conservar los mismos controles en cuanto a su función y estructura.
- En cierto grado, un sistema resiliente es capaz de auto-organizarse⁸.
- Un sistema es resiliente cuando posee la capacidad de construir e incrementar la capacidad de aprendizaje y adaptación (www.resalliance.org).

En contraste con la reciente palabra ‘sostenibilidad,’ la palabra resiliencia es antigua, se originó en el siglo XVII y evolucionó a partir del latín *resiliens*, que significa “retroceder”. La resiliencia está estrechamente relacionada con otros dos conceptos clave: flexibilidad y restauración. En la física moderna, la resiliencia está intrínsecamente presente en la segunda ley de la termodinámica, ya que introduce la idea de entropía o transferencia de energía como una condición permanente para el equilibrio negativo y la desintegración. En contraste con la física clásica, las teorías modernas demuestran que los sistemas naturales son *sistemas termodinámicamente abiertos* y exhiben propiedades de auto-organización más allá del equilibrio termodinámico. En términos biológicos, la vida en la Tierra, vista como un sistema completo, es resiliente a la entropía. Esto quiere decir que, si bien las formas de vida se ven afectadas individualmente por el paso del tiempo (desde el nacimiento hasta la muerte), también forman parte de un ciclo que pue-

de desembocar en un equilibrio permanente. La escala de tiempo y la velocidad de los cambios también afectan a la capacidad de un sistema para ser resiliente. Algunos científicos entran en otro tipo de especulaciones, proponiendo que la idea del tiempo en sí es un producto de la entropía. Es decir, el universo se expande y hace que el tiempo exista o se mueva con él. El modo en que las formas y los sistemas vivos se adaptan a esta idea es una manera de ser resilientes ante las fuerzas naturales (Fiorentino, 2012).



Figura 5. “The Fish School Exercise” es una actividad practicada en el curso HECOL 493 *Design for Sustainability* (Universidad de Alberta) que proporciona una demostración práctica de los patrones de autoorganización y de comportamiento (idea recuperada de: <http://www.icosystem.com/labsdemos/the-game>). El ejercicio demuestra que las reglas simples de comportamiento individual pueden conducir a resultados sorprendentemente coherentes a nivel de sistema, mientras que la intuición puede ser un criterio particularmente pobre para predecir el comportamiento de estos sistemas complejos por encima de algunos niveles de complejidad. Con el respaldo de una simulación por computadora, este ejercicio es una herramienta poderosa para entender la dinámica de sistemas complejos y aplicar dicho concepto para desarrollar principios de efectividad y resistencia en los sistemas humanos. Fuente: Fiorentino, C. (2013).

Asociando el concepto de resiliencia con la sostenibilidad, John Lyle escribió el libro *Regenerative design for sustainable development* en 1994, sugiriendo, pero todavía no usando, el término resiliencia. Años más tarde, David Orr en su libro *The Nature of Design* elaboró una inteligente definición cuando describe el diseño ecológico o el ecodiseño, (naciones más cercanas al diseño para la sostenibilidad): “... [el ecodiseño] es un arte por el cual buscamos restaurar y mantener la totalidad de la estructura de la vida cada vez más fragmentada por la especialización, el reduccionismo científico y la división burocrática” (Orr, 2002), en clara referencia al cambio de la cosmovisión positivista-modernista dominante. En esta definición,

Orr (como Lyle) usa los conceptos de restauración y mantenimiento como parte de un proceso integrado de diseño. También se vislumbra un orden cronológico. El diseño, en primer lugar, podría ser capaz de restaurar las cosas, productos, sistemas y comportamientos, para posteriormente mantener un deseado equilibrio. Para diseñar de modo sostenible, primero debemos diseñar para la resiliencia. La resiliencia es, a la vez, un factor condicional y conducente a la sostenibilidad (Fiorentino, 2012).

Aunque la idea de resiliencia está implícita en los principios de biomimesis, Benyus no enfatiza el concepto como lo hacen Lyle y Orr, pese a que estos autores no se refieren al concepto como resiliencia. No fue sino hasta hace muy poco que el término resiliencia comenzó a resonar en artículos relacionados con la sostenibilidad y el diseño de inspiración biológica. Unos años después del artículo de Orr, Carl Folke escribió en otro artículo: “*la perspectiva de la resiliencia se usa cada vez más como un enfoque para comprender la dinámica de los sistemas socioecológicos*” (Folke, 2006) y, más recientemente, el libro de Walker & Salt, *Resilience Practice: Building Capacity to Absorb Disturbance and Maintain Function*, acuña la idea del pensamiento de resiliencia de modo afín a la interpretación de Folke (Walker & Salt, 2012). Todavía el vínculo entre el diseño inspirado en la naturaleza, la biomimética y la resiliencia no está explícitamente presente. En 2013, *The Resilient Design Institute* publicó un breve artículo en su sitio web (<http://www.resilientdesign.org>) llamado *Biomimicry and Resilience*, que alude a otro artículo publicado en *The New York Times*: *¿Posibilitará la biomimesis un futuro, post-Sandy?*⁹ En la *Biomimicry First Global Conference* (Universidad de Massachusetts, Boston, junio de 2013), donde Janine Benyus fue la conferencista principal, después de preguntar cómo la biomimética podría ayudar a prevenir las consecuencias de los desastres climáticos, como el aumento del nivel de los océanos y las inundaciones de los frentes costeros de las ciudades, Benyus respondió: “*vayan a la orilla, den un paseo en la playa, todas las respuestas están ahí. Todo lo que puedes ver allí sobrevivió a la erosión y se adaptó a las condiciones cambiantes durante eones*”¹⁰. Este es un ejemplo de cómo el pensamiento biomimético puede ser articulado y aplicado con un enfoque de integración. Los diseñadores no padecen de una falta de información, sino de una falta de integración. La biomimesis ayuda a abordar esta deficiencia, por ejemplo, integrando la perspectiva de la resiliencia y el diseño en aras de desembocar en un pensamiento de la sostenibilidad. El caso de los frentes costeros es un buen ejemplo de esta integración. Mientras que el pensamiento asociado al diseño tradicional propone construir presas y muros de sacos de arena para evitar el agua, el pensamiento biomimético propone “*estrategias que favorezcan la reproducción de vegetación, la reconstrucción de dunas y bancos de ostras que actúan como arrecifes, protegiendo la tierra del impacto del agua*”¹⁰. Los frentes costeros naturales y las playas son resilientes a cambios en las condiciones del clima

y responden a esta situación después de miles de millones de años de adaptación de una manera sostenible. El diseño puede aprender de ejemplos como este y proporcionar soluciones más efectivas a largo plazo en contraste con estrategias de mitigación a corto plazo.

Conclusiones

Las reflexiones presentadas en este documento enfatizan la relevancia de la disciplina emergente de la biomimesis como parte de los nuevos paradigmas del diseño. En este contexto, la biomimesis puede ser una herramienta poderosa para el diseño de la sostenibilidad y, además, para el “diseño en pro de la resiliencia”. La biomimesis inspira a los diseñadores a aprender de la naturaleza y ofrece un modelo basado en el mutualismo, las sinergias y los ciclos observados en los ecosistemas y organismos vivos. La biomimesis, no solo trata de emular la forma o función de la naturaleza (como lo hacen otras disciplinas de diseño inspiradas en lo *biológico*), sino que imita el comportamiento, los procesos y los sistemas, con un fuerte enfoque en soluciones que son conducentes y respetuosas con la vida. Ofrece también un conjunto de herramientas conceptuales para enriquecer el proceso de diseño, así como guías para desarrollar mejores materiales y artefactos, mejorar los sistemas y crear las condiciones que conducen a mejores patrones de comportamiento. Desde un punto de vista epistemológico, la biomimesis parece llenar los vacíos o carencias transicionales entre las fases del paradigma (como se propone en este documento y con base en el modelo paradigmático de Kuhn) y, asimismo, colabora para lograr formas de pensamiento y conocimiento más inclusivas y conciliatorias para las disciplinas del diseño. Cabe entender el surgimiento de la biomimesis como parte de la transición hacia una fase previa al paradigma en la cual “*todavía no hay consenso sobre ninguna teoría en particular*”. Esta fase se caracteriza básicamente por la fragmentación de ideas y enfoques, y la combinación de teorías incompatibles e incompletas. Esto puede abrir nuevos espacios para la discusión y la generación de conocimiento, y un ejemplo de esto puede ser la inclusión de teorías como la relativa a las “*affordances*” tal y como se describe en el texto. La integración de la biomimesis en campos como la ecología humana y el diseño para la sostenibilidad proporciona orientación teórica y metodológica a la disciplina de una manera holística e interdisciplinaria. La sostenibilidad es un término polémico y complejo en todas sus posibles interpretaciones. En contraste, la palabra resiliencia es antigua, estrechamente relacionada con otros dos conceptos clave: flexibilidad y restauración. La idea de la resiliencia se encuentra implícita en los principios de la biomimesis. Como observación final, cabe concluir que la disciplina emergente de la biomimesis puede desempeñar un papel vital en el

cambio de paradigma que favorezca la sostenibilidad y la resiliencia.

Este artículo es una traducción del original en inglés, publicado en el *International Journal of Designed Objects* y presentado en la *Eighth International Conference on Design Principles and Practices*, 18 de enero de 2014, Universidad de British Columbia, Vancouver, Canada.

Fiorentino, C., Montana-Hoyos, C. (2014), The Emerging Discipline of Biomimicry as a Paradigm Shift towards Design for Resilience. *The International Journal of Designed Objects*. Champaign, Illinois, USA: Common Ground Publishing LLC 8 (1) 2-15 ISSN: 2325-1379.

NOTAS

¹ También referida con el anglicismo “biomimicry.”

² La sinérgica es el estudio empírico de los sistemas en transformación, poniendo especial énfasis en el comportamiento imprevisto del sistema como resultado del comportamiento de cualquier componente aislado, incluido el papel de la humanidad como participante y observador. Fuller acuñó este término mucho antes de que el término de sinergia se hiciera popular.

³ Fuller introdujo el domo geodésico en 1949: un caparazón esférico basado en una red de grandes círculos (geodésicos) sobre la superficie de una esfera. Fuller utilizó un enfoque energético-sinérgico para reproducir la geometría observada en la naturaleza (por ejemplo, los ojos de algunos insectos como libélulas o arañas).

⁴ El Biomimicry 3.8 Institute se fundó en 1998 y actualmente se ha convertido en un centro educativo y una red global que se extiende a representaciones regionales independientes en todo el mundo. <http://biomimicry.org/>.

⁵ Cita obtenida de una entrevista a Oren Lyons incluida en el documental *The 11th Hour* (2007).

⁶ Esta cita fue extraída de la charla -TED Talk- de Michael Pawlyn “Utilizando el genio de la naturaleza en la arquitectura” impartida en Londres en el año 2010. En 1999, Pawlyn fue uno de los cinco ganadores de “*A Car-free London*”, un concurso de ideas para presentar soluciones estratégicas ante las futuras necesidades de transporte de la capital y nuevas posibilidades para espacios urbanos. En septiembre de 2003 tomó parte en un curso intensivo de diseño inspirado en la naturaleza en el Schumacher College, dirigido por Amory Lovins y Janine Benyus. Ha disertado ampliamente sobre el tema del diseño sostenible en el Reino Unido y en el extranjero. Los autores se reunieron personalmente con él en la presentación de los discursos de apertura en la Conferencia de Sostenibilidad a través de la *Biomimética 2012*, celebrado en Arabia Saudita.

⁷ En su sentido más amplio, el positivismo supone un rechazo de la metafísica. Se trata de un planteamiento que sostiene que el objetivo del conocimiento es simplemente describir los fenómenos que experimentamos. Desde un punto de vista positivista, el propósito de la ciencia es simplemente ajustarse a lo que podemos observar y medir. El conocimiento de algo más allá de ello, desde un punto de vista positivista, es imposible. El positivismo fue fuertemente aceptado por el industrialismo en el siglo XX. El realismo crítico es una de las formas más comunes de post-positivismo. Un realista crítico cree que hay una realidad independiente de nuestra forma de pensar que la ciencia puede estudiar. Los positivistas también eran realistas. La diferencia es que el realista crítico post-positivista reconoce que toda observación es falible y tiene errores, y que, por tanto, toda teoría es revisable. El realista crítico cuestiona nuestra capacidad de conocer la realidad con certeza.

Otra forma de post-positivismo es el constructivismo. Los constructivistas creen que cada uno de nosotros construye nuestra visión del mundo en función de nuestras percepciones sobre él. Como la percepción y la observación son falibles, nuestras construcciones deben ser imperfectas. (<http://www.socialresearchmethods.net>).

⁸El principio de auto-organización fue propuesto por los científicos Maturana y Varela a principios de 1960 bajo la teoría de la *Autopoiesis*. Esta teoría sostiene que los sistemas vivos se auto-organizan con mecanismos que mantienen sus formas particulares a pesar del flujo entrante y saliente de materiales, y a través de comportamientos de auto-regulación. La autopoiesis se vincula con la resiliencia, las leyes de la termodinámica y los principios de la biomimesis.

⁹Sandy fue el huracán mas destructivo y fatal de la temporada de huracanes en Norteamérica en 2012.

¹⁰Estas declaraciones fueron parte de notas personales del primer autor cuando asistía a la conferencia magistral en la *Biomimicry Global Conference* en Boston, y se tomaron durante la ronda de preguntas a Janine Benyus el 22 de junio de 2013. No hay registro de esta conversación y no ha sido publicada hasta la fecha.

BIBLIOGRAFÍA

- BATESON, G. (1972). *Steps to an Ecology of Mind*. New York: Ballantine.
- BAUMEISTER, D. (2013). *Biomimicry Resource Handbook: A seed bank of knowledge and best practices*. Missoula MT, USA: Biomimicry 3.8.
- BENYUS, J. (1997). *Biomimicry: innovation inspired by nature*. New York: Perennial.
- BENYUS, J. (2008). A good place to settle: Biomimicry, biophilia, and the return to nature's inspiration to architecture. In Kellert, S. Heerwagen, J. & Mador, M. (Eds.). *Biophilic design: The theory, science, and practice of bringing buildings to life*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- BOEHNERT, J. (2011). *Epistemological Error. A Whole Systems View of Converging Crises*. London: EcoLabs University of Brighton.
- CAPRA, F. (1982). *The Turning Point*. New York: Simon & Schuster.
- CAPRA, F. & Henderson, H. (2009). *Qualitative Growth*. London: The Institute of Chartered Accountants England and Wales.
- CARLSON, R. (1961). *Silent Spring*. New York: Houghton Mifflin.
- CODE, L. (2013). Thinking Ecologically: The Legacy of Rachel Carson. In Kabasenche, W., O'Rourke, M. & Slater, M. *The Environment: Philosophy, Science, and Ethics*. Cambridge (Mass.): MIT press.
- CRUTZEN, P. J. (2006). The Anthropocene. In E. Ehlers, T. Krafft (Eds.). *Earth System Science in the Anthropocene. Emerging Issues and Problems*. Heidelberg: Springer.
- EDMONDSON, A. (2007). *A Fuller Explanation*. Pueblo: EmergentWorld LLC.
- EDWARDS, A. (2005). *The sustainability revolution: Portrait of a paradigm shift*. Gabriola Island: New Society Pub.
- FALCON, A. (2005). *Aristotle and the Science of Nature: Unity without Uniformity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- FIORENTINO, C., MONTANA-HOYOS, C. (2014). The Emerging Discipline of Biomimicry as a Paradigm Shift towards Design for Resilience. *The International Journal of Designed Objects*. Champaign, Illinois, USA: Common Ground Publishing LLC 8 (1) 2-15
- FIORENTINO, C. (2012). Design for Sustainability vs. Design for Resilience: A Time Scale Problem? *The International Journal of Sustainability Education* 8, 30-45.
- FIORENTINO, C. (2012, November). *Applying Biomimicry Concepts in Teaching Design for Sustainability: The most inspiring design solutions are present in nature*. Paper presented at the STB Conference 2012, Saudi Arabia.
- FOLKE, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global environmental change*, 16, 253-267.
- GIBSON, J. (1977). The Theory of Affordances. In Shaw, R. & Bransford, J. (Eds.) *Perceiving, Acting, and Knowing: Toward an Ecological Psychology*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- GIBSON, J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- GUBA, E. (1992). The alternative paradigm dialog. In Guba, E. (Ed.). *The paradigm dialog*. Sage: Newbury Park.
- HENDERSON, H. (1999). *Beyond Globalization*. West Hartford: Kumarian Press.
- HOAGLAND, M. & Dodson, B. (1995). *The Way Life Works*. New York: Three Rivers Press.
- KELLERT, S. HEERWAGEN, J. & MADOR, M. (2008). *Biophilic Design: the theory, science, and practice of bringing buildings to life*. Hoboken, N.J.: Wiley.

- KUHN, T. (1996). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- LIDWELL, W., HOLDEN, K., & BUTLER, J. (2003). *Universal principles of design: 125 ways to enhance usability, influence perception, increase appeal, make better design decisions, and teach through design*. Massachusetts: Rockport.
- LINCOLN, Y. & GUBA, E. Paradigmatic controversies, contradictions, and emerging confluences. In Denzin, N. K., & Lincoln, Y. S. *Handbook of qualitative research*. Thousand Oaks: Sage Publications.
- LOVINS, A. (1977). *Soft energy paths: toward a durable peace*. New York: Harper & Row.
- LYLE, J. (1994). *Regenerative design for sustainable development*. New York: John Wiley.
- MCDONOUGH, W. & BRAUNGART, M. (2002). *Cradle to Cradle*. New York: NorthPoint Press.
- MILLETT, S. (2011). *Aristotle's Powers and Responsibility for Nature*. Bern: Peter Lang.
- MONTANA-HOYOS, C. (2010). *Bio-ID4S Biomimicry in Industrial Design for Sustainability*. Germany: VDM Verlag.
- MONTANA-HOYOS, C. (2010). *The Bio-Inspired Design Landscape, Industrial Design*. BioInspired: Center for Biologically Inspired Design-Georgia Tech. 7-3.
- NIELSEN, J. (1990). Introduction. In Nielsen, J. M. (Ed.). *Feminist Research methods: Exemplary readings in the social sciences*. Boulder, CO: Westview Press.
- ORR, D. (2002). *The Nature of Design*. New York: Oxford University Press.
- PAPANEK, V. (1984). *Design for the real world: human ecology and social change*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- VOGEL, S. (1998). *Cats' paws and catapults: Mechanical worlds of nature and people*. New York: WW Norton & Company.
- VOGEL, S. (2003). *Comparative biomechanics: life's physical world*. New Jersey: Princeton University Press.
- WALKER, B. & SALT, D. (2012). *Resilience Practice: building capacity to absorb disturbance and maintain function*. Washington, D.C.: Island Press.
- WILSON, E. (1984). *Biophilia: The human bond with other species*. Cambridge: Harvard University Press.
- WOOLLEY-BARKER, T. (2013). *How Would Nature Create A 'Generous City'?* Obtenido de <http://www.triplepundit.com/2013/07/creating-conditions-conducive-life-first-biomimicry38-global-conference/>.

Biomimesis para la innovación social y la regeneración medioambiental

Manuel Quirós
Planeta Biomimético (España)

La biomimesis (biomimética, diseño bioinspirado, diseño natural y disciplinas relacionadas) se ha expandido en estos años (Bonser, 2006), en la medida en que representa una disciplina emergente que emula los sistemas naturales, sostenibles por definición, y los traslada a aplicaciones humanas aportando soluciones optimizadas (Quirós, 2016). El mundo está en constante evolución y esto se refleja también en los entornos económicos y sociales. El presente manuscrito plantea la posibilidad de aplicar los principios que extraemos de las estrategias naturales para el desarrollo de una red de emprendimiento colaborativo para comunidades indígenas en una zona Ramsar de alto valor ecosistémico. La justificación para esta propuesta es múltiple. Por un lado, es preciso tener en cuenta el bajo índice laboral entre los más jóvenes y mujeres; esta situación de bajos ingresos obliga a diseñar el establecimiento de actividades económicas vinculadas al territorio: el potencial cultivo de peces autóctonos para el autoconsumo, la venta local, nacional y exportación (a futuro) junto con el cultivo de peces ornamentales y la creación de un acuario de especies amazónicas como atractivo turístico y actividades afines a éste. A todo lo anterior cabe añadir la falta de soberanía alimentaria de proteína de alto valor, dada la creciente disminución de las capturas de pesca. Por otra parte, el estrecho vínculo de la cultura indígena con los ecosistemas acuáticos se alinea con los objetivos de la propuesta. La red indígena planteada, una vez creada, podría impulsar la creación de una gran variedad de emprendedores, no solo en torno a la acuicultura -venta de alevines (semillas), pescado, tratamiento y comercialización, gestión del acuario-, sino también en sectores relacionados con el turismo -alojamientos, restauración, guías,...- o, incluso, en apoyos a la investigación aplicada, formación, etc., hasta llegar a desarrollar más de 20 posibles actividades económicas de desarrollo. Acompañado por un plan de formación continua y específica, de acuerdo con los planes de vida de las comunidades, este proyecto podría proporcionar una capacitación suficiente para el desarrollo de una autarquía (gestión sostenible y regenerativa de los recursos locales). La innovación relativa al proyecto, por otra parte, se centra en el desarrollo de métodos de cultivo de peces en nuevos entornos, la gestión de nuevos recursos y la apertura

de nuevos mercados. La sostenibilidad aquí se basa en la gestión económica de los recursos locales gestionados por las propias comunidades bajo un sistema de economía circular, regenerando parte de lo sustraído a los ecosistemas y produciendo mediante energías renovables. Finalmente, la soberanía alimentaria proporcionará proteínas de alto valor y sin contenidos tóxicos, como el mercurio, que se encuentran presentes en peces de la zona (Ehrlich & Nuñez-Avellaneda, 2016).

Introducción

La situación actual global se enfrenta a numerosos desafíos no resueltos, como la crisis económica, social o ambiental y la urgente necesidad de alinearse con los *Objetivos del Desarrollo Sostenible* de Naciones Unidas, en tanto que se han de impulsar nuevos modelos de gestión económica y social tendentes a la conservación del capital natural. Las empresas, al igual que los bosques, los arrecifes o las colonias de hormigas, son sistemas adaptativos complejos (SAC) (Reeves, 2016), en los que los eventos locales pueden remodelar todo el sistema en el que operan. El desarrollo de analogías y paralelismos entre los modelos naturales y los humanos nos conduce a la biomimesis, disciplina emergente que trata de aprender de las estrategias naturales de supervivencia y sostenibilidad, gracias a su experiencia de más de 3.800 millones de años de vida en la Tierra, para ser aplicados, a su vez, en ambientes humanos (Benyus, 1997). El impacto positivo que esta disciplina tendrá en las economías globales va a ser muy significativa (Fermanian Business, 2010) gracias a la capacidad inherente de sostenibilidad y regeneración que posee la naturaleza (von Gleich *et al.*, 2014). El pensamiento biológico es importante por varias razones. Primero, en los SAC no existe una sola fórmula o marco de acción que funcione siempre; esto es, no es posible articular, ante los cambios dados, la mejor forma de intervenir en una situación dada. Segundo, las acciones que funcionan en los SAC no tienen sentido excepto a la luz del pensamiento biológico. Así, la gestión actual empresarial sigue siendo atractiva precisamente porque se basa en un protocolo conocido, familiar y compartido, centrado en resultados mensurables basados en la eficiencia y la rentabilidad. Y esta circunstancia hace que las iniciativas sean fáciles de explicar, proporcionando una sensación de control. La gestión biológica deja de ser contra-intuitiva sólo cuando los líderes empresariales adoptan una nueva cosmovisión de la gestión. Tercero, la gestión de las empresas con éxito en el entorno actual conlleva el establecimiento de nuevos objetivos en vez de implementar únicamente nuevas herramientas de resolución de problemas. En otras palabras, las empresas necesitan un nuevo “*qué*” así como un nuevo “*cómo*”. Por ejemplo, sobrevivir, además de ganar, optimizar en vez de maximizar; priorizar el aprendizaje a corto plazo, emplear recursos locales en vez

de adquirir los mas baratos. Estas nuevas metas pueden ser adoptadas sólo cuando las empresas incorporen el pensamiento biológico. Este es el reto planteado en la presente propuesta.

La biomimesis, aplicada en la innovación social, es una estrategia de mejora dirigida recientemente a diversos entornos sociales (empresas, ongs, instituciones...) pues, en definitiva, la propia naturaleza humana comparte y se interrelaciona con la totalidad del sistema para ser más resistente (de acuerdo a como funcionan los sistemas naturales y ecosistemas) (Iansiti & Levien, 2004).

Además de las estrategias naturales que se describen a continuación, el emprendimiento es cada día más necesario para el empoderamiento y para el desarrollo de una economía más justa y solidaria. El Estado no va a poder mantener de un modo continuado a las poblaciones dependientes de un subsidio cada vez más escaso. Emprender es una manera de fijar población alineada con una óptima gestión, a largo plazo, de los recursos disponibles de los que dependen.

La acuicultura es un sector en auge que, según numerosos estudios, va a ser fundamental en la provisión de proteína de alta calidad. Las especies seleccionadas en este proyecto son básicamente omnívoras pero mayoritariamente herbívoras, con lo que la proteína necesaria para el crecimiento de los peces procederá alternativamente de fuentes vegetales y de insectos. En ambos casos se trabajará con especies locales que serán cultivadas para tal propósito. Alguna de las especies ícticas, como es el caso del pirarucu (*Arapaima gigas*), es altamente demandada local e internacionalmente y, a pesar de ello, los mercados potenciales están lejos de ser cubiertos (Muñoz-Ramírez *et al.*, 2013). Además, las comunidades amazónicas están íntimamente vinculadas al medio acuático, con lo que las actividades propuestas se correlacionan con su propia cultura e idiosincrasia. El modelo de acuicultura rural ha sido desarrollado en Bolivia aunque se pueden extraer también conclusiones altamente positivas de cara a la aplicación concreta y viable en el Amazonas colombiano. La Biomimesis proporciona un impacto social en el desarrollo de narrativas y agendas de desarrollo de modelos emergentes para la reconstrucción de modelos basados en la funcionalidad de sistemas biofísicos, como es el caso del modelo propuesto (Worldwatch Institute, 2012; Hawken *et al.* 1999; Korten, 2015).

El presente proyecto, por tanto, se alinea al menos con 8 puntos que forman parte del argot biomimético, los llamados *Principios de Vida* o las estrategias naturales de carácter sostenible y potencialmente aplicables en actividades humanas. La biomimesis va mas allá de una nueva manera de plantear, diseñar y producir productos, también presenta alternativas en la propuesta de servicios (Quirós, 2017). Éstos son los siguientes:

Adaptarse a condiciones cambiantes: incorporando diversidad, no sólo en las di-

ferentes especies de peces a cultivar, sino también en la cantidad de modelos de emprendimiento diferentes que el proyecto plantea. De este modo, se potencia la resiliencia económico-social mediante la variación y la descentralización de la dependencia de las políticas de subsidio del Estado.

Estar en armonía con el entorno y ser sensible al mismo: empleando recursos cíclicos de tal manera que el residuo sea igual al recurso, empleando materiales y recursos disponibles locales y propiciando la cooperación y colaboración entre colectivos. Todo en los peces es utilizado para otras funciones más allá de la carne y el consumo de la misma; por ejemplo, la piel y las escamas del pirarucú son aprovechadas para la artesanía o el mercado textil, las vísceras se utilizan para ensilaje y aporte proteico en la formulación de piensos; y el empleo de las chagras para la provisión de nutrientes para las dietas.

Empleo de una química respetuosa: el cultivo de peces se realizará bajo estándares orgánicos y sin empleo de sustancias químicas dañinas, hormonas, etc. Además, la generación de energía se basará en fuentes renovables, se captará agua potable sin perforar pozos mientras que el hielo se elaborará de la atmósfera. Finalmente, el tratamiento del agua para la depuración y eliminación de residuos se realizará con tratamiento de fitorremediación.

Ser eficiente con los recursos: la energía requerida en los procesos, además de ser renovable, será minimizada y compartida a nivel local. Los materiales de construcción serán obtenidos de los entornos locales empleando la mano de obra de los propios beneficiarios del proyecto. El pienso del alimento de los peces se elaborará con las plantas que se cultivan en el entorno.

Integrar desarrollo y crecimiento: mediante la autogestión de las diferentes unidades de negocio se generará crecimiento y mejoras de la calidad de vida de los beneficiarios. Todo lo anterior se verá acompañado por una optimización en el desarrollo de los servicios generales que se manifestará en la propia alimentación, en la sanidad, en la formación, en la concienciación hacia el cuidado del entorno natural, en la calidad en el servicio a los turistas, en el respeto y el afianzamiento de su cultura, etc.

Evolucionar para sobrevivir: el caos climático va a perjudicar a los más íntimamente relacionados con sus hábitats naturales. Las crecidas del río Amazonas, el incremento de los niveles de mercurio, el aislamiento geográfico, la baja formación, etc., constituyen retos y problemáticas que las comunidades van a tener que superar de acuerdo a los modelos de autogestión de sus recursos de los que

dependen. Sólo de esta forma las nuevas generaciones verán con posibilidades el futuro y podrán permanecer en sus tierras.



Figura 1. Esquema de los Principios de Vida propuesto por el *Biomimicry Institute* (traducción del autor).

Contexto geográfico, social y ambiental

La Amazonia colombiana representa más del 40% del país, con el 20% ya intervenido, y cuenta con diversas figuras jurídicas de protección como los resguardos indígenas, los parques nacionales y zonas de reserva forestal. No obstante, las amenazas derivadas de dinámicas económicas extractivistas y poco productivas no generan la calidad de vida esperada y destruyen progresivamente los ecosistemas y sus riquezas (Cepal, 2013). El departamento Amazónico en Colombia tiene cerca de 110.000 km² y se sitúa al sur del país, haciendo frontera con Brasil y Perú. Cuenta con 2 municipios, Leticia (la capital) y Puerto Nariño, además de 9 corregimientos o territorios de jurisdicción (Echeverri, 2000). La situación actual de las poblaciones amazónicas (más de 34 millones, de los cuales 3,5 millones son indígenas) supone todo un reto global que hemos de afrontar para la adecuada conservación de este valioso territorio (Cepal, 2013; DNP, 2010). La lejanía en las conexiones terrestres por carretera, la propia cultura anclada en las costumbres ancestrales y la carencia de formación apropiada, dificulta el desarrollo de una

deseada autonomía económica, a pesar de que el Amazonas alberga numerosos recursos naturales de gran valor. Es importante resaltar que las actividades económicas en la Amazonia han sido, fundamentalmente, de tipo extractivo como, por ejemplo, la explotación de caucho, quinina, pieles, coca, madera, bagres. Todas estas actividades nunca se basaron en una estrategia de planificación, ni tuvieron en cuenta medidas específicas de manejo.

El clima en este territorio es tropical lluvioso de selva, con temperaturas entre 24°C y 28°C, y una humedad que oscila entre el 84% y el 91%. Tres grandes ríos surcan el departamento: el Amazonas, el Putumayo y el Caquetá (éstos dos últimos afluentes del propio Amazonas), marcando profundamente la cultura y modo de vida locales.

La biodiversidad es verdaderamente espectacular, con más de 5.400 especies de plantas superiores, 870 de aves, 210 de mamíferos, 95 de anfibios, 147 de reptiles, 1.000 de peces o 125 de mariposas (Trujillo & Duque, 2014). Anualmente se descubren nuevas especies, circunstancia que no resulta extraña habida cuenta de lo poco que conocemos sobre la biodiversidad (Wilson, 2017).

La importancia de la región amazónica en el contexto mundial no es en modo alguno cuestionable. De hecho, el impacto positivo que genera para la estabilidad del planeta está fuera de toda duda, de acuerdo a las numerosas funciones que, en este contexto, lleva a cabo: la capacidad para regular el clima regional, el mantenimiento de grandes extensiones de selva tropical húmeda virgen, la estabilización de las condiciones climáticas ante el cambio climático o la propia conservación de la biodiversidad (Killeen *et al.*, 2007).

El número exacto de población residente en el departamento Amazónico es incierto, pero se estima en una horquilla que va de entre 45.000 y 50.000 habitantes, según las diferentes instituciones censales (DANE, 2005). Más de treinta comunidades indígenas conviven en la zona y, debido a su rasgo transfronterizo, existen intercambios con sociedades peruanas y brasileras que incrementan dicha diversidad cultural. Algunos de los pueblos indígenas que tienen una mayor incidencia en el territorio del departamento son los Ticuna, Uitoto, Cocama, Kamejeya, Jurumi, etc., y se encuentran distribuidos en el área urbana, en la zona rural, en los resguardos indígenas, en los resguardos Ticuna, Cocama y Yagua, en el Parque Nacional Natural Amacayacu y en algunos terrenos baldíos.

Finalmente, es preciso indicar que el departamento de Amazonas es uno de los más pobres de la República de Colombia ya que ocupa el puesto 31 en la contribución al PIB nacional con el 0,08%, y su participación se ha mantenido en este nivel desde el año 2000. El Índice de Desarrollo Humano (IDH) de Colombia es de 0,79.

El departamento tiene un bajo nivel de desarrollo económico debido varios aspectos, de entre los que cabe destacar la propia ubicación geográfica, al alto coste

de producción y comercialización de bienes y servicios, la visión proteccionista del gobierno, etc. La población, de este modo, se sustenta a través de la producción agrícola a pequeña escala, de la pesca (cada vez menor), de la extracción de madera, del comercio local, del turismo y, en menor medida, de la artesanía. El resultado de lo anterior es una alta tasa de desempleo: entre el 25% y el 28%. En ese sentido, la Amazonía tiene una participación en el PIB nacional del 1,1%, lo que supone que el tamaño de su economía, caracterizada por la desigualdad ínsita de ingresos, no corresponde proporcionalmente a su extensión territorial.



Figura 2. Mapa del departamento del Amazonas, Colombia

Por otra parte, si atendemos a la Encuesta Nacional de Demografía y Salud (2005), se evidencian índices alarmantes sobre la región amazónica colombiana: niveles de desnutrición y anemia superiores al resto del país, lo que puede tener relación con la producción agrícola, la pesca, y la recolección, -la biodiversidad de productos alimenticios y la oferta de pescado en la región, partiendo de la premisa que la población indígena es mayoritaria en estos territorios y que estos pueblos tienden a ser autosuficientes-. El departamento de Amazonas presenta los mayores índices de deficiencia en la ingesta de proteína (50.3%), calcio (96.8%), vitamina C (29.2%) y vitamina A (51.5%) que el resto del país.

A pesar del enorme potencial de la zona, éste no se ha transferido a los procesos productivos. Desde ese punto de vista, varias pueden ser las estrategias a seguir para invertir estos serios datos. En primer lugar, es preciso considerar que la íntima relación de las comunidades amazónicas con el medio acuático favorece

el desarrollo de actividades, como la acuicultura, que reportan beneficios directos e indirectos. Por un lado, se garantiza la seguridad alimentaria mediante la autoproducción y autoconsumo de proteína de alto valor nutricional. Con ello se minimiza la presión de la pesca sobre las especies más vulnerables (que están siendo sometidas a cierta sobre-pesca) y se logra su repoblación (reforzando las poblaciones silvestres). Esta actividad posibilita el aprendizaje para comercializar en la zona y, a nivel nacional, exportar pescado altamente demandado y certificado (abriendo con ello un nicho de mercado atractivo para los mercados europeos, norteamericanos o asiáticos).

Indicador	Población		
	Indígena %	Población Otros %	Total Nacional %
Anemia 6-59 meses	32,6	26,3	27,5
Anemia 5-12 años	11	7,5	8,1
Anemia 13-17años	16,7	9,5	10,6
Anemia Mujeres 13-49 años	9,9	6,8	7,6
Deficiencia de hierro 1-4 años	18,8	9,7	10,6
Deficiencia de hierro mujeres con anemia 13-49 años	59,7	54,5	52,5
Deficiencia de hierro mujeres 13-49 años	21,9	16,7	17,1
Déficit vitamina A, 1-4 años	34,1	22,9	24,3
Déficit Zin 1-4 años	56,3	42,1	43,3

Figura 3. Valoración nutricional en Colombia por poblaciones en 2010. Encuesta Nacional de Situación Nutricional (2010)

Al mismo tiempo, esta iniciativa permite desarrollar modelos económicos paralelos mediante la evisceración y tratamiento del pescado, (y su consiguiente comercialización, promoción, certificación, promoción, transporte, gestión económica, emprendimiento, formación, capacitación) (Bermudez *et al.*, 2010). No es posible obviar aquí la oportunidad de un desarrollo turístico concreto asociado a actividades de restauración gastronómica, alojamiento, guías y excursiones turísticas, control de calidad, desarrollo de la artesanía, etc. Y todo ello bajo un modelo piloto que puede ser extrapolado de modo orgánico a otras poblaciones del país y ser la avanzadilla para sustituir al cultivo de la coca, posibilitar el realojamiento de poblaciones desplazadas por la guerrilla, ofrecer un escenario de futuro para las mujeres y jóvenes en un país que avanza hacia un nuevo modelo de paz definitiva.

Finalmente, muchos son los atractivos turísticos de la zona, como los lagos de Yahuaraca (Leticia) y Tarapoto en Puerto Nariño (recientemente declarado zona Ramsar), el Parque Nacional Natural de Amacayacu (mas de 290.000 Ha) con el centro de visitantes Yawae, el propio Puerto Nariño (pesebre del Amazonas), la

Isla de los Micos, el Cerro Yupatí, el Chorro de Córdoba, el Cerro de los Enanos, múltiples enclaves cercanos a los ríos Caquetá y Aparoris, así como numerosos senderos potenciales (Bassotti *et al.*, 2012) (Municipio de Puerto Nariño, 2008). El delfín rosado, manatíes, jaguares, primates, mamíferos, aves, plantas e insectos permiten una reconexión con la naturaleza al visitante ávido de experiencias (Trujillo *et al.*, 2008). Sin lugar a dudas, el turismo relacionado con la naturaleza y con las culturas étnicas va a representar un importante estímulo en la zona para aquellos que sepan gestionar y proporcionar un valor particular a la actividad principal tradicional (la pesca, la chagra, etc.) del territorio amazónico a partir de este servicio cada día más demandado.

Pero, a pesar de que se tienen detectadas las oportunidades, el sector del ecoturismo-étnico y científico no ha sido planificado, no presenta infraestructuras adecuadas, no se dispone de personal formado que preste servicio adecuado al turista, ni tampoco se han diseñado estrategias de promoción a nivel nacional o internacional. Actualmente, dentro del departamento de Amazonas, Leticia se lleva todo el potencial de rendimiento, pues ofrece más posibilidades al visitante que el resto del territorio. Estas carencias, por otra parte, hacen que los habitantes de Puerto Nariño no posean oportunidades para desarrollar modelos económicos basados en la gestión responsable de sus recursos, pese a que se encuentra en una zona de elevado valor natural (combinado con las culturas indígenas y los valores étnicos). En este sentido, la organización indígena ATICOYA (Asociación de Autoridades Indígenas del Resguardo Ticuna, Cocama y Yagua) cuenta con un programa de turismo sostenible que busca la participación activa y dinámica de las diferentes etnias en el proceso de prestación de servicios turísticos que mejoren la calidad de vida de las comunidades receptoras. Esta puede ser una excelente base desde la que cooperar y trabajar conjuntamente. La siguiente Tabla muestra las posibilidades del sector según fuentes del gobierno colombiano.

Posibilidades de desarrollo de productos turísticos	Muchas posibilidades	Alguna posibilidad	Ninguna Posibilidad	No contesta
Ecoturismo	83,60%	13,00%	0,00%	3,30%
Turismo de aventura	70,50%	23,00%	1,60%	4,90%
Turismo cultural	65,60%	27,90%	3,30%	3,30%
Turismo de negocios	41,00%	34,40%	19,70%	4,90%
Turismo gastronómico	52,50%	39,30%	4,90%	3,30%

Figura 4. Plan Desarrollo Departamento Amazonas 2008-2011

Los beneficios del ecoturismo son numerosos:

- Ayuda a conocer, proteger y conservar zonas naturales a largo plazo.

- Generan modelos de negocio fácilmente implementados por las propias comunidades establecidas.
- Se alinea con las políticas de desarrollo sostenible en una zona RAMSAR, así como con los 17 objetivos de Naciones Unidas para el desarrollo sostenible.
- Ayudan a generar alternativas de empleo, concienciando a los propios habitantes sobre la importancia de su territorio y potenciando su orgullo de pertenencia.
- Afianza un sector multisectorial para las comunidades indígenas.

El modelo de turismo planteado en el presente manuscrito posee 3 pilares principales:

- Equilibrar los factores ambientales, económicos y socioculturales en el campo del desarrollo turístico, de tal modo que garantice la gestión responsable, sostenible y regenerativa.
- Potenciar el respeto a la autenticidad sociocultural de las comunidades, mediante la conservación de su patrimonio (entendiendo éste como una totalidad que contribuye a fomentar la tolerancia intercultural).
- Generar actividades económicas viables a largo plazo que aseguren empleo, la mejora de los servicios sociales, incremento de ingresos y reducción la pobreza.

El proyecto, además de lo anterior, se enmarca con los objetivos estratégicos recogidos en determinados documentos estratégicos de la zona desarrollados por el gobierno colombiano, a saber: *Visión Colombia II Centenario* (2019); *Agenda Interna para la Productividad y la Competitividad*; *Programa JUNTOS*; *Fondo Colombia en Paz*; *Planes de Desarrollo Territorial*; *Planes de Etnodesarrollo* y *Planes de Vida*; *Objetivos del Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas*, etc.

Acciones a desarrollar dentro del proyecto

Se plantean 8 acciones autosuficientes, pero interconectadas entre sí, para el desarrollo del proyecto que se propone y que se describen a continuación:

Acuerdos y reuniones con las comunidades

Se llevarán a cabo reuniones previas para la exposición del proyecto directamente a los propios beneficiarios. Se celebrará un evento en Puerto Nariño en el que se explique el proyecto a los beneficiarios. Mediante la participación activa de las co-

comunidades y agentes sociales implicados (gobierno local, gobierno departamental y ongs), se decidirán con exactitud las acciones propuestas. A este respecto, se diseñarán cuestionarios específicos para la recopilación de información de valor con el objeto de analizar los pros y contras que pueden servir para la materialización con éxito de la propuesta. Se elaborará un documento maestro de cara a la formulación y desarrollo de la propuesta. Y, finalmente, se firmará un documento legal que comprometa la participación activa de los beneficiarios y de los agentes implicados.

Acuicultura de consumo y repoblación

El eje principal del proyecto pivota en torno a los peces. Es por ello que se plantean varias acciones: cultivo de peces para consumo y cultivo de peces ornamentales y para acuario. En tal sentido, se propone llevar a cabo una repoblación controlada de algunas de las poblaciones cultivadas para un reforzamiento de las especies más vulnerables, como por ejemplo el pirarucú. En esta primera fase se requiere, entre otros elementos, de una adecuación correcta de terrenos para construir pozas de engorde y reproductores, sistemas de filtración de agua (fitorremediación), una nave para peces reproductores, una nave *hatchery* para incubación de huevos y alevinaje, un pequeño laboratorio, una oficina, etc. El aprovisionamiento de harinas procedentes de las especies arbóreas (*pepeaderos*) locales y de repoblaciones, junto con el estudio y producción de insectos, proporcionará viabilidad al proyecto a medio y largo plazo. La repoblación sistemática y controlada de las especies ícticas más sensibles, causado por el declive de los *stocks* naturales, devolverá el equilibrio y la sostenibilidad, no solo a las especies en sí, sino también al futuro de la pesca artesanal tradicional.

Procesado y comercialización de pescado

Una vez satisfechas las demandas de autoconsumo de las comunidades implicadas, se procederá, con el sobrante de la producción, a llevar a cabo un proceso de comercialización en la zona de Puerto Nariño (hoteles, restaurantes...). Con el tiempo, se podrá establecer intercambios comerciales en otras áreas más alejadas, incluyendo la propia capital (Leticia). Finalmente y en el marco de un objetivo todavía más ambicioso, se direccionaría la producción a otros mercados a escala nacional, como Bogotá, o a nivel internacional, como algún país de la Unión Europea (especialmente Suiza, Francia o Gran Bretaña, puesto que han mostrado interés, por ejemplo, en el pirarucú congelado).

Obtención de certificación sostenible en tres ámbitos (ecológico -orgánico-, social

-comercio justo o ético- y amazónico -originario y local-).

Esta gestión es imprescindible en la zona por ser territorio Ramsar de cara a poder penetrar en mercados mas exigentes y de mayor potencial de ingresos. Este tipo de mercado crece año a año en EEUU, Japón y Europa.

Acuicultura de cría de peces ornamentales

El mercado de los peces ornamentales mueve millones de años en ventas cada año. La enorme biodiversidad íctica amazónica es bien conocida y constituye un enorme potencial para desarrollar modelos de negocio, a la vez que se preservan las propias poblaciones locales de peces frente al modelo de extracción de alevines de poblaciones naturales. Una vez más, insistimos en la idea de que la repoblación controlada de las especies más vulnerables mantendría las poblaciones en un estado saludable.

Acuario Amazónico

La actividad turística en Leticia crece con la creación del futuro aeropuerto y otros servicios asociados. Puerto Nariño no resulta atractivo desde el punto de vista turístico, a excepción de algunas excursiones de corta duración que apenas reportan beneficios a los habitantes locales. Una instalación modesta pero digna como un acuario amazónico que contenga y exhiba peces autóctonos (como el emblemático y amenazado pirarucú *Arapaima gigas*, la especie más grande de aguas continentales), pirañas, arawanas, bagres, y otras especies de gran belleza y singularidad, puede ser un atractivo turístico significativo, además de constituir una fuente importante para la conservación y la educación ambiental. De este modo, el viajero puede considerar atractiva la visita a Puerto Nariño y dedicar varios días para visitar la zona.

Turismo étnico-ecológico-científico

Se tiene previsto desarrollar planes, excursiones y actividades que generen un modelo de negocio para un tipo turismo que, no sólo reconozca el valor natural del entorno, sino que también considere la cultura de las comunidades y dé impulso a ciertas experiencias científicas llevadas a cabo en la zona por la fundación Omacha. En tal sentido, una visita guiada puede proporcionar mas ingresos al indígena que la propia pesca (Trujillo, 2016, comunicación personal).

Formación continua y capacitación

El éxito del proyecto radica también en un adecuado y específico diseño de un plan de formación para los participantes de las comunidades. Un modelo de formación basado en el enfoque “aprendiendo haciendo” (*learning by doing*) parece, a priori, el sistema a seguir. Esta estrategia responde, no tanto a la necesidad de lograr un título académico, sino más bien a la posibilidad de realizar una capacitación que permita a las comunidades tener la certeza de saber llevar adelante las diferentes actividades que se requieren para el modelo propuesto. En este sentido, el apoyo técnico de docentes, la cooperación y un acompañamiento durante los primeros años del proyecto serán a todas luces claves para lograr el éxito que se persigue.

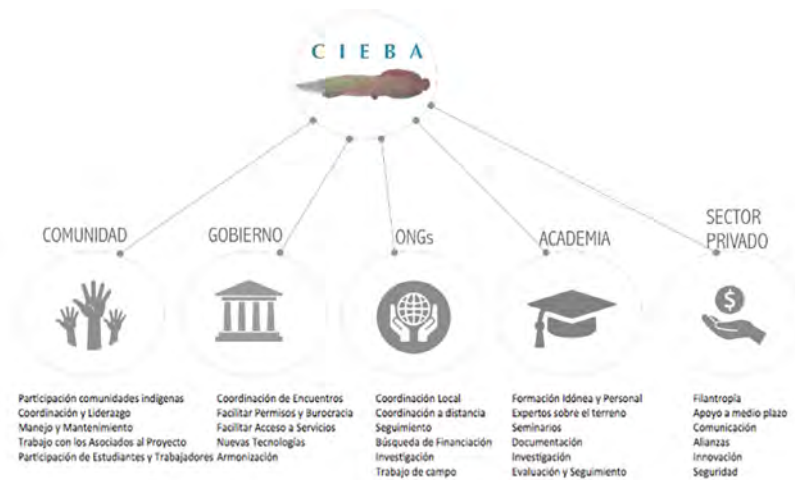


Figura 4. Esquema de colaboración entre instituciones para la presente propuesta

Conclusiones

La cuenca del Amazonas es una de las últimas fronteras del mundo en la que quedan paisajes de conservación relativamente intactos y a gran escala. Se están poniendo en marcha iniciativas y movilizand o esfuerzos para planificar e implementar proyectos de conservación a gran escala en varias partes de la región, con el apoyo técnico y financiero de las principales organizaciones internacionales de conservación. La gestión de estos proyectos es a menudo complicada, especialmente cuando abarcan múltiples propietarios de tierras y dos o más países con legislación ambiental y líneas de autoridad distintas. En el caso de un programa regional, estos proyectos proporcionan un nicho para contribuir y una oportunidad distinta de ayudar a implementar una amplia variedad de actividades, desde la

gobernanza hasta las mejores prácticas de gestión y producción sostenible.

La identificación y difusión de mejores prácticas de gestión para el manejo de los recursos naturales en los ecosistemas fluviales (acuicultura y turismo), brindan apoyo crítico para el desarrollo de mejores prácticas en el caso concreto de los recursos naturales en la cuenca Amazónica. Las mejores prácticas incluyen monitorear y hacer cumplir los derechos de tierras y recursos, reducir los impactos de las industrias extractivas, emplear métodos para reducir el impacto de la tala y apoyar la agrosilvicultura y acuicultura sostenibles (abriendo con ello líneas de comercialización de sus productos con una alta potencialidad). En este sentido, la capacitación a los pueblos indígenas y la implementación de mejores prácticas a largo plazo entre las comunidades resulta, sin duda, fundamental.

La creación de mercados para productos sostenibles es complejo pero esencial. Los mercados representan un obstáculo importante para mejorar la gestión de los recursos por parte de los pequeños productores, que a menudo operan a través de múltiples intermediarios y acuerdos de peonaje en aras de saldar deudas contraídas que instauran un régimen de explotación. Existen varias oportunidades para fortalecer los mercados existentes con productos sostenibles y desarrollar nuevos mecanismos financieros basados en servicios ambientales que resulta obligado explorar. Algunos podrían ser: el fortalecimiento de la industria artesanal de bajo impacto, el fomento de las asociaciones entre las comunidades y los empresarios, el fortalecimiento del biocomercio o bioeconomías y la difusión de la información del mercado entre otros.

Finalmente, el desarrollo de mercados alternativos y mecanismos de financiación para la conservación resultan esenciales. Aunque el valor de la diversidad biológica y los servicios ambientales a menudo no son reconocidos o, por el contrario, son subvalorados por los mercados, se han logrado éxitos recientes, como el establecimiento de pagos por servicios de cuencas provistos por áreas protegidas en Ecuador o Bolivia, con inversiones internacionales en bosques tropicales para el secuestro de carbono. También se han logrado avances considerables en la región para establecer fondos que proporcionen financiación a largo plazo para las áreas protegidas. A pesar de constituir una mayor área de masa boscosa, ninguna iniciativa similar ha sido dirigida hacia los territorios indígenas y sus poblaciones. Estos éxitos recientes nos sugieren que existe una oportunidad para expandir el desarrollo de financiación alternativo para el manejo de los recursos naturales con los pueblos indígenas. Algunas actividades que podríamos destacar al respecto serían: incrementar la valoración del agua a través del manejo integrado de cuencas hidrográficas, sondear posibilidades de ecoturismo con enfoque diferencial étnico, científico y centrado en la biodiversidad, así como lograr la compensación por los servicios ambientales ecosistémicos de la agricultura sostenible y de la acuicultura.

Estos modelos, en suma, pueden llegar a ser implementados y ajustados en otros entornos similares a lo largo y ancho del Amazonas, pues a menudo se repiten de modo recurrente las carencias y las oportunidades potenciales.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCALDÍA MUNICIPAL DE PUERTO NARIÑO AMAZONAS (2008). *Plan de Desarrollo 2008-2011. Un Gobierno con identidad y autonomía*. Puerto Nariño: Coordinación General del Plan de Desarrollo.
- ATICOYA. Asociación de Autoridades Indígenas del Tesguardo Ticuna, Cocama, Yagua de Puerto Nariño. (2008). *Plan de vida de los pueblos Ticuna, Cocama y Yagua de Aticoya*. Bogotá: Opciones Gráficas Editores.
- BASSOTTI, G. (2012). *Plan de Desarrollo Turístico del departamento del Amazonas*. Fondo de promoción turística Colombia & Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.
- BENYUS, J. M. (1997). *Innovation inspired by nature*. New York: Harper Perennial.
- BERMÚDEZ-ROMERO, A. L., TRUJILLO, F., SOLANO, C., ALONSO, J. C., CEBALLOS-RUIZ, B. L. (2010). *Retos locales y regionales para la conservación de la fauna acuática del sur de la Amazonia colombiana*. Bogotá: Corpoamazonia, Instituto SINCHI, Fundación OMACHA, Fundación NATURA.
- BONSER, R. H. C. (2006). Patented biologically-inspired technological innovations: a twenty year view. *Journal of Bionic Engineering*, 3(1), 39-41.
- CEPAL Y PATRIMONIO NATURAL (2013). *Amazonia posible y sostenible*. Bogotá: Cepal y Patrimonio Natural.
- DNP (Departamento Nacional de Planeación). (2010). *Aspectos básicos por grupo étnico indígena*. Bogotá: Dirección de Desarrollo Territorial Sostenible.
- ECHEVERRI, J. A. (2000). *Reflexiones sobre el concepto de territorio y ordenamiento territorial indígena*. Memorias del Simposio titulado “Territorialidad indígena y ordenamiento en la Amazonia”, Leticia.
- EHRlich, M., & NUÑEZ-AVELLANEDA, M. (2016, Junio). *Contaminación por mercurio en ecosistemas acuáticos de la Amazonía colombiana*. Conferencia internacional de Aguas Amazónicas, Lima.
- DANE (2005). *Resultados Censo general de población en Colombia*. Archivo Nacional de Datos. Obtenido de https://formularios.dane.gov.co/Anda_4_1/index.php/catalog/421.
- FERMANIAN BUSINESS & ECONOMIC INSTITUTE (2010). *The Global Biomimicry efforts: an economic game changer*. San Diego: The Fermanian Business and Economic Institute.
- GLEICH A. von., PADE, C., PETSCHOW, U., & PISSARSKOI, E. (2014). *Potentials and Trends in Biomimetics*. Berlin: Springer.
- HAWKEN, P., LOVINS, A. B., & LOVINS, L. H. (1999). *Natural Capitalism: the Next Industrial Revolution*. London: Routledge.
- IANSITI, M. & LEVIEN, R. (2004). Strategy as Ecology. *Harvard Business Review*, 82 (3), 68-81.
- KILLEEN, T. J., DOUGLAS, M., CONSIGLIO, T., JØRGENSEN, P. M., & MEJÍA, J. (2007). Dry spots and wet spots in the Andean hotspot. *Journal of Biogeography*, 34(8), 1357-1373.
- KORTEN, D. C. (2105). *Change the Story, Change the Future: a Living Economy for a Living Earth*. Oakland: Berrett-Koehler.
- MUÑOZ-RAMIREZ, A. P., CORONADO, J. E., & WILLS FRANCO, G. A. (2013). Caracterización nutricional y sensorial de filetes de pirarucú *Arapaima gigas* en Colombia. *Tilapia & camarones: el vocero de América acuícola*, 5 (18).
- QUIRÓS, M. (2016). *Biomimesis. La inspiración consciente y sostenible de la naturaleza*. Ob-

- tenido de <https://websostenibilidad.files.wordpress.com/2013/02/biomimesis.pdf>.
- QUIRÓS, M. (2017). Biomímesis en el diseño. Más allá de la sostenibilidad en el siglo XXI. En Sierra C. H., Sierra, S., & Bernal, H. *Biomímesis: inspiración creativa en la naturaleza y escenarios potenciales de sostenibilidad*. Memorias del simposio internacional de estudios biomiméticos, Leticia.
- REEVES, M., LEVIN, S., & UEDA, D. (2016). The Biology of Corporate Survival. *Harvard Business Review*, January–February, 47-55.
- TRUJILLO, F., ALONSO, J. C., DIAZGRANADOS, M. C., & GÓMEZ, C. (2008). *Fauna acuática amenazada en la Amazonía colombiana. Análisis y propuestas para su conservación*. Bogotá: Fundación Omacha, Fundación Natura, Instituto Sinchi, Corpoamazonía.
- TRUJILLO, F. & DUQUE, S. R. (2014). *Los humedales de Tarapoto: aportes al conocimiento sobre su biodiversidad y uso*. Leticia: Universidad Nacional.
- WILSON, E. O. (2016). *Half-Earth: our planet's fight for life*. New York: Liveright Publishing Corporation & W.W. Norton.
- WORLDWATCH INSTITUTE (2012). *State of the World 2008: Ideas and Opportunities for Sustainable Economies*. London: Routledge.

Introducción a la biomimesis. Aprendiendo de la naturaleza desde las formas, los sistemas y los procesos

Daniel Edgardo Vedoya, Claudia Pilar, Emma Susana Prat, Luciana G. Petraglia
ITDAHU. Universidad Nacional del Nordeste (Argentina)
Caterina Mele, Paolo Piantanida, Valentina Villa
DISEG, Politécnico de Turín (Italia)

Cuando observamos una hoja de algún vegetal, se destaca su forma, su color verde, su aroma, hasta podemos, en algunos casos, establecer a qué especie pertenece. Pasando suavemente los dedos por su superficie reconocemos su textura, suave en algunas hojas, tersa, rugosa, áspera en otras, unas son opacas, otras lustrosas, etc. También apreciamos su espesor, como mínimo, separando ambas caras. Lo que nunca se nos ocurre pensar es qué pasa en su interior y es esto lo que queremos destacar.

Son sólo tres ingredientes básicos los que participan en el proceso más asombroso que sucede en el interior de una hoja cualquiera: agua, dióxido de carbono y luz solar. Los componentes de los dos primeros son: dos moléculas de Hidrógeno y una de Oxígeno (H_2O), en el agua, y una de Carbono por dos de Oxígeno (CO_2), en el segundo, comúnmente conocido también como anhídrido carbónico.

El agua es extraída del suelo por las raíces y trasladada a través de la savia, junto a diversas sales minerales, hacia toda la estructura orgánica de la planta, hasta la punta de la hoja más distante. El dióxido de carbono (CO_2) es absorbido del aire por la hoja a través de los estomas. La energía solar llega del exterior hasta la clorofila contenida en los cloroplastos de las hojas.

El agua llevada por la savia y el dióxido de carbono se descompone formando entre sí moléculas de glucosa o azúcar ($C_6H_{12}O_6$), desprendiendo el oxígeno excedente, que vuelve a la atmósfera. De este modo, se crean nuevas moléculas (grasas y proteínas) que serán el alimento y la fuente de energía de la planta y sus células. Por esta condición se dice que las plantas son autótrofas, es decir, producen su propio alimento. Todo este proceso, conocido con el nombre de fotosíntesis, se realiza necesariamente durante el día, mientras se encuentra presente la luz solar.

En un proceso inverso, durante la noche, la planta respira tomando oxígeno del aire y expulsando dióxido de carbono y agua. Aunque en este proceso las plantas consumen oxígeno, lo hacen en menor cantidad del que producen en la fotosíntesis. Ese oxígeno que producen durante el día es el que utilizan los seres

vivos para respirar.



Proceso de fotosíntesis. Fuente: producción propia

Lo asombroso de este proceso es que se realiza en un medio natural, sin accesorios especiales, no se necesitan probetas, filtros, etc., como si se tratara de un laboratorio de química. Vale recordar aquí el pensamiento de Janine Benyus (2012), presidenta y cofundadora del Instituto de Biomimética (*Biomimicry Institute*) y experta internacional: “...si entramos a un bosque, estamos introduciéndonos en un verdadero laboratorio de química sin necesidad de usar mascarillas ni ningún elemento protector...”.

Un bosque maduro es un prodigio de diversidad, donde se optimizan los recursos y se reciclan los residuos. En él conviven arbustos, árboles, enredaderas, musgos, hongos, líquenes, monos, yagüaretés, carpinchos, escarabajos, hormigas, aves diversas, etc., extendiéndose hacia arriba y hacia abajo, llenando cada recoveco de vida, sin producir residuos. Todo desecho de una especie es alimento para otro organismo.

La naturaleza ha subsistido a través de 4.000 millones de años mediante pruebas de ensayo y error, enfrentándose a una innumerable cantidad de problemas para los que siempre encontró una solución de forma eficiente, eficaz y de la mejor manera. Lo que ahora vive es lo que funciona. Lo que no ha podido resistir los embates de la evolución ha desaparecido. A lo largo de su historia ha desarrollado una diversidad de procesos en los que fue renovando, reciclando o reemplazando y, en todos estos casos, no sólo lo ha hecho, sino que lo ha hecho bien.

¿Por qué, entonces, no observar la naturaleza para entender de qué manera ha resuelto sus problemas?

La respuesta a este interrogante la tenemos hoy en la BIOMIMESIS.

El concepto biomimesis surge de la conjunción de dos vocablos: *bios* = vida y *mímesis* = imitación (imitación a la vida). No obstante, no se trata sólo de imitar a la naturaleza.

“La Biomimesis surge en una era basada, no en lo que podemos extraer de la naturaleza, sino de lo que podemos aprender de ella” (Benyus, 2012).

Debemos comprender cómo la naturaleza ha resuelto sus problemas para aplicar ese conocimiento a la solución de nuestros propios problemas, observando a la naturaleza para aprender de ella. Los expertos afirman que el biomimetismo puede ser considerado como un campo trascendental para seguir avanzando en mejoras tecnológicas, teniendo en cuenta que el ser humano es tan sólo una de las 1,7 millones de especies que viven en el planeta Tierra.

“No sólo basta con conocer las especies, también es importante saber su interrelación, es decir, cómo se ayudan para hacer sus procesos. Toda esta parte es muy interesante para el Biomimetismo y para la humanidad”, afirma Melina Ángel¹, investigadora colombiana del *Biomimicry Institute* en Nueva York.

La biomimesis se presenta así como:

- una rama de la ciencia
- un método para resolver problemas
- un movimiento de un cierto sector de la humanidad
- un paso hacia la naturaleza
- una nueva manera de ver y valorar la biodiversidad
- un punto de partida hacia la sostenibilidad
- una disciplina de diseño
- un aprendizaje de las formas, de los procesos y de los sistemas naturales para crear diseños de tecnologías sostenibles

Las próximas generaciones corren un serio peligro de supervivencia y la biomimesis se presenta como alternativa para abordar este problema integrando procesos que tomen ejemplos de la naturaleza, ofreciendo mejor calidad de vida para los seres humanos y generando empresas ecológicas, que serán mucho más rentables. Para esto, necesariamente, debemos antes conocer cómo se comporta la naturaleza, cómo podemos encarar su estudio desde nuestra óptica de arquitectos o ingenieros, qué podemos extraer de este aprendizaje que sea positivo para la solución de nuestros propios problemas.

Éste es un momento en que la humanidad debe tomar conciencia del peligro de supervivencia que corren las próximas generaciones. La biomimesis se presenta aquí ofreciendo una alternativa.

La integración de procesos dentro de sistemas que imitan a la naturaleza generan empresas que son ampliamente ecológicas y mucho más rentables, prometiendo

una mejor calidad de vida para los seres humanos que trabajan en ella y para sus usuarios. La vida tiene determinados principios que están identificados en las ciencias biológicas. La biomimesis ha extraído estos principios para hacerlos aplicables en el mundo humano. De esta manera, también se crean puentes entre biólogos, arquitectos, ingenieros, tecnólogos y diseñadores en general. Queda entonces expuesto nuestro interés por conocer más de la naturaleza, desentrañar e interpretar sus códigos, comprender sus mensajes y aprender de ella las estrategias que nos permitan resolver nuestros problemas de manera eficiente, eficaz y sustentable.

Un camino apropiado para eso es abordar el estudio de la naturaleza desde tres enfoques diferentes, aprendiendo:

- desde las FORMAS
- desde los PROCESOS
- desde los SISTEMAS

Aprendiendo de la naturaleza desde las formas

En este punto nos referiremos a cómo las formas naturales pueden servir como base para un buen diseño, en el sentido estricto de la biomimesis. Asumimos aquí que la copia simplemente formalista y figurativa de la naturaleza no la consideramos como biomimesis porque tenemos una mirada integral y analizamos las formas, los sistemas y los procesos naturales como modelos de buenas resoluciones de diseño que den respuesta a las necesidades técnicas y de buen funcionamiento.

La forma y las matemáticas

La relación del ser humano con la realidad exterior se realiza por medio de sensaciones visuales, táctiles, olfativas, auditivas, etc.; esa percepción a través de los sentidos es asociativa, aunque en el ser humano es fácilmente comprobable la preeminencia de las percepciones canalizadas por medios visuales. Una forma es inherente a una determinada cosa, es aquello que conocemos de la cosa en primera instancia, lo observable, lo que percibimos a través de los sentidos. La forma es la manera en que los objetos se presentan ante el sujeto, o sea, cómo se nos aparece. Es un hecho de base visual; la expresión implica para nosotros el empleo de todos los sentidos coordinados por la vista, que estructura y orienta los datos provistos por los demás sentidos. Es así que el primer conocimiento formal que tenemos de una cosa es siempre sensorial y no inteligente.

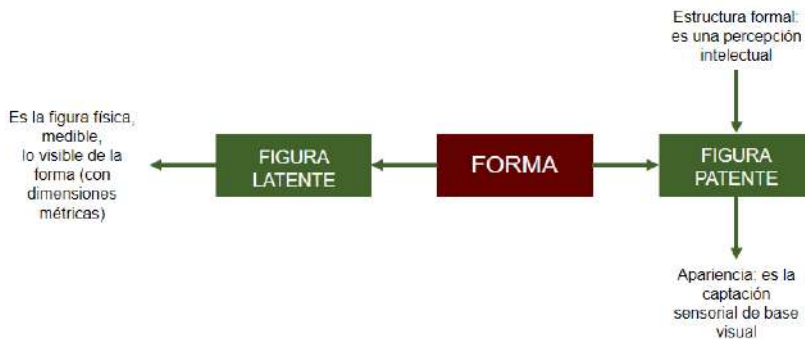
Las matemáticas proporcionan quizás el más amplio bagaje de codificaciones

visuales elaboradas a lo largo de los siglos, no sólo a través de la geometría sino también del análisis y de las múltiples estrategias visuales que se utilizan en el trabajo matemático. Gauss decía que *"el álgebra es la ciencia del ojo"*² y Michael Atiyah, en 1976, expresó:

La matemática que se enseña hoy en la mayoría de los países está aún más lejana de la realidad que la euclídea, porque no tiene ningún apoyo geométrico. Debe tenerse en cuenta que la intuición geométrica es y será siempre la fuente más poderosa para la comprensión de muchos temas³.

La geometría está en la naturaleza, en la forma de los seres animados e inanimados, y parece seguir leyes matemáticas que el ser humano ha intentado descifrar a lo largo de la historia.

La forma en que crecen o en la que se mueven los seres vivos es a veces la razón de su forma, esto explica la abundancia de formas simétricas o el arrollamiento cónico-espiral de los caracoles. Otras veces son las propiedades físicas de la materia y la economía energética de la naturaleza las que explican ciertas elecciones, que parecen más bien hechas por un escultor, como ocurre en el caso de las formas esféricas de las gotas de rocío, las burbujas en líquidos hirvientes o las formas globosas de los frutos. Las formas con curvatura son más abundantes en la naturaleza, las formas poliédricas en las construcciones humanas. Unas y otras disponen de un buen servicio de representación en el plano: las curvas planas y las líneas poligonales⁴.



La forma⁵

El estudio de las matemáticas partió de la formulación de preguntas relativas al mundo, ese mundo en el que se inserta el arquitecto en su labor de diseñador cuando observa las formas naturales para inspirarse.

Funcionalismo ecológico

La conducta constructiva animal revela estructuras refinadas y complejos principios arquitectónicos. Su precisión a menudo supera las capacidades humanas de la construcción en tamaño relativo.

Hoy en día no puede imaginarse otra visión del futuro más deseable que una forma de vida adaptada ecológicamente, donde la arquitectura regrese a las tempranas teorías funcionalistas derivadas de la biología. La arquitectura arraigará de nuevo en su suelo cultural y regional. Podría llamarse a esta arquitectura Funcionalismo Ecológico⁶.

Los animales han resuelto casi los mismos problemas que el ser humano, han creado carreteras (las hormigas), calles cubiertas (termitas), la calefacción y sistemas de regulación de la humedad (termitas, abejas, hormigas), escaleras y rampas (termitas), puertas batientes con tiradores de puerta-trampa (arañas).

Los habitáculos animales tienen una evolución que tiende a la eficiencia a través de minimizar el uso de materiales y mano de obra, cumpliendo con las leyes de mínimo esfuerzo y economía de la sustancia. Algunos animales se alimentan de sus propias construcciones con el fin de reutilizar materiales, algunas arañas comen y el alimento no entra a su sistema digestivo sino que vuelve a entrar en las glándulas de fabricación de su tela, lo que significa que reciclan su propia proteína. En consecuencia, se puede inferir que la biomimesis no consiste en imitar formas primitivas sino todo lo contrario, pues las formas son de una sofisticación tan extraordinaria que no podemos por menos que aprender de ellas. La biomimesis no debe ser meramente metafórica o morfológica sino que se trata de un perfeccionamiento en desarrollo. Un diseño que pretenda ser biomimético debiera realizar las mismas funciones que un árbol en la naturaleza, que es al mismo tiempo, sombra, alimento (con semillas, hojas, ramas, flores, frutos, o corteza), cobijo, fertilizante del suelo y subsuelo, a la vez que consume el dióxido de carbono y emite oxígeno; además de todo esto, forma parte de jardines o paisajes⁷.

Por ende, para imitar a la naturaleza hay que analizarla en su conjunto, como sistema, considerando todos sus procesos. La naturaleza es rica en ejemplos que son imitados por el hombre, desde las mezquitas en África hasta los diseños de Gaudí⁸. En cuanto a la protección frente al medio ambiente y sus depredadores, Santibáñez Saucedo explica en su libro “Biodiseño”⁹ que los animales ofrecen una diversidad de soluciones compatibles.

Control de la temperatura

Al ser el nido, la madriguera, el habitáculo, el capullo, etc., un espacio que extiende las propiedades controlables de la temperatura animal, éste intenta mantenerlo a través de la implementación de otros elementos que contribuyan a no variar

de manera tan drástica este requerimiento. Para ello, distintas especies de aves utilizan musgo, líquenes, plumas, pelos, algodón, fibras vegetales, hojas, ramitas, etc., con el fin de lograr el aislamiento de los cambios bruscos de temperatura, así como para dar, de igual modo, una sensación de comodidad a sus usuarios en su interior. Sin embargo, esto no es exclusivo de las aves. También los insectos lo usan. Una de las especies más interesantes es la termita australiana *Amitermes meridionalis*, o también conocida como *magnetic termite* o *compass termite*, especie de insecto eusocial que orienta sus termiteros exactamente en dirección norte a sur, con el fin de recoger permanente la temperatura irradiada por el sol desde las mañana a la tarde. No obstante, cuando el sol se encuentra en el cenit y la temperatura en el ambiente se incrementa, la manera en que han solucionado formalmente esta situación es a través de la estrechez en su cara superior para enfatizar una forma inclinada que permita controlar el calor recibido, sugiriendo que “*la forma en cuña puede tener la función de facilitar el intercambio gaseoso por el procedimiento de incrementar el área de superficie en relación con la proporción de masa*”¹⁰.

Gestión del agua

Varias especies toman esto en cuenta para evitar el deterioro de sus habitáculos por la acción del moho o parásitos que pudieran afectar el equilibrio natural de sus inquilinos. Las termitas *Cubitermes*, de zonas húmedas y lluvias tropicales, realizan de forma convexa lo que se puede reconocer como el techo para que el agua escurra fácilmente. Realizan además pequeños orificios en los bordes de las partes finales de cada extremo de los techos, que funcionan como chimeneas para extraer el aire caliente del interior.

Impermeabilización y control de humedad

Según Pallasma¹¹ los colibríes recubren de líquenes y telarañas sus nidos para aislarlos de la humedad ya que estos materiales hacen que el agua de lluvia o rocío resbale con facilidad. La tela de araña provee de elasticidad al nido para la seguridad de los polluelos, ya que impide que se desgarre.

Ventilación y renovación del aire

Ésto se verá con mayor detalle más adelante en el abordaje de la naturaleza desde los procesos, cuando analicemos el caso de las termitas *Macrotermes bellicosus*.

Gestión de residuos

Varias especies de hormigas, marmotas y tejones construyen espacios especiales para sus residuos. Las abejas, en cambio, momifican con resina los animales que entran a la colmena para aislarlos del aire y evitar que lo contaminen. Otros animales tienen zonas especiales para sus deposiciones.

Técnicas constructivas

Las técnicas más habituales son el cobijo pre-construido, el esculpido y excavado, el apilamiento, el moldeado modelado y el moldeado extruido e hilado, el enrollado y plegado, el pegado, el tejido y el cosido. Las más interesantes para nuestro propósito son:

- El moldeado a partir de las propiedades naturales de un material. La facultad de moldear obliga a generar una forma diferente a la manifestada de manera inicial en ese material maleable. Esto implica, según Hansell, que el modelamiento de un material para generar una forma especial o el de extrudir significa que el material flexible excretado por el propio animal se traslada a través de un molde o matriz que le da forma particular.
- El modelado es utilizado por especies que pueden producir modificaciones por sus propios medios, como las abejas, que segregan láminas de cera para conformar las celdas que contendrán la miel recolectada o sus huevos. Para el dimensionamiento de las mismas utilizan el tamaño de sus antenas. El hornero, por su parte, transporta bolitas de barro, y la avispa tropical hace sus nidos colgantes con arcilla fina, dejando en ambos casos una abertura para acceder al interior.
- Extrusión o hilado es lo que utilizan la arañas, ejemplo ya conocido, pero también lo hacen algunas mariposas o moscas. Un ejemplo no tan común es el de salanganas, similares a las golondrinas, que hacen su nido a partir de su saliva que endurece en contacto con el aire.

Detalles constructivos y geométricos

Según Charles Darwin, las abejas comunes (*Apis mellifera*) resolvieron de un modo muy práctico la construcción de las celdas de sus colmenas con el menor gasto de material, cubriendo la mayor cantidad posible de superficie y construyendo hexágonos opuestos alternativamente entre sí, con bases formadas por tres láminas romboidales con ángulos de $109^{\circ} 28'$ y $70^{\circ} 32'$ (nótese que su suma da 180°), e inclinados entre sí un ángulo de 120° . La explicación más acertada sobre la cuestión es que esta forma es la que aprovecha al máximo el espacio con el mínimo

de material utilizado. Si tenemos en cuenta el triángulo, el cuadrado, el hexágono y el círculo, considerando un perímetro de 12 cm para cada uno de ellos tenemos que:

- el triángulo posee una superficie de 6,93 cm²
- el cuadrado posee una superficie de 9,0 cm²
- el hexágono posee una superficie de 10,39 cm²
- el círculo posee una superficie de 11,46 cm²

Si bien tanto el triángulo como el cuadrado no dejan espacios libres al combinarse en una trama, ambos cubren una superficie menor; la figura de mayor superficie es el círculo, pero deja vacíos importantes al relacionarse con otros, por lo que, finalmente, resulta ser el hexágono el que ofrece el mejor aprovechamiento del espacio.

Aun así, si lo vemos en tres dimensiones y colocamos esferas o cilindros con fondo redondeado de una sustancia flexible unos al lado de otros, veremos que naturalmente se conforman en una trama hexagonal en 2D o de prismas hexagonales en 3D, y que los espacios vacíos producen una acumulación de material que fortalece la trama a semejanza de nudos o cartelas. No obstante estos ejemplos, sigue siendo un misterio de la naturaleza la toma de decisiones de las abejas.

Existen, además, otras características en los panales de abejas que son peculiares. Por ejemplo, la existencia de una línea de nivelación que presenta una inclinación hacia arriba para que no se derrame la miel. Cuando terminan la celda la obturan adoptando diversas formas que, si son deprimidas contienen miel, si son redondeadas contienen una larva obrera, y si son abombadas contienen un zángano. En el abordaje de la naturaleza desde los sistemas haremos un análisis más detallado de la organización geométrica de los panales de abejas.

La *avispa excavadora* hace sus nidos en la arena. Llama la atención la similitud de sus nidos con las tumbas egipcias, tanto las que se encuentran dentro de pirámides como las subterráneas. La mayoría de estas tumbas tienen un eje central, un pasillo, a través del cual se accede a las distintas cámaras, teniendo una ubicación especial la cámara mortuoria donde se encontraban los sarcófagos. La tumba de Ramsés III (1186-1154 a. C.) tiene estas características.

Las termitas

Es probable que sean las termitas las que mayor cantidad de problemas de diseño hayan resuelto en la naturaleza. Han dado soluciones para problemas relacionados con los sistemas estructurales, con la humedad, la seguridad, la vialidad, la alimentación, la restauración y renovación, y sobre todo la ventilación (ya que son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura).

El hecho de mantener una temperatura estable en sus termiteros se considera una verdadera obra de ingeniería y un arte. Según la tesis doctoral de Santibáñez, entre las 2.000 especies de termitas conocidas, cada una tiene su propio diseño de termitero, que difiere en forma, tamaño, proporción, funcionalidad y estética, resistencia de materiales y técnicas de construcción. Existen con forma de cebolla (México), montaña (*Macrotermes Bellicosus*, Costa de Marfil), seta, pagoda, paraguas, (*Cubitermes*, selvas tropicales), paredes (*Amitermes meridionalis*, Australia), hongos, chimeneas, esferas, bolsa, cerebro, entre otras.

En relación con su proporcionalidad, las *Macrotermes Bellicosus* han superado por mucho al hombre, ya que se conocen termiteros que en proporción tendrían dos kilómetros de alto. Frank Lloyd Wright propuso en 1956 la torre *The Mile High Illinois*, de 1.609,34 metros de altura, y no se pudo construir por no tener resuelto el diseño y la instalación de ascensores.

En la Mezquita de Djnné (Mali), en Tombuctú (1906-1907), construida totalmente con adobe, considerada la más grande del planeta, se destaca su semejanza con los termiteros a escala humana.

Las esponjas de mar

Resulta significativo el ejemplo del esqueleto de una esponja del Pacífico occidental llamada *Euplectella aspergillum*, o “esponja de cristal”, que se aferra a la parte inferior del océano con miles de “espículas”, que son filamentos finos como cabellos.

Investigadores de la Universidad de Brown en Providence (Rhode Island) descubrieron una estructura compleja compuesta de filamentos de fibra de vidrio y biosilíce, lo que explica la resistencia de la esponja, su elasticidad y su flexibilidad. Vive desde los 40 metros hasta varios cientos de metros de profundidad en el mar. Lo más llamativo es la trama de su esqueleto. Es sumamente compleja, hecha con fibras cristalinas, con forma “hexactinélida”, conocidas vulgarmente como esponjas vítreas. Su esqueleto mineral está compuesto por espículas silíceas de seis radios que se cruzan en ángulo recto, llamadas “hexactinas”, lo que da nombre al grupo, del que se conocen unas 500 especies.

El esqueleto de *Euplectella* es una maravilla de la ingeniería, supera en rigidez a una estructura tubular similar hecha uniformemente de aluminio en dos órdenes de magnitud. Ello se debe a la ultraestructura a distintas escalas de dicho esqueleto. Las fibras no están hechas de dióxido de silicio puro y uniforme, sino que se forman por la agregación de capas sucesivas, otorgándole mucha más resistencia que si fuesen simplemente macizos. Las fibras se disponen siguiendo ejes longitudinales, transversales y finalmente diagonales según un patrón muy regular, lo que minimiza el efecto de las fuerzas de compresión, tracción y torsión. Estos ele-

mentos estructurales y, en concreto, las espículas basales, se comportan como una fibra óptica de unas propiedades tan excepcionalmente buenas -especialmente en lo que se refiere a flexibilidad- que ninguna de las que se han creado hasta la fecha es capaz de igualarla; la solidez impresionante de su esqueleto resiste a 500 atmósferas.

Concluimos afirmando que los animales construyen sus espacios resolviendo problemas ante necesidades evidentes con cierto grado de creatividad y calidad para protegerse del medio ambiente y de depredadores. Esto nos lleva a reflexionar en relación con el ser humano que, a lo largo de su evolución, ha perdido esa capacidad genética de resolución de problemas y creatividad. El ser humano, en su aspiración por innovar, progresar y hacer más tecnológico su accionar en la profesión, ha dejado de lado algunos de los objetivos más importantes y básicos para la vida de la humanidad.

Aprendiendo de la Naturaleza desde los sistemas

Las matemáticas no son un descubrimiento del genio humano. El hombre tan sólo constató su existencia en un sistema natural donde reinaba el orden, el ritmo y la proporción, y sintió la necesidad de crear una simbología adecuada que le permitiera interpretar, comprender y aplicar el conocimiento matemático. A continuación veremos un conjunto de esos conocimientos que, *a priori*, nos permitirá adentrarnos en el estudio de la naturaleza desde un enfoque sistémico, en el que abundan situaciones sorprendentes e insospechadas.

Los números primos

Los números primos son un caso particular en la familia de los números naturales que sólo son múltiplos de sí mismos y de la unidad. El único número primo par es el 2. Los demás todos son impares. Otra característica de esta familia de números es que, hasta la fecha, no se ha logrado enunciar ninguna fórmula capaz de determinar cómo obtener un número primo. Se sabe que existen en un entorno que va siguiendo los múltiplos de 6 ± 1 , pero su aparición sigue siendo espontánea, lo que significa que no todos los números que se encuentran en ese entorno sean necesariamente primos.

Euclides demostró que hay infinitos números primos, por lo que siempre habrá un número primo mayor que el denominado mayor primo conocido. A medida que avanza el tiempo y se cuenta con nuevos métodos de cálculo, siguen descubriéndose números primos, siendo $2^{77232917} - 1$ el más grande conocido hasta la fecha, descubierto en 2017 y cuenta con 23.249.425 dígitos.

Quizá la pregunta apropiada sería ¿tienen los números primos alguna injerencia en la vida común de los seres humanos para que su estudio tenga alguna trascendencia? Una aplicación directa de los números primos que tiene un significativo valor en las actividades cotidianas es el encriptamiento de los códigos que protegen las tarjetas de crédito. Asimismo, para garantizar la seguridad en el intercambio de información en la web se utiliza un algoritmo criptográfico desarrollado en 1977 por Rivest, Shamir y Adleman, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), identificado por las siglas de sus apellidos (RSA). Este algoritmo está basado en la factorización de números enteros en números primos, siguiendo la rutina de todo sistema criptográfico de clave pública: el usuario posee dos claves de cifrado, una pública y otra privada. Al enviar un mensaje, el emisor utiliza la clave pública del receptor, cifrando de este modo su mensaje. El receptor, al recibir el mensaje, lo descifra aplicando su clave privada. El sistema RSA consiste en representar los mensajes enviados mediante números enteros contruidos a partir del producto de dos números primos muy grandes elegidos al azar, mantenidos en secreto.

Aunque puede parecer muy fácil descubrir el código, a través de la descomposición del número entero en sus factores primos, en realidad no lo es, en la medida en que se trabaja con números primos de 100 dígitos que, al multiplicarlos, dan como resultado un número de tal magnitud que descomponerlo representa una tarea prácticamente imposible. Desde este punto de vista, los números primos resultan muy importantes para los negocios, las comunicaciones, los registros, etc., pues todas las transacciones comerciales que se realizan por internet dependen de ellos.

Hasta la fecha, conocer cómo se distribuyen, cómo se pueden obtener números primos cada vez más grandes, que puedan ser utilizados como clave criptográfica, sigue siendo el reto permanente para las tecnologías y para las propias matemáticas. Se trata de un desafío que plantea la famosa hipótesis de Riemann, conjetura que hasta ahora nadie ha sido capaz de resolver, pese al esfuerzo de los mejores matemáticos del mundo durante 159 años. Esta hipótesis fue planteada en 1859 por Bernhard Reinmann y trata de explicar, aunque su autor no pudo llegar a demostrarla, cómo podrían estar distribuidos los números primos. Si en algún momento alguien lograra hacerlo, esto complicaría la forma de hacer negocios y, sin duda, llegaría a afectar el futuro de la computación. A tal punto es así que, en el año 2000, el Instituto Clay de Matemática, de la Universidad de Cambridge (Massachussets) ha ofrecido un premio de un millón de dólares a quien lograra demostrar esa famosa conjetura.

La proporción áurea

“Se dice que una línea recta está dividida en el extremo y su proporcional cuando la línea entera es al segmento mayor como el mayor es al menor” (Euclides en *Los Elementos*). Este teorema, conocido vulgarmente como el de la media y extrema razón, se refiere a la división de un segmento en otros dos (a y b), tales que el segmento mayor (a) es proporcional al menor (b), de la misma manera que el segmento total (a + b) lo es al segmento mayor (a).

El valor de esta proporción es un número irracional denominado phi (Φ)¹², conocido como el “número de oro”, cuyas características y propiedades son muy interesantes:

$$\Phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,61803... = \varphi \quad \chi = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} = -0,61803... = -\frac{1}{\varphi}$$

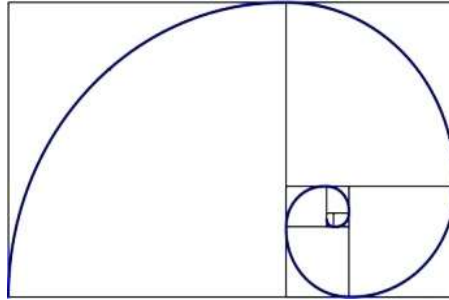
Una de esas propiedades es la conformación de una serie, conocida como “serie dorada”, en la que cada número de la misma es el resultado de sumar los dos anteriores:

$$\begin{aligned} \Phi^{-4} &= 0,14589803375... = \Phi^{-6} + \Phi^{-5} \\ \Phi^{-3} &= 0,23606797750... = \Phi^{-5} + \Phi^{-4} \\ \Phi^{-2} &= 0,38196601125... = \Phi^{-4} + \Phi^{-3} \\ \Phi^{-1} &= 0,61803398875... = \Phi^{-3} + \Phi^{-2} \\ \Phi^0 &= 1 = \Phi^{-2} + \Phi^{-1} \\ \Phi &= 1,61803398875... = \Phi^{-1} + \Phi^0 \\ \Phi^2 &= 2,61803398875... = \Phi^0 + \Phi \\ \Phi^3 &= 4,23606797750... = \Phi + \Phi^2 \\ \Phi^4 &= 6,85410196625... = \Phi^2 + \Phi^3 \end{aligned}$$

Construyendo un rectángulo de base Φ y altura 1, que llamaremos “rectángulo áureo”, podemos ir construyendo nuevos rectángulos áureos de dimensión menor, procediendo de la siguiente manera:

Tomando el lado menor del rectángulo, construimos un cuadrado de modo de dividirlo en éste y un nuevo rectángulo, que ahora tendrá como lado mayor el que antes fuera lado menor del rectángulo inicial, y como lado menor, el segmento que

resulte de restar al lado mayor del rectángulo inicial, su lado menor. Siguiendo sucesivamente este procedimiento hacia el interior del rectángulo áureo inicial, obtendremos como resultado el que se indica en la figura, en el que, además, hemos trazado una espiral que llamaremos “espiral dorada”.



Espiral dorada. Fuente: producción propia

Esta singular espiral no sólo representa una de las curiosidades de la proporción áurea, sino que además es el proceso de crecimiento armónico de los moluscos gasterópodos provistos de una concha espiral, como el *Nautilus Shell*.

La serie de Fibonacci

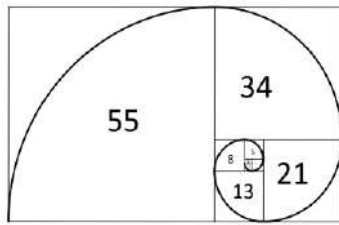
Leonardo de Pisa, más conocido como Fibonacci, preocupado por la descendencia de una pareja de conejos y de qué modo esta descendencia podría ir creciendo, estudió lo que pasaría si esta evolución se producía con una frecuencia determinada, descubriendo que existe un patrón cuyo resultado es una serie numérica, en la que cualquier número perteneciente a la serie es consecuencia de la suma de sus dos precedentes:

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, 4181...

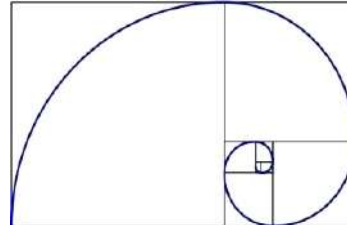
Del mismo modo que en el caso del rectángulo áureo, podemos construir otro rectángulo siguiendo un procedimiento similar, pero en sentido inverso.

Tomando como base un cuadrado de lado 1, le anexamos otro igual, obteniendo así un rectángulo de base 2 y altura 1. Adjunto a este rectángulo construimos un cuadrado de lado 2, y obtenemos un nuevo rectángulo de base 3 y altura 2. Ahora le anexamos un cuadrado de lado 3, lo que da por resultado un nuevo rectángulo de base 5 y altura 3. Continuando con este proceso, lo que iremos obteniendo serán rectángulos en los que sus lados pertenecen a algún par de la serie de Fibonacci, y uniendo los vértices de los rectángulos lograremos dibujar una espiral que, si la comparamos con la dorada, comprobaremos que existe una

similitud muy aproximada entre ambas.



Espiral de Fibonacci



Espiral dorada

Obsérvese la similitud existente entre ambas curvas. Fuente: Producción propia

Lo asombroso es que esta forma espiral también la encontramos con mucha frecuencia en la naturaleza, como, por ejemplo, en la distribución de las semillas en una flor del girasol o también en la Vía Láctea.

Además, si contamos las curvas en que se distribuyen las semillas de la flor, comprobaremos que su número, en un sentido, corresponde a uno de la serie de Fibonacci, y en el sentido contrario, al número siguiente.

Los números trascendentes

Se denomina “número trascendente” a todo número que no es algebraico, es decir, que no es solución de ninguna ecuación polinómica con coeficientes racionales.

Algunos ejemplos de números trascendentes son: π y e . Es mucho lo que puede decirse de π pero también es cierto que es harto conocido, de modo que nos limitaremos a sólo mencionarlo acá.

Aunque la lista es infinita, se dan acá los primeros dígitos del valor de π
 $\pi = 3,141592653897932384\dots$

Por su parte, aparece en casi todas las ramas de la ciencia y de la tecnología y también en algunas situaciones de la vida:

- en economía, en el interés continuo.
- en química, en la desintegración radiactiva.
- en la naturaleza: en el crecimiento demográfico de una población.
- en arqueología para determinar la edad aproximada de cualquier objeto o fósil, mediante el carbono 14, $c-14$.
- en fenómenos con crecimiento y decrecimiento exponencial.
- en el crecimiento de una colonia de bacterias.
- en la absorción de los rayos X por la materia.
- en la ingesta de alcohol y conducción de vehículos.

Si bien la lista es infinita, se dan acá los primeros dígitos del valor de e :
 $e = 2,7182818284590452353\dots$

Los números complejos

Los números complejos son un invento de los matemáticos (un recurso) para resolver las ecuaciones correspondientes que no tienen ninguna solución real. Constituyen el resultado de la conjunción de un número real y uno imaginario y parten del número imaginario (i) del tipo:

$$i = \sqrt{-1}$$

En síntesis, los números complejos permiten representar situaciones de la realidad cuya descripción y tratamiento es posible gracias a sus propiedades:

- En el diseño de un ala de avión se logra una sección cuya forma permite que el aire fluya sin turbulencias.
- En el estudio de fractales.
- En áreas diversas de la ciencia y de la tecnología: comunicaciones, aeronáutica y astronáutica, diseño de circuitos, acústica, sismología, ingeniería biomédica, sistemas de generación y distribución de energía, control de procesos químicos y procesamiento de voz.
- Algunas magnitudes eléctricas de un circuito de corriente alterna se expresan utilizando la notación exponencial de los números complejos.
- En el movimiento ondulatorio, la amplitud de una onda armónica en función del tiempo es representada, en algunos casos, en notación compleja.

Las matemáticas en la naturaleza

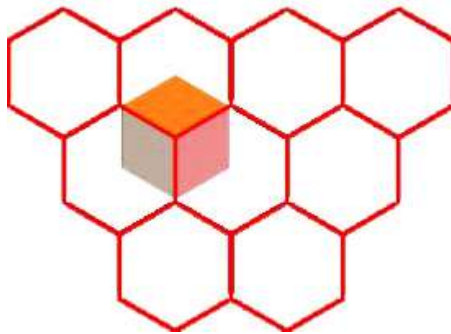
Los panales de las abejas están formados por celdas hexagonales. Desde hace siglos se tiene la convicción de que no existe otra forma que no sea el hexágono que aproveche al máximo el espacio con un consumo mínimo de material. No obstante, nunca nadie hubo podido decir por qué, hasta que en 1999 se logró demostrar matemáticamente y explicar sus ventajas en lo que se llamó la “conjetura del panal de abejas”¹³. Las celdas hexagonales permiten a las abejas aprovechar al máximo el espacio, construir un panal ligero y resistente con el mínimo de cera necesaria y, al mismo tiempo, almacenar la mayor cantidad posible de miel.

No resulta extraño que se considere al panal una obra maestra de la arquitectura, de tal modo que los diseñadores están imitando el panal para producir

estructuras resistentes con un óptimo aprovechamiento del espacio. En los genes de las abejas se ha mantenido latente, durante millones de años, el empleo de los hexágonos como las formas más eficaces para desarrollar sus panales.

Antes de pasar al siguiente tema, nos detendremos a analizar este caso particular del panal de las abejas. El principio que rige la generación de tramas en el espacio bidimensional, partiendo de polígonos regulares, es la coincidencia angular en el punto de concurrencia de éstos, lo que significa que la suma de los ángulos interiores perimetrales pertenecientes a los polígonos concurrentes sea 360° en el punto de concurrencia. Esta condición la cumplen sólo tres polígonos regulares si se trata de lograr una coincidencia angular utilizando en cada caso un solo tipo de figura. Son el triángulo, el cuadrado y el hexágono. No obstante, hemos visto que la selección hecha por las abejas responde a un criterio de economía de la sustancia y para ello han adoptado la trama hexagonal. Resulta aún más interesante este estudio cuando observamos no sólo cómo se ordenan las celdas entre sí, conformando una sumatoria organizada en un mismo plano (con sus caras orientadas hacia una dirección), sino cómo se imbrican por la parte opuesta con otra serie de celdas, también ordenadas según el mismo principio, pero con sus caras orientadas en sentido contrario.

Una manera simple de superponer ambos planos sería haciendo coincidir celda con celda, pero esto permitiría el desplazamiento de un plano según el otro. Ante la posibilidad de que esto suceda, las abejas han encontrado la solución, intercalando las celdas de modo que no exista coincidencia entre ambos planos. A cada centro de una celda de uno de los planos corresponde un vértice de concurrencia de las paredes de la celda en el plano opuesto, tal como se muestra en la figura siguiente:

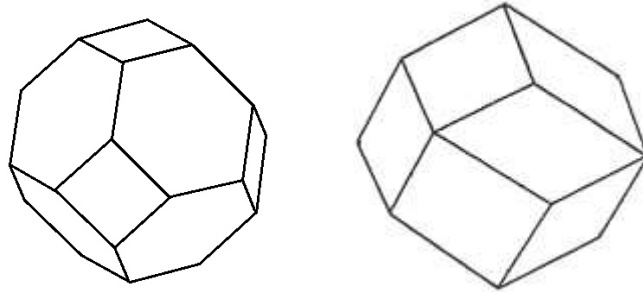


Ubicación alternada de las celdas en los dos planos superpuestos. Fuente: Producción propia

De igual manera, organizados así los dos planos, se mantendría el riesgo de desplazamiento Y es que el fondo de las celdas no conforman un plano sino que se fracciona en tres rombos que se inclinan un cierto ángulo adosándose uno con

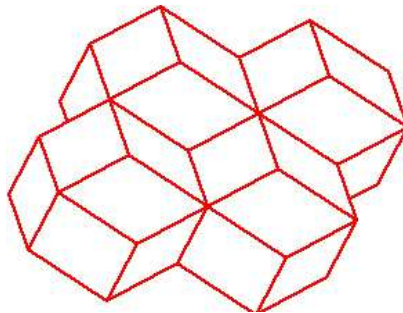
otro en forma de pirámide. Nos detenemos en este punto para exponer nuestra hipótesis, basada en los principios de equipartición del espacio¹⁴.

Del mismo modo que en un espacio de dos dimensiones el triángulo, el cuadrado y el hexágono son las únicas tres figuras que lo macizan por adición de polígonos de una misma especie, en el espacio de tres dimensiones existen cinco poliedros que hacen lo propio: el hexaedro, o cubo, los prismas triangular y hexagonal, un poliedro semiregular arquimediano¹⁵, el tetrakaidecaedro o poliedro de Lord Kelvin, y un poliedro recíproco¹⁶, el dodecaedro rómbico.



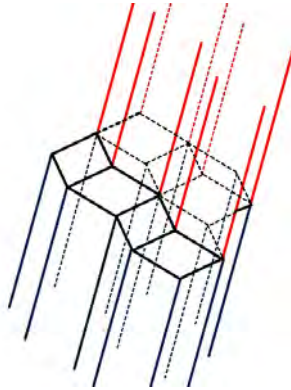
A la izquierda Poliedro de Lord Kelvin. A la derecha Dodecaedro rómbico. Fuente: Producción propia

La concurrencia de celdas de uno y otro plano se realiza precisamente aprovechando esta propiedad del dodecaedro rómbico de macizar el espacio de tres dimensiones.



Ensamble de dodecaedros rómbicos. Fuente: Producción propia

El encastre de celdas de uno y otro plano toma una sección de cada dodecaedro para lograr un ensamble perfecto, sin dejar intersticios y lograr una continuidad espacial digna del más experto de los diseñadores espaciales.



Detalle del encastramiento entre celdas de uno y otro plano. Fuente: Producción propia

Aprendiendo de la naturaleza desde los procesos

Cuando observamos la naturaleza, descubrimos que la creatividad humana ha sido superada sobradamente. Investigaciones recientes han descubierto que los humanos no fueron la primera especie en inventar varios de los mecanismos que le son atribuidos. La rueda, este supuesto “invento” que ha evolucionado y revolucionado en todos los ámbitos de la industria, ya ha sido aplicada por la naturaleza, muchos millones de años antes, en ámbitos microscópicos, imposibles de ser percibidos por el ojo humano sin la ayuda de instrumentos de precisión.

Y lo mismo sucede con algunos derivados, como las tuercas y tornillos, los engranajes, etc.

Tornillos y tuercas

El mecanismo de tuerca y perno que es empleado para atornillar una cosa a otra, es llevado a cabo por los gorgojos para unir sus piernas a sus cuerpos en lugar de usar la bola más familiar de articulación de zócalo. Científicos del Instituto de Radiación Sincrotrón en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (ANKA) y el Museo Estatal de Historia Natural en Karlsruhe en Alemania, dirigidos por Thomas van der Kamp, han estado estudiando al *Trigonopterus oblongus*, un género de 90 especies descritas de gorgojos no voladores que se originan en regiones de bosques tropicales de Nueva Guinea, Sumatra, Filipinas, Samoa y Nueva Caledonia.

El *Trigonopterus oblongus* es un género de gorgojos no voladores que se encuentra en un área entre Sumatra, Samoa, Filipinas y Nueva Caledonia. Tiene la particularidad de que su cadera no consiste en el gozne de costumbre, sino en articulaciones basadas en un sistema de tornillo y tuerca.

Engranajes

Otro ejemplo, en este caso de mecanismo de locomoción, lo tenemos en el *Issus coleoptratus*, un pequeño saltamontes que, si bien no puede volar, sí puede saltar, y lo hace muy bien gracias a que sus patas cuentan con un mecanismo especial en sus extremidades. Un grupo de biólogos del Reino Unido, con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido, descubrió que dispone de «engranajes» en la base de sus patas. Es el primer animal del que se sabe que posee unas estructuras en el cuerpo que funcionan como engranajes, los cuales sincronizan el impulso de propulsión de las patas traseras. Este descubrimiento ha sido publicado en *Science*. No obstante, este mecanismo tiene una vida útil muy reducida, y va desapareciendo a medida que pasa del estado de ninfa al de adulto. A medida que crece desarrolla distintas técnicas de salto, y los despegues del insecto se hacen cada vez más rápidos, mientras va dejando atrás los engranajes.

Flagelo bacteriano

La rueda no está exenta de esta serie de hechos en que la naturaleza ha aventajado al hombre en su capacidad creativa. El flagelo bacteriano es una estructura filamentosa que sirve para impulsar la célula bacteriana, única, completamente diferente de los demás sistemas presentes en otros organismos, presentando una similitud notable con los sistemas mecánicos artificiales, y se compone de varios elementos que rotan del mismo modo que una hélice.

Posee un motor rotativo compuesto por proteínas, situado en el punto de anclaje del flagelo, impulsado por la fuerza motriz de una bomba de protones (iones de hidrógeno), que actúan a través de una membrana. El rotor puede girar a 6.000 hasta 17.000 rpm, No obstante, el filamento por lo general sólo alcanza 200 a 1.000 rpm.

El escarabajo de Namibia

Namibia es un estado africano ubicado al sudoeste de África. En él se encuentra un desierto considerado el más viejo de la tierra: el desierto de Namibia. Es uno de los lugares más cálidos del planeta, donde la temperatura alcanza los 60° C y apenas caen unas pocas gotas de lluvia entre los meses de octubre a marzo. No obstante, cada pocos días al año se producen nieblas matinales que les permite a algunas plantas obtener agua y, sobre todo, a un escarabajo específico de Namibia, del género *Stenocara*.

Cuando hay niebla, este pequeño animalito se encorva levantando el torso y se pone en posición frontal al viento, logrando de este modo extraer gotitas de agua

de la niebla que se condensa en su lomo, y la posición hace que se deslicen hacia su boca. Es notable el esfuerzo que hace para mantenerse suspendido sobre una pequeña duna y poder arquearse. El dorso del escarabajo tiene un aspecto cerúleo y rugoso que se mantiene siempre limpio, con una superficie que repele al agua, evitando mojarse, lo cual tiene mucho que ver con la forma de obtener el agua.

Sin embargo, la parte superior de las protuberancias hacen el efecto contrario, atrayendo el agua, de modo que poniéndose de cara al viento logra atrapar gotitas de agua que después caen a la zona que la repele y que no moja al animal, llegando intacta y sin evaporarse hasta su boca.

El efecto Doppler, el tren bala y el Martín Pescador

La velocidad del sonido es exactamente 343,5 m/s, (1.236,600 km/h). La luz camina un poco más deprisa, exactamente a 299.792,458 km/s. El efecto Doppler es el cambio de frecuencia aparente de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Debe su nombre al físico austriaco Christian Andreas Doppler, quién lo propuso en 1842. Un ejemplo de este efecto se puede encontrar en el caso de los aviones supersónicos. Cuando estos vehículos circulan a una velocidad inferior a la del sonido, éste se mantiene delante del avión. A medida que el jet aumenta su velocidad y va alcanzando la del sonido, éste se va acumulando progresivamente hasta que, al ser superado por la velocidad del avión, se produce un estallido y el sonido, que antes transitaba delante del jet, ahora va a la zaga.

En el Japón ocurría algo semejante en el caso de los trenes de alta velocidad, conocidos como “tren bala”, cuando éstos atravesaban algún túnel y comenzaba a emerger de ellos. Allí se producían turbulencias sonoras muy fastidiosas que molestaban los oídos de los pasajeros. El ingeniero japonés Eiji Nakatsu, al observar el proceso que seguía un simpático pajarito cuando se dedicaba a apresar su comida extraída con el pico desde el interior de un lago, le llamó la atención que en ese movimiento, el ave se sumergía en el agua sin provocar salpicaduras, lo que le permitía mantener fija la mirada sobre su presa en todo momento. El pájaro en cuestión es conocido con el nombre de Martín Pescador.

Nakatsu descubrió que el secreto de esto estaba en la anatomía del pico, diseñado de tal forma que, al introducirse en el agua, evitaba todo tipo de salpicadura y permitía al ave concentrar su mirada en la presa. Tomar en consideración esta anatomía y trasladarla al diseño de la trompa del tren bala fue la solución apropiada al problema de las turbulencias, que desaparecieron por completo.

Reflexiones finales

La biomimética pone a nuestra disposición un abanico de herramientas para un abordaje de la sustentabilidad inspirado en las formas, los procesos y los sistemas como lo hace la naturaleza, con total eficacia y eficiencia. La biomimética representa un nuevo enfoque en una sociedad acostumbrada a dominar o transformar la naturaleza. La posibilidad de aprender de la naturaleza e inspirarse respetuosamente en sus formas, procesos y sistemas, representa un nuevo paradigma en pleno desarrollo, que augura un futuro potencialmente más armónico entre naturaleza y sociedad.

NOTAS

¹ Melina Ángel. *Diseño regenerativo*. <http://mapica1988.blogspot.com/2011/03/ciudades-sostenibles-y-sustentables.html>.

² Citado por Silvester en su *Presidential Address to the British Assn.*, en 1868. Véase *Mathematical Papers* de Silvester, vol 2, p. 654.

³ Conferencia plenaria de Michael Atiyah, 1976, congreso del ICME (*International Commission Mathematics Education*) en Karlsruhe. IX Jornadas para el aprendizaje y la enseñanza de las Matemáticas.

⁴ Merino Doncel, M^a J. Profesora de enseñanza secundaria:

<http://matematicasdemaria.blogspot.com.ar/search?q=Las+formas+con+curvatura+son+m%C3%A1s+abundantes+en+la+naturaleza,+las+formas+poli%C3%A9dricas+en+las+construcciones+humanas>. En la Tesis Doctoral: *Sustentabilidad en la Educación Superior basada en la Tecnología Educativa Apropia y Crítica*. Emma S. Prat. UNAM (Argentina).

⁵ Vedoya, D. E. & Hermida, M^a del C. (2013). *Principios Básicos para la estructuración del espacio*. Corrientes (Argentina): Ediciones del ITDAHU.

⁶ Pallasmaa, J. 'Arquitectura de lo Esencial, El Funcionalismo Ecológico de los Animales. From metaphorical to ecological functionalism'. En García Santibáñez, H. F. *BioDiseño. Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*.

⁷ <http://2.bp.blogspot.com>

⁸ <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com.ar/2014/03/si-la-arquitectura-se-esfuerzo-durante.html>

⁹ Santibáñez Saucedo. *Biodiseño. Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*. Tesis doctoral, Facultad de Arte de la Universidad de Barcelona, 2007.

¹⁰ Pallasmaa, J. *Arquitectura de lo Esencial, El Funcionalismo Ecológico de los Animales* (op. Cit).

¹¹ Pallasmaa, J. *Arquitectura de lo Esencial, El Funcionalismo Ecológico de los Animales* (op. Cit).

¹² Se aplica la letra phi al nombre del número de oro en homenaje a Fidias, el más famoso escultor de la antigua Grecia, por ser la inicial de su nombre.

¹³ La "conjetura del panal de abeja" lo fue hasta que se convirtió en un teorema matemático que sostiene que una red hexagonal en forma de panal de abeja es la mejor manera de dividir una superficie en regiones de igual área y con el mínimo perímetro total. Si bien la conjetura es atribuida a Pappus de Alejandría (c. 290-350 a. C.), el teorema fue demostrado por el matemático Thomas C. Hales (1999).

¹⁴ Vedoya, D. E. & Hermida, M^a del C. (2013). *Principios básicos para la estructuración del espacio*. Corrientes (Argentina): Ediciones del ITDAHU.

¹⁵ Los poliedros semiregulares arquimedianos se conocen así por haber sido Arquímedes de Siracusa quién los descubrió. Para más datos, consultar el libro de Vedoya & Hermida ya citado.

¹⁶ El dodecaedro rómbico es un poliedro compuesto por doce rombos regulares que concurren alternativamente tres y cuatro por vértice. Es recíproco del cuboctaedro, un poliedro semiregular arquimediano que resulta de unir con segmentos los puntos medios de las aristas, tanto del hexaedro como del octaedro. Para más datos, consultar el libro de Vedoya & Hermida ya citado.

BIBLIOGRAFÍA

- BENYUS, J. M. (2012). *Biomímesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores S.A.
- GHYKA, M. C. (1953). *Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes*. Buenos Aires: Editorial Poseidón
- MUÑIZ ALONSO, F., & ESPINOSA SÁNCHEZ, C. *La geometría fascinante del panal de miel*. Azuqueca: I.E.S. Recuperado de: http://www.arcipreste.org/users/wm0836/ma/recursos/geometria_del_panal_de_miel_bis.pdf
- PACIOLI, L. (1946). *La divina proporción*. Buenos Aires: Ed. Losada.
- PEARCE, P. (1979). *Structure in nature is a strategy for design*. Cambridge: The MIT Press.
- SANTIBÁÑEZ SAUCEDO, S. I. (2007). *Biodiseño. Aportes Conceptuales de Diseño en las Obras de los Animales*. Tesis doctoral, Facultad de Arte de la Universidad de Barcelona.
- SAUTOY, M, D. (2009). *Simetría, Un viaje por los patrones de la naturaleza*. Barcelona: Acantilado.
- SKINNER, S. (2007). *Geometría Sagrada*. Madrid: Gaia Ediciones.
- VEDOYA, D. E. (2014). *La transposición tecnológica. Introducción a la génesis de los procesos tecnológicos*. Saarbrücken: Editorial Académica Española.
- VEDOYA, D. E. (2014 b). *La transposición tecnológica. Una estrategia para el diseño y análisis de la obra arquitectónica con enfoque tecnológico*. Saarbrücken: Editorial Académica Española.
- VEDOYA, D. E. & HERMIDA, M. C. (2013). *Principios básicos para la estructuración del espacio*. Corrientes: Ediciones del ITDAH.
- WAGENSBERG, J. (2006). *A más cómo, menos por qué*. Barcelona: Tusquets Editores.
- WAGENSBERG, J. (2004). *La rebelión de las formas*. Barcelona: Tusquets Editores.
- WAGENSBERG, J. (2002). *Si la naturaleza es la respuesta, ¿cuál era la pregunta?*. Barcelona: Tusquets Editores.

Conducto en T biomimético para reducir la resistencia local de un sistema de ventilación y aire acondicionado

Ran Gao, Kaikai Liu, Angui Li, Zhiyu Fang, Zhiqiang Yang, Beihua Cong
Xi'an University of Architecture and Technology (Shaanxi)
China Renewable Energy Engineering Institute (Beijing)
Tongtai Fire and Security Co., (Shanghái)

El ahorro de energía en los edificios es una de las medidas importantes que se utilizan para reducir la escasez de energía y fomentar el desarrollo sostenible¹⁻³. El consumo de energía de los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado (como, por ejemplo, los tipos de sistemas de transporte y distribución de aire) ha recibido considerable atención. El consumo de energía del ventilador causado por la resistencia de los sistemas de ventilación y aire acondicionado representa aproximadamente del 20% al 40% del consumo de energía de los edificios públicos; para algunos edificios, los niveles son incluso superiores a los de los sistemas de refrigeración acondicionados^{4,5}. Por lo tanto, determinar cómo optimizar el rendimiento de los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, reduciendo así la resistencia y disminuyendo el consumo de energía del ventilador, se ha convertido en un tema clave.

Al buscar equipo eficiente de energía para edificios, los investigadores han considerado la morfología y comportamiento de animales y plantas como inspiración. Por ejemplo, Chen (2017) estudió el método de búsqueda de fuentes de contaminación mediante robots a través de la simulación de los comportamientos del olfato y búsqueda por parte de diversos animales⁶. Liu Z (2017) introdujo un modelo de estimación rápida para la concentración de contaminantes basado en el aprendizaje automático⁷⁻⁸. Zeiny (2012) aplicó principios biomiméticos a los diseños de construcción tipo concha y usó la luz del sol para reducir el consumo de energía de la iluminación interior⁹. Reddi (2012) abordó el rendimiento autoajutable de la temperatura y la estabilidad estructural del suelo basándose en la piel animal¹⁰. Zhao (2010) estudió la estructura de un nido de termitas y su capacidad para mantener una temperatura ambiente constante y aplicó los hallazgos al *Zimbabwe Eastgate Center*¹¹. Zalewski (2002) analizó la aplicación y optimización de termosifones en las chimeneas solares^{12,13}. Kirchner (2002) propuso un modelo de evacuación con base en el comportamiento de los rebaños y analizó los factores que influyen en el tiempo de evacuación¹⁴. A partir del principio de reparación

celular en tejidos animales, Zhang (2001) incorporó microcápsulas autorreparadoras en hormigón para desarrollar un hormigón autorreparable¹⁵. Estos estudios previos han demostrado que las estructuras biomiméticas pueden ser altamente efectivas. Con respecto a los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, las plantas pueden servir como un “maestro” natural. Dada esta inspiración, el presente estudio tiene como objetivo determinar si puede desarrollarse un método de reducción de resistencia usando la morfología de las plantas.

Nomenclatura

ΔP	Diferencia de presión entre dos secciones, Pa
P	Valor de presión en la sección de prueba, Pa
$\overline{\Delta P}$	Diferencia de presión promedio entre dos secciones, Pa
\overline{P}	Valor de presión promedio en la sección de prueba, Pa
v	Velocidad de flujo en el conducto, m / s
U_i	El i -ésimo componente de velocidad de fluctuación, m / s
Q	Volumen de flujo, m ³ / s
F	Área de sección transversal, m ²
N	Consumo de energía del ventilador, W
H	Altura de protrusión, m
R	Radio del arco de protrusión, m
L_a	Longitud de arco, m

Símbolos griegos

ξ	Coefficiente de resistencia local, -
ϕ	Función de disipación, W • m ⁻³
ρ	Densidad del aire, kg / m ³
μ	Viscosidad dinámica del aire, Pa•s
σ	Desviación estándar

La resistencia a la ventilación y los componentes del conducto de aire acondicionado se exploraron por primera vez en los años setenta y ochenta, en particular por Miller, del Reino Unido, y Gilman, de los Estados Unidos, entre otros^{16,17}. Desde entonces, los académicos han revisado e incorporado el conocimiento relevante en el Manual de la *Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado* (ASHRAE), la *Guía de la Institución Profesional de Ingenieros de Servicios de Edificio* (CIBSE), y otros manuales de diseño¹⁸⁻²⁰. Con base en un resumen de estudios previos, cabe constatar la existencia de cinco tipos de conductos de ventilación y de conductos de aire acondicionado: curvatura lateral,

chaflán lateral doble, lateral sin chaflán, inclinación lateral y chaflán lateral de 45° (Tabla 1). Desde la década de 1970, no se han implementado mejoras en estos cinco tipos tradicionales de estructuras en T (o sus diseños estructurales de baja resistencia). Por lo tanto, el componente local representado por el conducto ofrece una gran potencialidad para la reducción de la resistencia y ahorro de energía.

Actualmente, la mayoría de los conductos encontrados en varios tipos de medios se miden sobre la base del coeficiente de resistencia de los cinco tipos tradicionales de conductos. Por ejemplo, Morales (2017) exploró la pérdida de resistencia en la transmisión neumática de flujos bifásicos de gas-sólidos en T²¹. Yin (2017) se centró en la reducción de la presión de las estructuras en T teniendo en cuenta varios ángulos de aletas guía²².

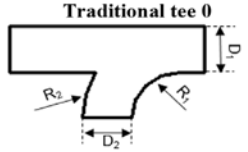
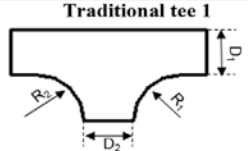
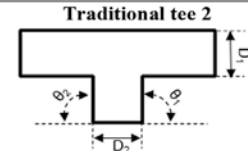
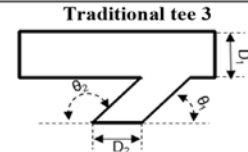
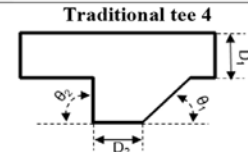
No.	Tees	Features	01	02	R1	R2
T0	 <p>Traditional tee 0</p>	lateral curved	\	\	D ₂	2D ₂
T1	 <p>Traditional tee 1</p>	lateral double chamfer	\	\	D ₂	D ₂
T2	 <p>Traditional tee 2</p>	lateral non-chamfer	90°	90°	\	\
T3	 <p>Traditional tee 3</p>	lateral tilting	45°	135°	\	\
T4	 <p>Traditional tee 4</p>	lateral 45° chamfer	45°	90°	\	\

Tabla 1. T tradicionales y dimensiones estructurales utilizadas en este estudio

Li (2005) investigó la resistencia local del condensado de vapor que fluye a través de una estructura en T mediante la simulación CFD (*Dinámica de Fluidos*

Computacional). El análisis cuantitativo se realizó para estudiar el impacto de la temperatura del medio y las burbujas de vapor sobre la resistencia local²³. Mika (2013) investigó la pérdida de resistencia de las suspensiones de hielo utilizando un dispositivo de derivación de flujo horizontal y propuso una fórmula para calcular la resistencia local en condiciones laminares²⁴. Cabral (2011) analizó la resistencia de los productos alimenticios líquidos que fluyen en los conductos²⁵. A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, se pudo concluir que la esencia de la resistencia es la disipación de energía resultante de la deformación del fluido. La manifestación de la deformación del fluido es la caída de presión. La mayoría de los trabajos existentes han analizado la resistencia sobre la base de la caída de presión en lugar de la disipación de energía. Por lo tanto, la disipación de energía del conducto aún no se ha estudiado.

La unión en T, un componente local de los conductos de ventilación y aire acondicionado, se encuentra ampliamente en los edificios. El problema de energía causado por la resistencia de la unión en T es generalizado. Proponemos, de este modo, un método de reducción de resistencia utilizando una estructura de protrusión desde la perspectiva de las estructuras biomiméticas. El método propuesto se ha aplicado posteriormente a una estructura en T. Se ha evaluado el mecanismo de reducción de resistencia del método propuesto y combinado las características de resistencia entre las uniones en T con protuberancias y las uniones en T tradicionales. Finalmente, se ha verificado que la efectividad del método de reducción de resistencia se confirma a través de experimentos.

Proposición de un método de reducción de resistencia

Posible caso de reducción de resistencia en biología

Ya existe un sistema de conductos eficaz en la naturaleza: las plantas. Las plantas transmiten agua desde el suelo a las hojas a través de la transpiración, después de lo cual el agua se evapora a la atmósfera²⁶. En un sistema vegetal, la hoja equivale al “usuario”, el rizoma y el tallo son equivalentes al “sistema de conductos” y la corriente generada por la evaporación de agua es equivalente a la “potencia”. A través de miles de millones de años de selección natural, se considera que las plantas con una eficiencia inferior han sido eliminadas. El sistema de conductos actual de las plantas es altamente eficiente, con baja resistencia²⁷. Sobre esta base, las formas estructurales de los sistemas de conductos con baja resistencia pueden ser investigadas haciendo hincapié en la estructura morfológica de las plantas.

Ciertas plantas comunes exhiben protuberancias alrededor de sus ramas (Fig. 1). Aunque estas protuberancias existen solo en algunas plantas, esta observación fue

una fuente de inspiración que llevó a incorporar protrusiones en los sistemas de conductos de ventilación y acondicionamiento para probar la efectividad de dicha estructura.



Fig. 1. Protrusiones en plantas

Análisis del mecanismo de reducción de resistencia de protuberancias

El flujo en el conducto y en los flujos en los rizomas y tallos de la planta satisfacen las ecuaciones de Navier-Stokes. En estas ecuaciones, la resistencia al flujo se puede expresar como la disipación de energía de la siguiente manera²⁸⁻²⁹:

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Donde u_x , u_y , y u_z son subvelocidades, x , y , y z , son los vectores de coordenadas, ϕ es la función de disipación, y μ es el coeficiente de viscosidad. En función de esta ecuación, la función de disipación es la función de gradiente de velocidad, mientras que el gradiente de velocidad es el cambio de velocidad. En los componentes locales de los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, la velocidad no se mantiene constante debido al desvío y derivación del fluido; es decir, los cambios de velocidad (o sea, gradientes de velocidad) son inevitables para un componente local. Incluso si el gradiente de velocidad no puede eliminarse, hipotetizamos que existe un método para reducirlo.

Cuando las protrusiones de las plantas que divergen naturalmente en el flujo están expuestas (Fig. 2) a un volumen de flujo constante, la velocidad del flujo en el conducto es inversamente proporcional al área de la sección transversal²⁹. Este fenómeno puede expresarse como

$$Q = F \times V \tag{2}$$

Donde Q es el volumen de flujo en m^3 / s , F es el área de sección transversal en m^2 , y V es la velocidad de flujo en m / s . Las protuberancias pueden aumentar el área de la sección transversal y reducir la velocidad absoluta del fluido en un conducto. En última instancia, tanto el gradiente de velocidad como los valores de disipación de energía podrían reducirse.

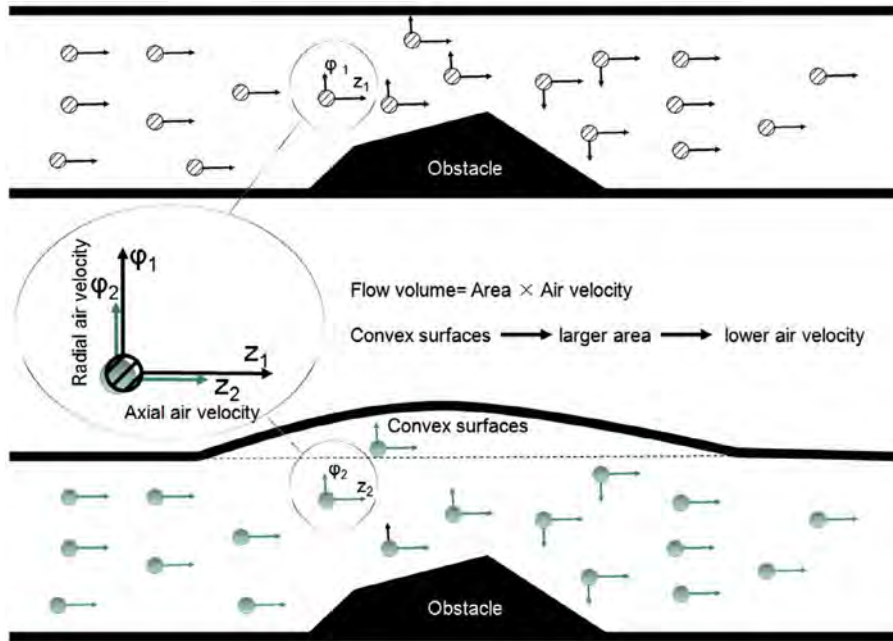


Fig. 2. Posible mecanismo para la reducción de la resistencia

Sin embargo, el uso de protuberancias es equivalente a expandir el área de la sección transversal del conducto. Dicha configuración proporciona al fluido un espacio de flujo adicional, que luego introduce una deformación adicional del fluido y gradientes de velocidad que, a su vez, pueden aumentar aún más la resistencia del fluido.

Por lo tanto, se cree que las protuberancias causan dos cambios en términos de resistencia:

- (1) Las protuberancias debilitan la velocidad absoluta. Cuando se reduce el gradiente de velocidad, la disipación de energía y la resistencia también se reducen.
- (2) Las protuberancias causan deformación del fluido, lo que aumenta la disipación y la resistencia de la energía.

Estos dos impactos se contrarrestan. Para lograr la menor resistencia, nuestro objetivo es determinar un grado apropiado de protrusión para equilibrar estas dos fuerzas. Se considera adecuado, en este sentido, una simulación numérica o experimento para determinar el grado apropiado. Por lo tanto, en este estudio, definimos el grado de distancia que sobresale como la “altura de protrusión adimensional”, que puede expresarse por

$$h=H/D \tag{3}$$

Donde h es la altura de protrusión adimensional, H es la altura absoluta de protrusión, y D es el diámetro del conducto. Las mismas variables corresponden a las de la esquina inferior derecha de la Fig. 3. Para obtener una variedad de características de los conductos y velocidades de flujo, usamos 28 tipos de alturas de protrusión adimensionales (-0.28, -0.25, -0.22, -0.19, -0.16,..., 0.44, 0.47, 0.50, 0.53 y 0.56, de tal manera que una altura de protrusión negativa indica una superficie cóncava) para determinar el valor óptimo.

Análisis de ingeniería

Se seleccionó una unión en T, un componente local común en los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, como objeto de análisis. Es un componente local de flujo fluido y desviación que está sujeto a resistencia en dos direcciones. Como se muestra en la Fig. 3, la T roja 1-2 está sujeta a la resistencia del fluido que fluye de las secciones 1-2 (ΔP_{1-2}) y la resistencia del fluido que fluye de las secciones 1-9 (ΔP_{1-9}). Un estudio previo mostró que la resistencia total del sistema está controlada por el bucle con la mayor resistencia³⁰. Si la sección del conducto 1-2-3-4-5-6-7-8 es el circuito que resiste más fuertemente el flujo, entonces la resistencia de todo el conducto es

$$\Delta P_t = \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4} + \Delta P_{4-5} + \Delta P_{5-6} + \Delta P_{6-7} + \Delta P_{7-8} \tag{4}$$

Si la sección del conducto 1-9-10-11-12-13 es el bucle con la mayor resistencia al flujo, entonces la resistencia de todo el conducto es

$$\Delta P_t = \Delta P_{1-9} + \Delta P_{9-10} + \Delta P_{10-11} + \Delta P_{11-12} + \Delta P_{12-13} \tag{5}$$

Para reducir la resistencia de ΔP_t , no se requiere que las resistencias ΔP_{1-2} y ΔP_{1-9} disminuyan al mismo tiempo. Por el contrario, solo se debe reducir la resistencia al flujo ΔP_{1-2} o ΔP_{1-9} , que se encuentra en el circuito de alta resistencia. Si 1-2-3-4-5-6-7-8 es el circuito de alta resistencia, entonces ΔP_{1-2} debe reducirse, y

los cambios en ΔP_{1-9} pueden ser anulados. Incluso si ΔP_{1-9} aumenta, el bucle no afectará la efectividad de la reducción de resistencia porque ΔP_{1-9} no está involucrado en el cálculo del bucle de alta resistencia³⁰. En proyectos actuales, el ciclo de alta resistencia se determina en el proceso de diseño. Por lo tanto, solo tenemos que desarrollar una T con el mínimo ΔP_{1-2} o el mínimo ΔP_{1-9} y luego seleccionar la T de acuerdo con la bifurcación en el bucle de alta resistencia.

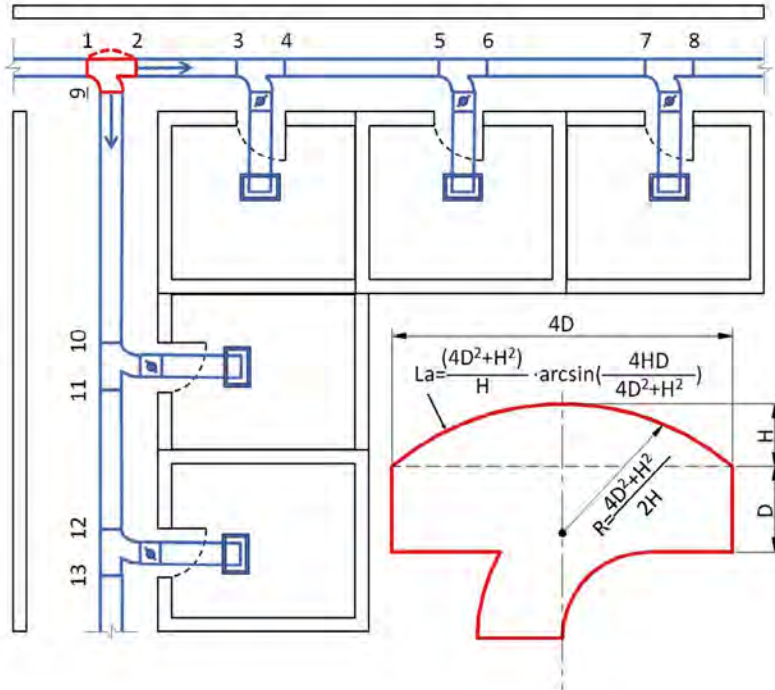


Fig. 3. Aplicación típica de una T y su diagrama de cálculo hidráulico

La forma de la estructura protuberante en la T del conducto se muestra en la Fig. 3. Para facilitar la fabricación, la forma de la protuberancia es un arco. El centro del círculo está en la línea central de la T del conducto. El ancho de la superficie del arco es $4D$ según el molde de fabricación. La altura de protrusión, H , se da en la Tabla 2. A través del cálculo geométrico simple, el radio del arco, R , es $\frac{4D^2 + H^2}{2H}$, y la longitud del arco, La , es $\frac{(4D^2 + H^2)}{H} \cdot \arcsin\left(\frac{4HD}{4D^2 + H^2}\right)$. De hecho, es más sencillo fabricar la T del conducto de acuerdo con la longitud del arco calculada.

Tabla 2. Altura de protrusión óptima y normalizada para varias relaciones de aspecto y relaciones de flujo

Relación de aspecto	Relación de flujo	Optimización de la resistencia en dirección de flujo 1-4		Optimización de la resistencia en dirección de flujo 1-6	
		Altura óptima de protrusion (H/D)	Altura normalizada de protrusion (H/D)	Altura óptima de protrusion (H/D)	Altura normalizada de protrusion (H/D)
5:1	1:3	0.09	0.09	0.16	0.25
5:1	1:2	0.09		0.22	
5:1	1:1	0.13		0.22	
5:1	2:1	0.09		0.19	
5:1	3:1	0.22		0.28	
5:1	4:1	0.19		0.34	
5:1	5:1	0.06		0.38	
4:1	1:3	0.09	0.09	0.13	0.28
4:1	1:2	0.13		0.19	
4:1	1:1	0.13		0.22	
4:1	2:1	0.19		0.16	
4:1	3:1	0.03		0.25	
4:1	4:1	0.09		0.19	
4:1	5:1	0.03		0.19	
3:1	1:3	0.22	0.13	0.34	0.25
3:1	1:2	0.13		0.09	
3:1	1:1	0.09		0.25	
3:1	2:1	0.16		0.25	
3:1	3:1	0.06		0.16	
3:1	4:1	0.25		0.38	
3:1	5:1	0.16		0.44	
2:1	1:3	0.25	0.19	0.09	0.19
2:1	1:2	0.19		0.47	
2:1	1:1	0.13		0.13	
2:1	2:1	0.16		0.19	
2:1	3:1	0.16		0.50	
2:1	4:1	0.16		0.44	
2:1	5:1	0.19		0.22	
1:1	1:3	0.16	0.13	0.25	0.28
1:1	1:2	0.19		0.19	
1:1	1:1	0.28		0.25	
1:1	2:1	0.19		0.31	
1:1	3:1	0.13		0.28	
1:1	4:1	0.13		0.31	
1:1	5:1	0.22		0.53	

Métodos de investigación

Para determinar la efectividad de la reducción de la resistencia de protuberancias, se llevó a cabo la simulación numérica y el experimento a gran escala centrándose en el grado adecuado de protrusión que puede lograr la resistencia más baja. Para la simulación numérica CFD se utilizaron varias alturas de protrusión adimensionales, una metodología de estudio conocida y económica³¹⁻³³. Para asegurar la exactitud de los resultados numéricos, la selección del modelo de turbulencia, la configuración de capa límite, la generación de malla y la independencia de la simulación se verificaron antes realizar la CFD^{34, 35}. Finalmente, la altura de protrusión adimensional seleccionada se probó en condiciones de funcionamiento típicas en un experimento a escala completa.

Experimento a gran escala

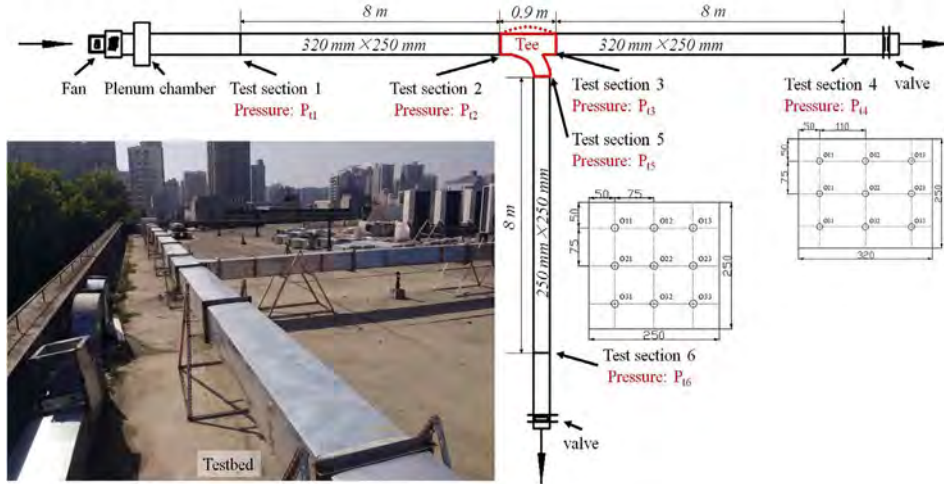
Un experimento a gran escala es el medio más preciso pero también el más caro para estudiar la resistencia de los conductos de ventilación y aire acondicionado. En esta investigación, se utilizó un banco de pruebas de tamaño completo con una longitud de más de 30 m para el experimento (Fig. 4). El banco de pruebas constaba de un ventilador de velocidad ajustable, una caja de presión estática, una estructura T para pruebas, conductos rectos y orificios de prueba. El aire exterior, que ingresó en la caja de presión estática a través del ventilador, fue dirigido para compartir la corriente; esta configuración aseguró que el fluido pudiera alcanzar fácilmente un estado de flujo completamente desarrollado. El volumen de flujo en cada rama fue regulado por la válvula en el extremo de la rama y el regulador del ventilador.

El diámetro designado del conducto principal era el adecuado para la ventilación y los conductos de aire acondicionado (específicamente, 320 mm × 250 mm). El diámetro del conducto de ramificación fue de 250 mm × 250 mm. Se seleccionaron seis secciones de prueba. El diseño de los puntos de prueba en las secciones de prueba 1-4 y 5-6 es el mismo, como se muestra en la Fig. 4. Cada sección contenía nueve puntos de prueba, y cada punto de prueba se midió cinco veces. Los valores máximo y mínimo fueron excluidos por el presente estudio, y se tomó información del valor promedio de la prueba.

Con base en estudios previos, el fluido que ingresa en el componente local debe desarrollarse por completo para garantizar la exactitud de la medición de la resistencia local de componentes. De forma similar, la resistencia del componente local no debe limitarse al componente local, ya que pueden aparecer vórtices que afecten las secciones de los conductos superior e inferior conectados al componente local^{36, 37}. Por lo tanto, en el presente estudio, establecemos la distancia entre

los puntos de prueba y la unión en T a 8 m, un valor 25 veces mayor que el diámetro del conducto (es decir, 25D). Esta disposición aseguró además que el aire que entraba en la T estaba completamente desarrollado y la resistencia causada por la T en el flujo ascendente y descendente también estaba incluida en la medición. La exactitud de los parámetros experimentales medidos se muestra en la Tabla 3.

Fig. 4. Banco de pruebas de la Resistencia de la estructura en T.



Al calcular la resistencia de la T, se tuvieron en cuenta los vórtices producidos por los componentes locales en la parte de arriba y abajo, y las resistencias unidireccionales de los conductos de la parte de arriba y de abajo no se incorporaron en la resistencia local de la T^{16, 17}. Se realizaron dos experimentos para cada condición de trabajo. En primer lugar, la velocidad de flujo de las secciones de conductos 1-2, 3-4 y 5-6 se estableció en 9.4, 7 y 3 m/s, respectivamente. A continuación, se probaron las presiones promedio para las secciones de prueba 1, 4 y 6 (es decir, \overline{P}_{t1} , \overline{P}_{t4} y \overline{P}_{t6}) a la velocidad de flujo especificada. Posteriormente, se retiró el dispositivo y se ajustó la velocidad del flujo. Se probó la resistencia en el camino de la sección 1-2 del conducto con una velocidad de flujo de 9,4 m / s ($\overline{P}'_{t1}-\overline{P}'_{t2}$), seguida de la sección del conducto 3-4 con una velocidad de flujo de 7 m / s ($\overline{P}'_{t3}-\overline{P}'_{t4}$) y para la sección de conducto 5-6 con una velocidad de flujo de 3 m / s ($\overline{P}'_{t5}-\overline{P}'_{t6}$). Los valores de resistencia de las dos direcciones de flujo fueron los siguientes:

Dirección del flujo 1-4:

$$\overline{\Delta P}_{14} = \overline{P}_{t1} - \overline{P}_{t4} - \overline{P}'_{t1} - \overline{P}'_{t2} - \overline{P}'_{t3} - \overline{P}'_{t4} .$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\overline{\Delta P}_{16} = \overline{P}_{t1} - \overline{P}_{t6} - \overline{P}'_{t1} - \overline{P}'_{t2} - \overline{P}'_{t5} - \overline{P}'_{t6} .$$

La resistencia local puede ser expresado como:

Tabla 3. Exactitud de los parámetros experimentales medidos

Parámetro medido	Instrumento	Rango	Precisión	Resolución
Velocidad del aire	TSI-9545	0-30 m/s	0.015m/s	0.01 m/s
Presión	Testo 51 2-1	0-200 Pa	0.25Pa	0.1 Pa

$$\zeta = \frac{\overline{\Delta P}}{0.5\rho v^2} \quad (8)$$

Donde ζ es el coeficiente de resistencia local, ρ es la densidad del aire (tomada como 1.29 kg / m³), y v es la velocidad del flujo en la sección 1-2 del conducto. La resistencia al flujo puede expresarse mediante los siguientes coeficientes de resistencia local:

Dirección del flujo 1-4:

$$\zeta_{1-4} = \frac{\overline{\Delta P}_{14}}{0.5\rho v_{12}^2}$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\zeta_{1-6} = \frac{\overline{\Delta P}_{16}}{0.5\rho v_{12}^2}$$

El error estándar se utilizó para caracterizar el error de los coeficientes de resistencia locales. Los errores estándar de la resistencia probada²⁸ fueron los siguientes:

Dirección del flujo 1-4:

$$\sigma_{\Delta p_{14}} = \sqrt{\sigma_{p_{t1}}^2 + \sigma_{p_{t4}}^2 + \sigma_{p'_{t1}}^2 + \sigma_{p'_{t2}}^2 + \sigma_{p'_{t3}}^2 + \sigma_{p'_{t4}}^2}$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\sigma_{\Delta p_{16}} = \sqrt{\sigma_{p_{t1}}^2 + \sigma_{p_{t6}}^2 + \sigma_{p'_{t1}}^2 + \sigma_{p'_{t2}}^2 + \sigma_{p'_{t5}}^2 + \sigma_{p'_{t6}}^2}.$$

Los errores estándar del coeficiente de resistencia medido fueron los siguientes:

Dirección del flujo 1-4:

$$\sigma_{\zeta_{14}} = \overline{\zeta_{14}} \cdot \frac{1}{0.5\rho} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{p14}}{p_{14}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2}$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\sigma_{\zeta_{16}} = \overline{\zeta_{16}} \cdot \frac{1}{0.5\rho} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{p16}}{p_{16}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2}$$

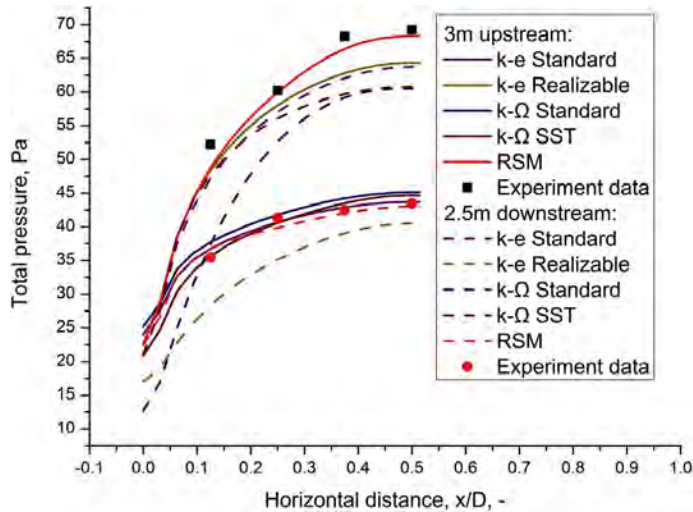


Fig. 5. Presiones seccionales para varios modelos de turbulencia

Simulación numérica

El factor más importante para garantizar la precisión numérica de la simulación es la selección de un modelo de turbulencia. Estudios previos en los flujos de conductos han usado comúnmente el estándar k-ε, k-ε realizable, k-ω estándar, k-ω SST, o el modelo de estrés de Reynolds (RSM) como modelo de turbulencia^{39, 40, 41}. En este estudio, se verificaron las simulaciones de los cinco modelos. Dado que este estudio se centró en el cambio de presión, los parámetros para la verificación fueron los valores de presión total del conducto sistema con la T en las secciones 2 y 3. La velocidad de flujo en el momento de la verificación corresponde a la velocidad de flujo típica descrita en la Sección 2.1. Los resultados de la verificación

se muestran en la Fig. 5. Con base en estos hallazgos, el valor de la presión del RSM fue el más cercano al valor experimental, y sus parámetros de turbulencia se establecieron con referencia a la literatura existente³⁴⁻³⁵. Este fenómeno se puede atribuir a la incorporación de la anisotropía del estrés de Reynolds en el RSM, lo que permite la simulación precisa del flujo secundario que prevalece en el conducto⁴².

En términos de la red, para un cálculo económico y preciso, se llevaron a cabo la verificación del refinamiento de la red local y de la independencia de la red. En estudios previos, el refinamiento de la cuadrícula se empleaba típicamente en regiones con grandes gradientes de velocidad, como en las capas límite y puntos de inflexión fluidos. De acuerdo con la ecuación (1), sugerimos que la energía la disipación es esencialmente el gradiente de velocidad. Por lo tanto, se simularon los campos de disipación de energía con la T y el refinamiento de la red se llevó a cabo donde la disipación de energía era grande. Los resultados del refinamiento de la red y el campo de función de disipación se muestran en la Fig. 6.

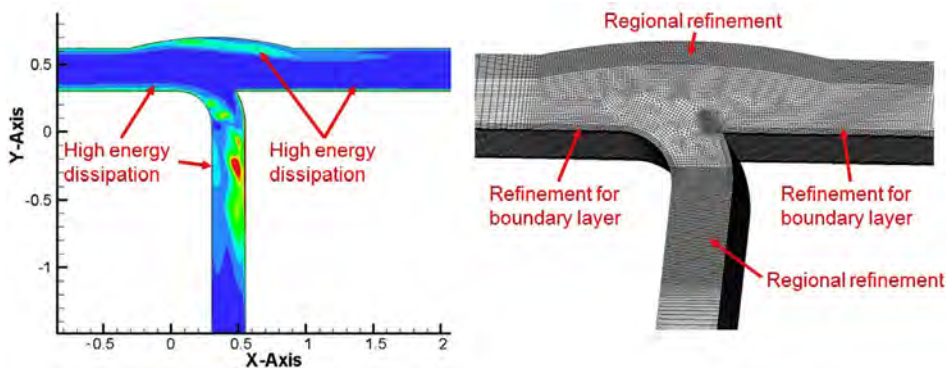


Fig. 6. Campo de disipación de energía seccional de la T y refinamiento de la red

Además, se verificó la independencia de la red, y se simuló el campo de presión de las secciones del sistema de conductos. El campo de presión fue evaluado en números de cuadrícula de 823k, 1,154k, 1,283k, 1,467k, 1,641k y 2,025k. Cuando el número de la cuadrícula era mayor que 1,641k, el campo de presión simulado no cambió. En otras palabras, la solución es independiente del tamaño de la cuadrícula; ver Fig. 7. En consecuencia, se seleccionó la estructura con un número de cuadrícula de 1,641 k para la simulación numérica. El volumen máximo de la cuadrícula en este sistema de cuadrícula era $2,4 \text{ cm}^3$, mientras que el valor mínimo fue de $0,27 \text{ cm}^3$.

Para controlar con precisión la relación de flujo en la entrada y la salida, elegimos la salida del ventilador como la entrada de presión y las salidas de las dos ramas como la salida de velocidad. La pared de deslizamiento se seleccionó como la pared, y se estableció la rugosidad absoluta en $0,15 \times 10^{-6} \text{ m}$ para que corres-

pondiese con un conducto de hierro galvanizado^{19, 43}.

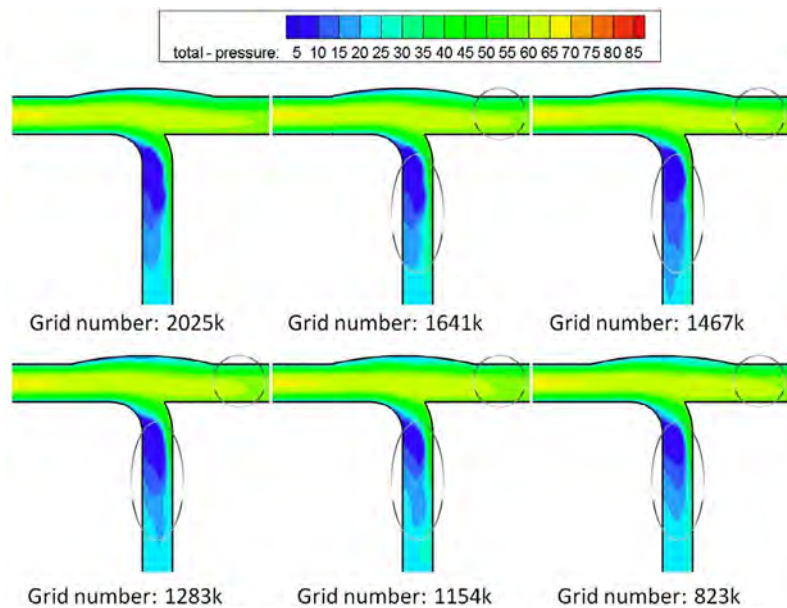


Fig. 7. Verificación de independencia de la red

Las ecuaciones de control se resolvieron usando un esquema segregado. El acoplamiento entre la presión y la velocidad de flujo se resolvió usando SIMPLE (Método semi-implícito para la ecuación de presión vinculada). Durante la simulación, el impulso, la energía cinética turbulenta, la tasa de disipación de turbulencia y discretización del estrés de Reynolds se expresaron y se calcularon en el esquema de contra-viento de segundo orden, y la discretización de la presión se expresó en forma estándar. La convergencia se determinó con base en la velocidad promedio y la presión promedio, cuyo cambio de valor entre las dos iteraciones fue menos de 10^{-3} y la magnitud del residuo normalizado fue inferior a 10^{-5} ⁴⁴.

Resultados y discusión

Eficacia de la reducción de resistencia de las protuberancias con diversos ratios de flujo y de aspecto

Como se discutió en la Sección 2.2, para equilibrar los dos impactos en la resistencia del conducto causada por la altura de protrusión, primero debería determinarse la altura apropiada. Por lo tanto, nos centramos en la resistencia del

conducto con relaciones de aspecto comunes (5:1, 4:1, 3:1, 2:1 y 1:1) y relaciones de flujo (5:1, 4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 y 1:3) para obtener el valor óptimo. Para cada relación de aspecto y relación de flujo, fueron testadas 28 alturas de protuberancia sin dimensiones (-0.28, -0.25, -0.22, -0.19, -0.16,..., 0.44, 0.47, 0.50, 0.53, y 0.56) para obtener la altura apropiada. Una altura con protrusión negativa implica una superficie cóncava.

En función de los resultados finales optimizados, cuando la altura de protrusión se estableció como la altura de protrusión optimizada (Tabla 2), la estructura en T exhibió el coeficiente de resistencia más bajo (Fig. 8).

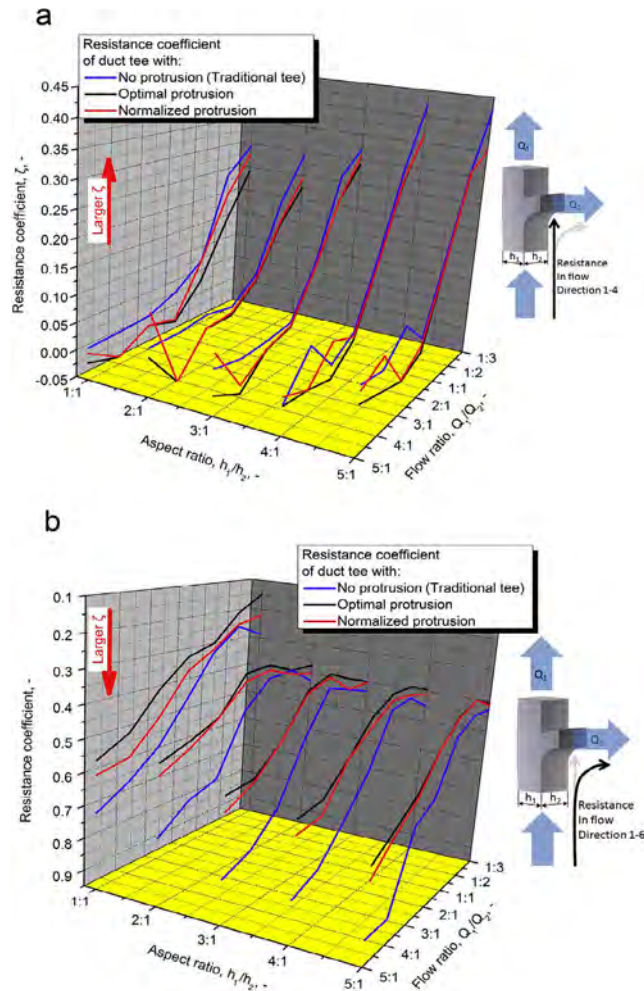


Fig. 8. Comparación de la resistencia de las T con protuberancias y la de las T tradicionales con varias relaciones de flujo y relaciones de aspecto: (a) resistencia en la dirección del flujo 1-4, (b) resistencia en la dirección del flujo 1-6.

Este hallazgo indica que las protuberancias pueden reducir la resistencia. Sin embargo, la turbulencia en sí misma, además de los vórtices y el flujo secundario dentro de la unión en T, es compleja. Por lo tanto, las alturas de protrusión son altamente aleatorias e irregulares. En los proyectos actuales, reemplazar una estructura en T por otra con una altura de protrusión designada es imposible porque el reemplazo genera la más baja resistencia para cada grupo de relación de aspecto y flujo. Por lo tanto, para cumplir los requisitos del proyecto en el presente estudio, consideramos una solución intermedia. La relación de aspecto se puede determinar en la etapa de diseño, pero la relación de flujo puede requerir un ajuste utilizando la válvula debido a los cambios estacionales. Por lo tanto, en este estudio calculamos el coeficiente de resistencia promedio para varias velocidades de flujo y las mismas relaciones de aspecto y alturas de protrusión. Posteriormente, los valores promedio fueron ordenados en orden ascendente para obtener la relación de aspecto con el mínimo coeficiente de resistencia. En este caso, fueron obtenidas las alturas de protuberancia con el coeficiente de resistencia promedio mínimo y diversas relaciones de flujo para cada relación de aspecto adquirido. En consecuencia, para una cierta relación de aspecto, la altura de protrusión es un valor constante, que se designa como una altura de protrusión normalizada. Aunque el coeficiente de resistencia con la altura normalizada es mayor que con las alturas óptimas, esta estrategia es, aun así, ventajosa porque es conveniente en aplicaciones prácticas de ingeniería.

La Fig. 8 indica que la resistencia en T con altura optimizada es significativamente más pequeña que el de las estructuras en T tradicionales, independientemente de la resistencia en las direcciones de flujo 1-4 y 1-6. La resistencia de la T con una altura normalizada se sitúa entre las estructuras en T con una altura optimizada y estructuras en T tradicionales. Este hallazgo muestra que es preferible la T con una altura de protrusión normalizada.

Con base en las tasas de reducción de resistencia del conducto para diferentes relaciones de aspecto, relativo a la T tradicional T0, las protuberancias redujeron la resistencia en aproximadamente 36% en la dirección del flujo 1-4 y aproximadamente 21% en la dirección del flujo 1-6; las tasas de reducción de resistencia en las direcciones de flujo 1-4 y 1-6 fueron aproximadamente un 24% y un 14% para la altura normalizada, respectivamente. En condiciones de trabajo, con altos caudales locales y bajas relaciones de aspecto, el hallazgo implica que la resistencia en la dirección de flujo 1-4 se reduce a valores negativos. En otras palabras, la tasa de reducción de la resistencia excede el 100%, y la resistencia se convierte en una fuerza impulsora. La razón es que cuando la relación de flujo en la dirección del flujo 1-6 es pequeño, aparece poca deformación de fluido en el flujo en esta dirección y la capa límite se separa cerca de la rama. En esta condición, si la resistencia de la T del conducto es suficientemente pequeña, entonces la resisten-

cia de la T del conducto en la dirección 1-6 será negativo. Además, el efecto de reducción de la resistencia de la estructura de protrusión actúa tanto en la T en sí y en el conducto recto conectado a la T. El efecto de reducción de la resistencia en el conducto recto se incluye en el método de cálculo utilizado para el coeficiente de resistencia local. Cuando este efecto es suficientemente fuerte, el coeficiente de resistencia local se vuelve negativo. Este fenómeno no es único. Las T tradicionales también pueden causar que los coeficientes de resistencia sean negativos en condiciones más estrictas. Las secciones 8-22 y las tablas 8-22 del manual HVAC describen el mismo fenómeno¹⁹.

Se compararon, además, las alturas de protrusión normalizadas en las dos direcciones de flujo, 1-4 y 1-6. Las dos direcciones de flujo se muestran en la Fig. 4. La altura de la protuberancia normalizada en la dirección del flujo 1-6 fue significativamente más grande que en la dirección de flujo 1-4 porque la deformación del fluido en la primera dirección es mucho más grande. Por lo tanto, se requiere una mayor altura de protrusión para reducir el valor absoluto de velocidad, y por lo tanto debilitar el gradiente de velocidad causado por la deformación.

Comparación de resistencia entre las T con protrusiones y T tradicionales

Estudios previos han identificado cinco tipos diferentes de T. Para demostrar el rendimiento de reducción de resistencia de las protuberancias, se comparó un conducto en T con protuberancias (a una altura optimizada y a una altura normalizada) con los cinco tipos tradicionales de T en términos de rendimiento (Fig. 9). La resistencia de la T con protuberancias fue significativamente más baja que la de los cinco tipos tradicionales de T. La tasa promedio de la reducción de la resistencia sobre los cinco tipos tradicionales de T fue de un 28% a un 48% en la dirección de flujo 1-4 y de un 22 a un 68% en la dirección de flujo 1-6. El descubrimiento establece la efectividad del método propuesto en este estudio de reducción de la resistencia de la protrusión.

Análisis de campo de disipación de energía

Tal y como se discutió en la Sección 2.2, la resistencia causa la disipación de energía. La disipación de energía cinética turbulenta es la principal disipación de energía debida al desarrollo completo de la turbulencia, y se puede utilizar para caracterizar la disipación de energía. En el presente estudio, se observó que el campo de disipación de energía en la T se identificaba directamente en las tres alturas de protrusión de $H/D=0.25$, $H/D=0.09$, y $H/D=0$ (que corresponde a una T tradicional); ver Fig. 10. La resistencia al flujo en la dirección del flujo 1-6 fue la más pequeña a una altura de protuberancia de $H/D=0.25$ y era más pequeña en

la dirección del flujo 1-4 a una altura de protuberancia de $H/D=0.09$. Las T tradicionales sin protrusiones fueron designadas a $H/D=0$. Posteriormente, la tasa de disipación de energía en la parte inferior de la rama del conducto en una condición de trabajo de $H/D=0.25$ fue significativamente menor que en el condición de trabajo de $H/D=0$; la fuerza de la disipación de energía (ver el área roja) y el área total de disipación de energía también fueron más pequeños. Además, el área de disipación de energía de la pared en T era más pequeña, y la longitud de trabajo fue más corta en las condiciones de trabajo de $H/D=0.09$ relativo al rendimiento en las condiciones de trabajo de $H/D=0$.

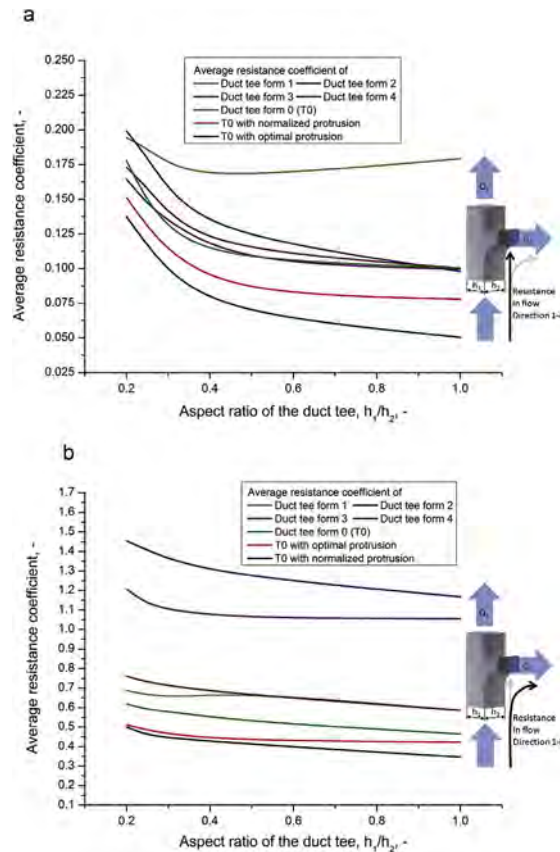


Fig. 9. Comparación de la resistencia de las T tradicionales con las T con protuberancias de varias relaciones de aspecto: (a) resistencia en el flujo en la dirección 1-4, (b) resistencia en la dirección del flujo 1-6.

Las dos comparaciones indican que las protrusiones pueden debilitar efectivamente disipación de energía del fluido a lo largo de las dos direcciones en la T, y por lo tanto, reducir la resistencia del fluido.

También se evaluó el consumo de energía del ventilador inducido por la resistencia de cada conducto en T, que fue calculado de la siguiente manera:

$$N = Q \cdot \overline{\Delta P}$$

El consumo de energía obtenido se muestra en la Fig. 10. Con el aumento de la disipación de energía, el consumo de energía disminuye. La tasa de ahorro de energía en la dirección de flujo 1-4 y 1-6 es 241% y 26%, respectivamente, con una relación de flujo típica de 3:1 y una relación de aspecto de 1.3: 1.

La tasa de ahorro de energía excede el 100% porque el valor de $\overline{\Delta P}$ es negativo. La explicación de por qué el valor de $\overline{\Delta P}$ es negativo se proporcionó en el quinto párrafo de la Sección 4.1.

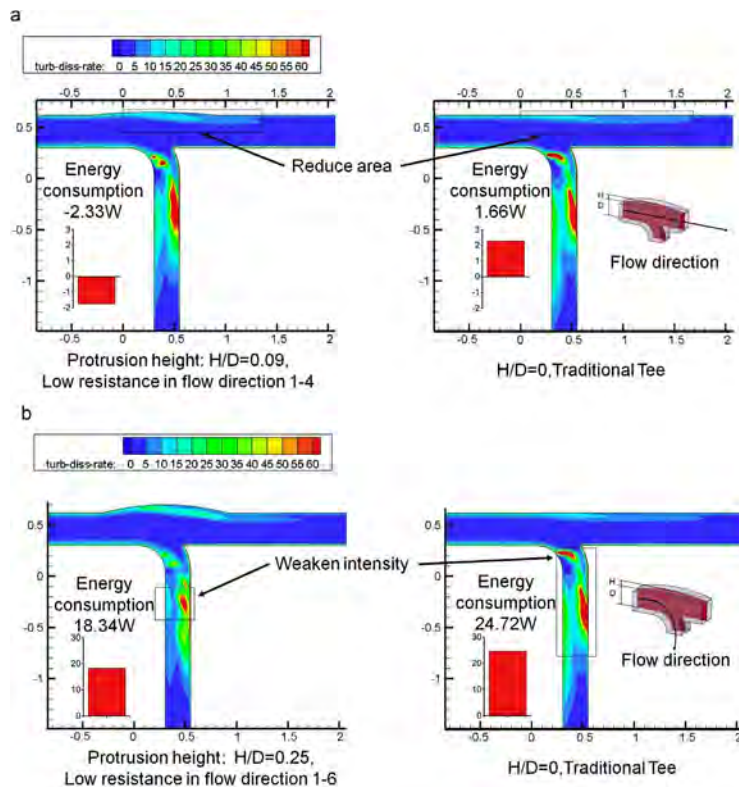


Fig. 10. Campo de disipación de energía en la T del conducto con protuberancias: (a) en la dirección del flujo 1-4, (b) en la dirección del flujo 1-6.

Verificación experimental de la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias

Para verificar la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias, comparamos las T con alturas de protrusión de $H/D=0.25$, $H/D=0.09$, y $H/D=0$ bajo diversas relaciones de flujo; ver Fig. 11. La Fig. 11 compara el resistencia de las dos T con alturas de protuberancia de $H/D=0.09$ y $H/D=0$; los resultados verifican la efectividad de la reducción de la resistencia de las protuberancias en la dirección del flujo 1-4. La figura 11b compara la resistencia de dos T con alturas de protrusión de $H/D=0.25$ y $H/D=0$, y las mismas observaciones confirman la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias en la dirección del flujo 1-6. El valor simulado coincide con el valor experimental, estableciendo la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias. El error estándar se usa para describir la confiabilidad de los valores del experimento. El error estándar (calculado como se describe en la Sección 3.1) de los coeficientes de resistencia locales se muestra en la Fig. 11. La precisión de los parámetros experimentales medidos se presentan en la Tabla 3.

Conclusiones

Hemos presentado un método de reducción de resistencia usando protuberancias desde la perspectiva de las estructuras biomiméticas basadas en la observación de la estructura ramificada de las plantas. El método se aplicó a un conducto en T. Se evaluó el mecanismo de reducción de la resistencia asociado con este método, la T del conducto se comparó con los cinco tipos tradicionales de T y se analizó la característica de resistencia de las T tras de la reducción de la resistencia. Finalmente, la efectividad del método de reducción de la resistencia fue verificada a través de experimentos.

En relación con el rendimiento de la T T0 tradicional (que tiene la menor resistencia de las T tradicionales), la resistencia de la T con protuberancias se redujo en un 36% y 21% en las dos direcciones de flujo. Las tasas de reducción de resistencia en las dos direcciones fueron aproximadamente de un 24% y de un 14% a la altura normalizada. En las condiciones de trabajo de alto flujo local y bajas proporciones de aspecto, la resistencia se volvió negativa; es decir, la tasa de reducción de la resistencia fue mayor al 100%, lo que implica que esa resistencia fue una fuerza impulsora.

Entre los dos conductos de ramificación, el que tiene la mayor deformación de fluido requiere una mayor altura de protrusión para debilitar su velocidad absoluta de flujo y deformación del fluido.

La T desarrollada para el presente estudio (con alturas de protrusión optimi-

zadas y normalizadas) se comparó con los cinco tipos de T tradicionales. Después de la reducción de la resistencia mediante la introducción de protuberancias, la resistencia de la T fue significativamente menor que la de las T tradicionales. La tasa promedio de reducción de resistencia sobre el cinco tipos de T tradicionales eran del 28% al 48% en la dirección del flujo 1-4 y entre el 22% y el 68% en la dirección del flujo 1-6. Este hallazgo refleja completamente la efectividad de las protuberancias en la reducción de la resistencia.

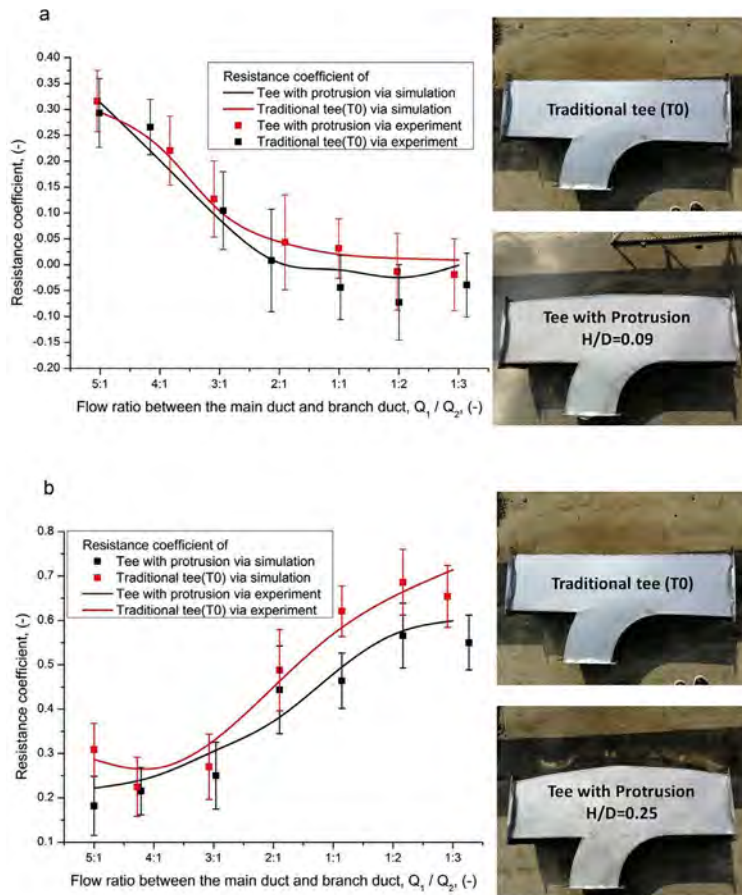


Fig. 11. Verificación experimental de la efectividad de la reducción de la resistencia de las protuberancias: (a) resistencia en la dirección del flujo 1-4, (b) resistencia en la dirección del flujo 1-6.

Finalmente, fue analizado el campo de disipación de energía en la T con protuberancias. La tasa de disipación de energía en el conducto se redujo significativamente; y el área total de disipación de energía era más pequeña. En otras palabras, las pro-

tuberancias efectivamente redujeron la disipación de energía del fluido en las dos direcciones de flujo de la estructura en T, disminuyendo así la resistencia del fluido.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación fue patrocinado por la *National Natural Science Foundation* de China (Grant n° 51508442), por el Programa de Apoyo a la Juventud de la Asociación de Shaanxi para Ciencia y Tecnología (Grant n° 20170515) y el Programa Nacional Clave de I + D de China (Grant N° 2017YFC0702800).

NOTAS

¹ Chastas, P., Theodosiou, T., Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: a literature review. *Build. Environ.* 105, 267–282.

² Pan, W. & Li, K. (2016). Clusters and exemplars of buildings towards zero carbon. *Build. Environ.* 104, 92–101.

³ Robert, A. & Kummert, M. (2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Build. Environ.* 55 (3), 150–158.

⁴ Shan Hu, Da Yan, Siyue Guo, *et al.* (2017). A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. *Energy Build.* 148, 366–378.

⁵ Tsinghua Building Energy Research Center. (2014). *Annual Report on China, Building Energy Efficiency*. Beijing: China architecture and building press.

⁶ Chen, Y., Cai, H., Chen, Z., *et al.* (2017). Using multi-robot active olfaction method to locate time-varying contaminant source in indoor environment. *Build. Environ.* 118, 101–112.

⁷ Liu, Z., Li, H., Cao, G. (2017). Quick estimation model for the concentration of indoor airborne culturable bacteria: an application of machine learning. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14 (8), 857.

⁸ Liu, Z., Cheng, K., Li, H. *et al.* (2017). Exploring the potential relationship between indoor air quality and the concentration of airborne culturable fungi: a combined experimental and neural network modeling study. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–8.

⁹ El-Zeiny, R. M. (2012). Biomimicry as a problem solving methodology in interior architecture. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 50, 502–512.

¹⁰ Reddi, S., Jain, A. K., Yun, H. B. *et al.* (2012). Biomimetics of stabilized earth construction: challenges and opportunities. *Energy & Build.* 55 (55), 452–458.

¹¹ Zhao, J. L. & Ya-Qiong, X. U. (2010). Ecological wisdom inspired from termite mounds-analysis on biomimetric design of Zimbabwe eastgate center. *Build. Sci.* 2, 002.

¹² Zalewski, L., Chantant, M., Lassue, S. *et al.* (1997). Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy & Build.* 25 (1), 7–18.

¹³ Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B. *et al.* (2002). Study of solar walls-validating a simulation model. *Build. Environ.* 37 (1), 109–121.

¹⁴ Kirchner, A. & Schadschneider, A. (2002). Simulation of evacuation processes using a bionics inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Phys. A*, 312, 260–276.

¹⁵ Zhang, G., Xi, Zh., Wang, Sh. *et al.* (2001). Study and progress of biological modelling self-healing concrete, *Concrete*, 137, 10–13.

¹⁶ Gilman, S. F. & Syracuse, N. Y. (April, 1955). Pressure losses of divided-flow fittings. *Heat. Pip. Air Cond.* 141–147.

- ¹⁷ Miller, D. S. (1990). *Internal flow system*. Bedford: BHRA. The Fluid Engineering Centre.
- ¹⁸ American Society of Heating (1972). *Refrigerating, and AirConditioning Engineers*. ASHRAE Handbook of Fundamentals.
- ¹⁹ Vedavaz, A., Hussain, M. I., Kumar, S. (2012). *HVAC: Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning for Design and Implementation*. South Norwalk: Industrial Press.
- ²⁰ CIBSE (1986). *Ventilation and Air Conditioning Requirements (CIBSE Guide B2)*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers.
- ²¹ Moraes, M. S. D., Torneiros, D. L. M., Rosa, V. D. S. *et al.* (2017). Experimental quantification of the head loss coefficient K for fittings and semi-industrial pipe cross section solid concentration profile in pneumatic conveying of polypropylene pellets in dilute phase. *Powder Technol*, 310, 250–263.
- ²² Yin, Y., Chen, K., Qiao, X. *et al.* (2017). Mean pressure distributions on the vanes and flow loss in the branch in a T Pipe junction with different angles. *Energy Procedia*, 105, 3239–3244.
- ²³ Li, S. Q., Wang, P., Lu, T. (2015). CFD based approach for modeling steam–water direct contact condensation in subcooled water flow in a tee junction. *Prog. Nucl. Energy*, 729–746.
- ²⁴ Mika, Ł. (2013). Pressure loss coefficients of ice slurry in horizontally installed flow dividers. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 45 (2), 249–258.
- ²⁵ Cabral, R. A. F., Telis, V. R. N., Park, K. J. *et al.* (2011). Friction losses in valves and fittings for liquid food products. *Food & Bioprod. Process*, 89 (4), 375–382.
- ²⁶ Herrmann, H. & Bucksch, H. (2014). *Plant Transpiration*. Heidelberg: Springer Berlin.
- ²⁷ Herrmann, H. & Bucksch, H. (2014). *Plant Morphology//Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*. Heidelberg: Springer.
- ²⁸ Reid, J. C., Brookes, S. J., Evans, D. J. *et al.* (2014). *The Dissipation Function: its Relationship to Entropy Production, Theorems for Nonequilibrium Systems and Observations on its Extrema[M]//Beyond the Second Law*. Heidelberg: Springer Berlin, pp. 31–47.
- ²⁹ Schobeiri, M. T. (2009). *Fluid Mechanics for Engineers*. Heidelberg: Springer Berlin.
- ³⁰ Mays, L. W. (2009). *Hydraulic Design Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- ³¹ Akhtar, S., Kumral, M., Sasmito, A. P. (2017). Correlating variability of the leakage characteristics with the hydraulic performance of an auxiliary ventilation system. *Build. Environ*, 121, 200–214.
- ³² Chen, H., Cai, W., Chen, C. (2016). Fan-independent air balancing method based on computation model of air duct system. *Build. Environ*, 105, 295–306.
- ³³ Lu, H. & Lu, L. (2015). Effects of rib spacing and height on particle deposition in ribbed duct air flows. *Build. Environ*, 92, 317–327.
- ³⁴ Wang, S., Zhao, B., Zhou, B. *et al.* (2012). An experimental study on short-time particle resuspension from inner surfaces of straight ventilation ducts. *Build. Environ*, 53 (6), 119–127.
- ³⁵ Phuong, N. L. & Ito, K. (2013). Experimental and numerical study of airflow pattern and particle dispersion in a vertical ventilation duct. *Build. Environ*, 59 (328), 466–481.
- ³⁶ Gao, R., Chen, S., Li, A. *et al.* (2017). Computational fluid dynamics study on the drag and flow field differences between the single and coupled bends. *Build. Serv. Eng. Res. Technol*, 38 (2), 163–175.
- ³⁷ Gao, R., Chen, S., Zhao, J. *et al.* (2016). Coupling effect of ventilation duct bend with different shapes and sizes. *Build. Simul*, 9 (3), 311–318.
- ³⁸ Robinson, K. D. (2003). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical sciences*. New York: McGraw-Hill.
- ³⁹ Wang, Y., Williams, K., Jones, M. *et al.* (2017). CFD simulation methodology for gas-solid flow in bypass pneumatic conveying - a review. *Appl. Therm. Eng.* 125, 185–208.
- ⁴⁰ Dehkordi, P. B., Colombo, L. P. M., Guilizzoni, M. *et al.* (2016). CFD simulation with experimental validation of oil-water core-annular flows through Venturi and Nozzle flow meters. *J.*

Petroleum Sci. Eng., 149, 540–552.

⁴¹ Shi, J., Gourma, M., Yeung, H. (2017). CFD simulation of horizontal oil-water flow with matched density and medium viscosity ratio in different flow regimes. *J. Petroleum Sci. Eng.*, 151, 373–383.

⁴² Ansys. Inc. Fluent 14.5, Theory Guide, (2012) USA.

⁴³ Gao, R. & Li, A. (2011). Modeling deposition of particles in vertical square ventilation duct flows. *Build. Environ.*, 46 (1), 245–252.

⁴⁴ Xiao Ye, Yanming Kang, Bin Zuo, *et al.* (2017). Study of factors affecting warm air spreading distance in impinging jet ventilation rooms using multiple regression analysis. *Build. Environ.*, 120, 1–12.

Biomimesis: la nueva cultura de la sustentabilidad para el desarrollo humano

Hernando Bernal Zamudio

Cátedra Unesco de Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental (UPV-EHU)
Amassunu

La biomimesis es una novedosa forma de hacer conocimiento, ciencia y tecnología, que respeta la socio(bio)diversidad del mundo a partir del uso inteligente de los componentes de la naturaleza, sean estos bióticos y/o abióticos. Dicho conocimiento técnico-científico determina la construcción de manera integral y sistémica de una nueva cultura del desarrollo humano centrado en la sustentabilidad de aquélla para las próximas décadas, por medio del desarrollo e implementación de la tecnociencia sofisticada.

El cambio de paradigma desde la biomimesis consiste en reconocer que la naturaleza tiene estructuras económicas, lo que nos permite explorar dichos principios de la “economía natural” de los ecosistemas para poder imitarlos y acoplarlos de la mejor manera a la economía humana, pero sin deteriorar los recursos naturales. Se debe considerar a la economía humana un subsistema del sistema de la economía de la naturaleza en la biosfera-atmósfera terrestre. Se describen inicialmente en este trabajo el marco teórico sobre la biomimesis y su relación con la economía solar y circular de materiales, para después incurrir en lo relacionado con la biomimesis, y la economía humana del conocimiento. Y, finalmente, detenernos en el desarrollo humano sostenible biomimético. Con el objeto de reforzar lo expuesto desde la perspectiva teórica, se mencionan tres casos: El primero tiene que ver con el mundo del reino fungi, el segundo tiene que ver con el con reino animal (la acuicultura en la Amazonia) y el tercero con la robótica.

La biomimesis promueve una economía solar y circular de materiales

La motivación de procurar el tan anhelado progreso para la humanidad en los tiempos actuales debe ir encaminada y fundamentada sobre los postulados que se proponen desde el paradigma de la biomimesis, el cual se fundamenta en el conocimiento integral de los sistemas ecológicos y biológicos. Los respectivos “siste-

mas biológicos nos han enseñado que las tareas funcionales más complejas se pueden lograr a través de la adaptación y la evolución, y también debemos aprender a adaptarnos y evolucionar a un panorama científico en constante cambio” (Raman & Bashir, 2017, p. 17).

El paradigma biomimético, en su sentido estricto, está relacionado con la emulación y el aprendizaje de la naturaleza, ya que los problemas que padecen los seres humanos, han sido superados integralmente por la naturaleza desde hace milenios. Sin embargo es importante no olvidarnos de la incertidumbre y la contingencia, “porque podemos intentar orientar la evolución de sistemas complejos, pero nunca vamos a tener certeza sobre los resultados” (Riechmann, 2003, p. 31). Pero, aun así, es importante tener como referente y guía a la naturaleza, ya que es una apuesta en positivo y porque muchos de los desafíos en nuestra vida cotidiana tienen que ver con la forma de relacionarnos como especie y con las demás especies que componen la naturaleza (Topaz, 2016, p. 112). En ese sentido, la naturaleza es “la única empresa que nunca ha quebrado en unos 4.000 millones de años” según el biólogo Frederick Vester, lo que nos “proporciona el modelo para una economía sustentable y de alta productividad” (Riechmann, 2003, p. 28).

La naturaleza debe ser vista como una fuente inagotable de inspiración para los seres humanos con el fin de contrarrestar la insostenibilidad que se funda a partir de un modelo antropocéntrico (perspectiva filosófica donde el humano es el centro y la medida de todo), y que se materializa en la construcción de la tecnosfera humana en la denominada era del “Antropoceno”. En este periodo se han generado una serie de sistemas humanos mal adaptados a la biosfera, y que encajan mal en los respectivos ecosistemas naturales. Por lo tanto, “el problema de la estructura exige una reconstrucción de la tecnosfera de acuerdo con los principios de Biomimesis” (Riechmann, 2005, p. 95). Por eso, para los seres humanos la biomimesis es la forma más conveniente e integral de usar y de manejar inteligentemente la naturaleza en la tecnosfera; se puede considerar a la biomimesis como la transferencia de tecnología desde los sistemas naturales hacia los sistemas humanos (Blok & Grememm, 2016). Bajo este enfoque, los principios biológicos y ecológicos se aplican a la resolución de problemas humanos a partir de las respectivas formas, mecanismos, procesos y funciones biológicas para estimular el desarrollo de nuevas creaciones humanas en las diversas disciplinas de conocimiento (Topaz, 2016).

Los postulados centrales que rigen el paradigma de la biomimesis, con el objeto de lograr el cambio radical del sistema productivo afín a la economía humana crematística, son los siguientes: 1) concebir a la naturaleza como su modelo, ello quiere decir que la biomimesis es una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza para imitar o inspirarse en los diseños o procesos biológicos con el fin de resolver problemas humanos; 2) determinar a la naturaleza como medi-

da. Esto plantea que la biomimesis se vale de un estándar ecológico para juzgar la ‘corrección’ de nuestras innovaciones. Después de 3.800 millones de años de evolución, la naturaleza ha descubierto lo que funciona, lo que es apropiado y lo que perdura; 3) la naturaleza se constituye como mentor. Hace referencia a una nueva manera de contemplar y valorar la naturaleza por el potencial enorme de innovación que se puede extraer a partir de los componentes de la naturaleza. En este momento, los seres humanos solo aprovechan el 10% de la tecnología de la naturaleza trasferida a la tecnología humana. La simbiosis plena entre procesos tecnológicos biológicos y la tecnología humana moderna aún es muy limitada. De todas maneras, es importante señalar que se inicia una era basada, no en lo que podemos extraer del mundo natural, sino en lo que éste puede enseñarnos (Benyus, 2012, p. 13); de ahí lo fundamental y significativo de poder conservar los componentes bióticos y abióticos de la naturaleza para que ésta y las futuras generaciones las disfruten y sean su modelo de innovación. Al desaparecer una especie o un recurso natural, desaparece una fuente de inspiración y contemplación para los humanos.

La naturaleza ostenta unas estructuras económicas que existen desde hace 4.000 millones de años y la economía humana debe aprender de ella e imitarla, ya que la base de la economía de la naturaleza se relaciona con los procesos de reciclaje de todos los productos de desecho. Los productos de desecho en la naturaleza son concebidos como nutrientes, al fundamentarse en un “sistema de circuito cerrado de ciclo de materiales movidos por el sol...En semejante “economía” la durabilidad se maximiza y los recursos terrestres en “teoría” pueden durar tanto como el sol siga irradiando la energía para mover los ciclos materiales cerrados” (Daly, 1989, p. 30). Además, al imitar el modelo que ha creado la propia “economía de la naturaleza” y trasladarlo al proceso económico imperante en los sistemas humanos, se está reconociendo a la segunda ley de la termodinámica, relacionada con la ley de la entropía. La ley de la entropía consiste en afirmar que “es la forma más simple por la que se reconoce la existencia de los verdaderos acontecimientos de la Naturaleza” (Georgescu-Roegen, 1996, pp. 198-228).

La biomimesis, asumiendo los principios que rigen la ley de la entropía, logra equiparar a la economía humana con la “economía de la naturaleza”, ya que en la “economía de la naturaleza” prima desde sus orígenes una economía solar y cíclica, regida por la ley del principio de conservación de la materia, la energía y la disipación (el principio de la Ley de la entropía). En tal sentido, todas las actividades económicas humanas en su conjunto sufren procesos de degradación y disipación (De la Raza, 2010, p. 111; Cuerdo & Ramos, 2000, p. 80).

Si se reconoce que la naturaleza tiene estructuras “económicas”, es posible hacer una lectura de la forma en su conjunto, esto es, de cómo se trasmite la información en su totalidad, tanto en el uso de los materiales como en la energía

transmitida a nivel de la cadena trófica. Un ejemplo de la trasmisión de la información es el proceso de la fotosíntesis, el de la polinización, el de los ciclos (nutrientes, hídrico, entre otros) y el de la trasmisión de la información vía genética a través del proceso co-evolutivo de las especies; todo ello viene a determinar el intercambio de “bienes” y de servicios ecosistémicos. Los servicios ecosistémicos de la naturaleza son la base y la garantía sobre la cual prospera la vida, tal como la conocemos a nivel de la biosfera-atmósfera terrestre. El enfoque biomimético supone que debemos organizar nuestras sociedades y nuestras economías partir de los servicios y de los principios funcionales de los ecosistemas (Bermejo, 2014, p. 87, 88; Bermejo, 2011, pp. 110-113; Bermejo, 2001, pp. 150-151).

La economía humana, que en la actualidad está bajo la lógica del modelo económico capitalista, se basa en un uso ineficiente de la energía solar, el no cierre del ciclo de materiales y una constante dinámica de exclusión social, de tal manera que el flujo total de materiales inducidos por la actividad humana está incidiendo sobre los ciclos de materiales y sobre los flujos geológicos. Muchos materiales usados en las cadenas productivas por los seres humanos están rompiendo el ciclo natural a través de la eutrofización (nitrógeno y fósforo en la agricultura). Otro ejemplo que describe esta situación es lo que sucede con la contaminación por carbono, plomo, asbesto, uranio, entre otros, y la escasez de minerales de tierras raras, en la medida en que supone un impacto causado por los humanos en una escala de tiempo corto. Este fenómeno se ve aún más agravado cuando se utilizan materiales no biodegradables, disipativos, ecotóxicos y, además, sintetizamos compuestos de creciente complejidad, lo cual limita y hace más difícil lo relacionado con el reciclado y la reutilización (Bermejo, 2001, p. 151).

Por medio del enfoque biomimético y el correspondiente desarrollo técnico-científico que lo acompaña y dinamiza, se pretende que se vaya sustituyendo el sistema tecnológico y el sistema de producción que sustenta la producción de bienes y servicios creados por los seres humanos (que es insostenible en términos de uso y manejo, tanto de materiales como de energía), por otro sistema alternativo en simbiosis con la naturaleza. El sistema de producción imperante que va en contra de la biofilia y topofilia, al no ser circular, intensifica el uso de materiales considerados escasos, críticos y peligrosos (Heyd, 2005, p. 179; Bermejo, 2001, p. 151). El cambio tecnológico es imprevisible y puede considerarse que modifica drásticamente nuestras necesidades (Valera & Marcos, 2016, p. 679); pero sin olvidarnos que la innovación puede “allanar el camino a la equidad social, pero para que ello sea posible probablemente se requieran nuevos desarrollos teóricos y marcos conceptuales” (Albornoz, 2013, p. 111).

No obstante, se hacen necesarios nuevos desarrollos teóricos y marcos conceptuales desde una perspectiva autocrítica. Sin “esta autocrítica será inviable un uso sensato de las técnicas y tecnologías, con su enorme potencial para la mejora

de la condición humana, al tiempo que evitamos -si aún fuese posible- la deriva exterminista, nihilista y suicida de la civilización industrial” (Riechmann, 2016, p. 409). En la denominada primera revolución industrial la naturaleza era sometida y explotada, mientras que la considerada segunda revolución industrial biomimética se debe caracterizar por el aprendizaje y la exploración de la naturaleza (Blok & Gremmen, 2016).

La Biomímesis: bases para la economía humana del conocimiento

El desarrollo e implementación de la biomimesis en el mundo no es igual. Los países desarrollados superan de manera importante a los países en vías en desarrollo, y ello se aprecia en el número de profesionales, de patentes registradas, de centros de investigación, de empresas o de grados académicos relacionados con el enfoque biomimético. Este liderazgo obedece a la inversión en ciencia y tecnología, elemento crítico y neurálgico para poder lograr jugar y competir en las denominadas “ligas mayores” que desarrollan la ciencia y tecnología biomimética sofisticada, logrando, con ello, unas economías más complejas. Se considera que una economía es “más compleja si cuenta simultáneamente con una estructura productiva diversificada y con sectores o actividades que existen en pocos países. Esas actividades no están difundidas porque requieren capacidades tecnológicas sofisticadas que están fuera del alcance de muchas economías” (CEPAL, 2016, p. 15).

En la última década, ha existido una evolución positiva en relación con el Producto Interno Bruto (PBI) en América Latina y el Caribe (ALC), y con ello la inversión destinada a la Investigación + Desarrollo (I+D), llegando a tener un crecimiento del 106%. Pero muchos de los problemas económicos existentes en la actualidad en países de América Latina y el Caribe (ALC) “empiezan a reflejarse en la inversión en I+D: 2015 es el año con menor crecimiento de la serie con un 1,3%, apenas por encima del crecimiento del PBI. Por otra parte, es importante no perder de vista que dicha inversión representa tan sólo el 3,5% del total mundial” (RICYT 2017, p. 14); lo cual se puede apreciar en la inversión por bloques geográficos en la figura (1).

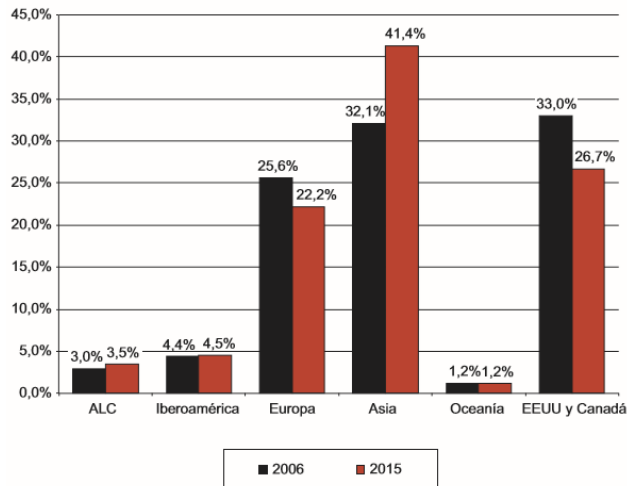


Figura 1. Bloques geográficos y su relación en la distribución de la inversión mundial en Investigación + Desarrollo (I+D), en dólares PPC (Paridad, de Poder de Compra) en el periodo comprendido y analizado entre el 2006 al 2015. Fuente: RICYT 2017, p. 19.

Aun así y a pesar del crecimiento coyuntural en su conjunto en lo relacionado con la Investigación + Desarrollo (I+D), en América Latina y el Caribe (ALC), se mantiene el lastre histórico que tiene que ver con la inversión en ciencia y tecnología. Estos datos, tal y como se pueden apreciar en la figura (2), son significativos, ya que indican la falta de compromiso real por la inversión en ciencia y tecnología en ALC, habida cuenta que no supera el 0,5 % de PIB (incluso en el caso de los PIB más bajos). En dicha figura se puede constatar que los países en la parte inferior izquierda del cuadrante se encuentran fuera de la frontera tecnológica de las denominadas tecnologías sofisticadas (teniendo como excepción a Brasil, que invierte el 1,2 % de PIB).

La baja inversión en ciencia y tecnología repercute en la investigación relacionada con la biomímesis, en el logro de nuevos biomateriales para generar productos que vayan al mercado de consumo de bienes y servicios e ir, con ello, construyendo una economía circular y una sociedad del conocimiento. Los avances más relevantes de la biomímesis se están generando en los países industrializados, y esto se explica por la puesta en marcha de la denominada economía del conocimiento que se sustenta, fundamentalmente, sobre las tecnologías convergentes (NBIC): nanotecnología, biotecnología, tecnologías de la Información (TI) y ciencia cognitiva.

En los países en vías de desarrollo, el desarrollo de la biomímesis se está generando a partir de un proceso de aproximación incipiente a las NBIC, tanto a nivel urbano como rural. A nivel urbano, se fundamenta desde de la academia y la

industria. Por otra parte, el enfoque biomimético se está poniendo también en marcha a través del intento de copiar los componentes del bosque para la producción de alimentos en el mundo rural tradicional, aspecto éste que ha estado presente, a partir de un modelo cosmovisional animista, en las prácticas ancestrales desde tiempos milenarios (Smith, 2017; Heyd, 2005, p. 180).

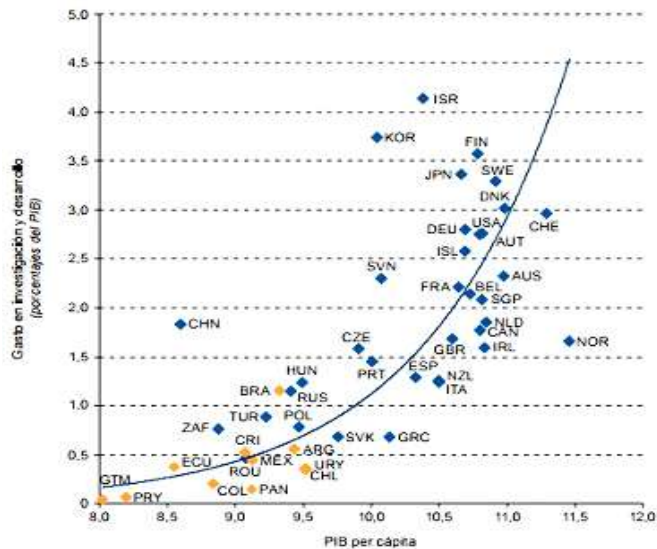


Figura 2. Inversión en investigación y desarrollo según el PIB per cápita promedio de 2009-2013 en países de América Latina y en los países desarrollados. Fuente: CEPAL, 2016, p. 18.

El enfoque biomimético, de acuerdo a lo afirmado, permite generar nuevos ángulos de aproximación técnico-científica que están relacionados con el aprendizaje de la funcionalidad y de la operatividad de las respectivas especies dentro de los ecosistemas naturales. Esta forma de hacer ciencia y tecnología impulsa también nuevos tipos de relaciones sociales y, con ello, una bioeconomía circular de producción para el mercado de bienes y servicios; estos productos, generados desde la inspiración en la economía de la naturaleza, pueden ser incorporados en la denominada tecnosfera de forma sostenible por parte de la economía humana. De ahí, que, al desaparecer algunos componentes de la naturaleza, se pierdan tecnologías naturales, principios activos (físico-químicos y biológicos) o fuentes de inspiración (estéticos). Dicha pérdida degrada y la vida misma, incidiendo negativamente en el desarrollo de nuevos campos científico-técnicos relacionados con las tecnologías convergentes (NBIC). El resultado de ello es que se impide, tanto a las actuales generaciones como a las futuras generaciones, el logro de procesos

innovadores que pudieran traducirse en bioproductos saludables para las personas y para los propios ecosistemas. De esta manera, se pone freno a la generación de bioproductos que sean asimilados y amigables con el medio ambiente una vez utilizados, permitiendo el ciclo de la vida más largo y con “ello” la co-evolución de las especies, dentro de un mercado de bienes y servicios comerciales.

Al amparo del principio biomimético de la interdependencia co-evolutiva de toda interacción vital, palpita una idea de organización compleja que viene a afectar, no solo a los organismos biológicos, sino también a los sistemas sociales modernos, espacios autorreferenciales que se regulan y acoplan estructuralmente mediante la permeabilidad selectiva de los influjos y relaciones con el medio ambiente (Sierra *et al.*, 2014, p. 359; Sierra, 2016, p. 65).

Por eso, el fin primordial de una aproximación biomimética en los procesos de desarrollo humano se fundamenta en la solución de los problemas medio ambientales y de exclusión social generados por el sistema económico hegemónico crematístico. Y la forma de proceder es aprendiendo a usar inteligentemente los procesos de la naturaleza y con la naturaleza, a fin de ir implementando una bioeconomía circular que se traduzca en la construcción de una verdadera sociedad del conocimiento. Ello permitirá poder diversificar la economía humana y volverla más eficiente en términos ambientales, así como rectificar los procesos y factores formadores dinámicos que inducen a la insostenibilidad. Tengamos en cuenta que dichos factores repercuten tanto a nivel local como en lo global, y tienen en jaque a la actual civilización debido a la crisis ambiental que, en el fondo, refleja una crisis del actual modelo de civilizatorio (Naredo, 2006, p. 37), como herencia de un proceso histórico de industrialización que dio inicio en 1870 y llega hasta la actualidad.

En el actual mundo de la ciencia, de la tecnología y de la innovación relacionado con la industria sofisticada y la economía humana del conocimiento, se destacan aquellos sectores industriales relacionados con los biomateriales, las macropartículas y las micropartículas, ya que han tenido el más grande desarrollo en presente, según el *Industrial Biotechnology Journal* 2015. Estos sectores abordan los siguientes campos: bioenergía, biocombustibles, *biorefining*; biomasa/materias primas, ciencias agrícolas; biomateriales: bioplásticos, biofilms; productos químicos y enzimas (a granel, fino, especialidad); procesamiento de alimentos, bebidas y alimentos; cosmecéuticos y cuidado personal; fibras (papel y celulosa, textiles); lubricantes, tensioactivos, detergentes; sector automotriz; biodefensa; biorremediación; bioprospección y biotecnología marina; nanobiotecnología (Montana-Hoyos & Fiorentino, 2016).

Desarrollo humano sostenible biomimético

La noción de Desarrollo Humano (DH) emergió a finales de los años ochenta, introduciendo como eje central la dimensión humana como centro de las preocupaciones de la economía del desarrollo (Griffin, 2001, p. 26). Pero durante el siglo XX se agravaron los problemas medioambientales heredados y generados por los seres humanos desde el periodo de la industrialización. Tal fenómeno ha impactado a nivel de biosfera-atmósfera terrestre, “al alejarse la especie humana del modelo de funcionamiento de la biosfera, cuando empezó a usar masivamente los combustibles fósiles para acelerar las extracciones de la corteza terrestre y extender el transporte horizontal por todo el planeta” (Naredo, 2006, p. 48). Entre los vectores dinámicos de insostenibilidad más destacados, se pueden señalar el del crecimiento demográfico de los seres humanos, la economía humana del libre mercado que adquirió connotaciones globales con sus respectivas externalidades negativas, la intensificación de los conflictos armados regionales y “con ello” las hambrunas, las migraciones y la violación de los derechos humanos (Unceta, 2001, p. 410).

Para superar esas limitaciones, se debe partir y hacer énfasis en la búsqueda de un equilibrio entre los procesos desarrollados por los humanos y los componentes de la naturaleza, con el fin de que no se logre superar la capacidad de carga y se permita la resiliencia de los componentes de la naturaleza. Por eso, a finales del siglo XX se planteó que el nuevo milenio exigía reflexionar acerca de la implementación de un modelo de *Desarrollo Humano Sostenible* (DHS). Es importante indicar que el *Desarrollo Humano Sostenible* (DHS) es un “concepto formulado en términos de capacidades... dicho enfoque permite definir una política del bien común centrada en la persona, con toda su integridad y complejidad” (Valera & Marcos, 2016, p. 671).

Es importante tener en cuenta que esa convergencia conceptual entre desarrollo humano, por un lado, y desarrollo sostenible, por el otro, se expuso en el mes de julio de 1993, durante el discurso del presidente del Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). En dicho foro se planteó la necesidad de una visión del desarrollo nueva e integradora, que consistía en un enfoque centrado en el ser humano. Y el PNUD lo define de la siguiente manera: “El desarrollo humano sostenible es un desarrollo que está a favor de los pobres, a favor de la naturaleza, a favor del empleo y a favor de la mujer. Enfatiza el crecimiento, pero un crecimiento con empleos, un crecimiento con protección del medio ambiente, un crecimiento que potencia a la persona, un crecimiento con equidad” (Moreno, *et al.*, 2015, p. 66)

El Desarrollo Humano Sostenible está relacionado con un modelo de desarrollo económico dirigido a fomentar las capacidades y las oportunidades humanas

desde el ámbito de los valores individuales, pero también desde lo colectivo, a partir de los valores sociales y del respeto por el medio ambiente. El propósito fundamental es que se logre superar las propias limitaciones, lograr mayores niveles de autonomía individual y de libertad por medio de una mayor incentivación del bienestar social: “Es decir, el objetivo del desarrollo no es incrementar el producto sino propiciar que la gente disponga de una gama mayor de opciones, que pueda hacer más cosas, vivir una vida más larga, eludir enfermedades evitables, tener acceso a la reserva mundial de conocimientos, etcétera” (Griffin, 2001, p. 13). Estas premisas fueron expuestas originalmente por Amartya Kumar Sen al hacer énfasis sobre el proceso de *Desarrollo Humano*, el cual debía ser visto como un proceso de ampliación de las “capacidades” y libertades en relación con las personas y no como un aumento de la utilidad que diese lugar a un modelo de bienestar centrado en la satisfacción económica (Daly, 1989, p. 30).

La implementación del *Desarrollo Humano Sostenible* (DHS) a partir del enfoque biomimético ofrece una perspectiva nueva e integradora entre lo social, lo económico, lo político, lo cultural, en la que el factor medioambiental y la inclusión social son centrales. La biomimesis está relacionada con la forma de aprender a usar inteligentemente los componentes, sean éstos bióticos o abióticos. Con ello, se trata de revertir los procesos y factores formadores dinámicos de insostenibilidad que repercuten tanto a nivel local como global y que se manifiestan en una sociedad de la incertidumbre, tal y como lo indica el filósofo alemán Ulrich Beck en su obra *La sociedad del riesgo*. Estos procesos de insostenibilidad se caracterizan por su amplio espectro de repercusiones de carácter inconmensurable y que son el fruto del proceso histórico de industrialización y de acumulación del capital.

Este periodo histórico se ha caracterizado por la modernización de los modos de producción precapitalistas con las miras puestas en un crecimiento ilimitado de la economía humana capitalista. Esta tendencia ha supuesto un incremento de la explotación crematística de los recursos naturales y la reducción de los mismos al mero valor monetario: “La idea de que tanto la tierra como el trabajo eran sustituible por el capital permitió cerrar el razonamiento económico en el universo del valor hacia la abstracción del mundo físico, al considerar al capital como el factor limitativo último para la producción de la riqueza, expresable en términos monetario” (Naredo, 2006, pp. 8, 70). Desde este mismo momento en que se rompe el cordón umbilical original que unía al sistema económico con el mundo de lo físico, se inicia un proceso “por el que se empezará a deshacer el ovillo de la antigua visión del mundo, del comercio, de los precios, de la moneda y a surgir las preocupaciones y análisis de la llamada ciencia económica” (Naredo, 2015, p. 71), en tanto que termina generándose la “desconexión, la incomprensión y el conflicto observado entre la economía convencional y las disciplinas que componen la moderna “economía de la naturaleza”” (Naredo, 2006, p. 3).

Al estimularse el crecimiento económico ilimitado en un mundo finito “se desplazó así la reflexión económica desde la adquisición y el reparto de la riqueza hacia la producción y el reparto de la riqueza a la producción de la misma, que -al suponer que era beneficiosa para todo el mundo- permitió soslayar los conflictos sociales o ambientales inherentes al proceso económico y desterrar de este campo las preocupaciones morales, a la que antes se encontraban estrechamente vinculadas las reflexiones de este ámbito” (Naredo, 2006, p. 4). Desde ese momento, la economía de la adquisición y producción de riqueza ha generado un impacto directo sobre la economía de la naturaleza.

Al incurrir la economía humana en el uso intensivo e ineficiente, tanto de materiales (algunos escasos y no renovables), como de energía no renovable (hidrocarburos y la nuclear fundamentalmente), se creó un mundo insostenible que se ha visto todavía más agravado con el fenómeno del crecimiento demográfico y de la exclusión social a causa de la concentración de la riqueza. Por lo tanto, es necesario un nuevo modelo de desarrollo que dé las debidas y razonables respuestas a problemas tan complejos como la crisis ambiental, el rápido consumo de los recursos a escala planetaria (renovables y no renovables), la superación de la brecha entre naciones consideradas ricas y pobres, para evitar el colapso del ecosistema global (Schafer, 2010).

Durante el siglo XX, además de los problemas ambientales, se han producido problemas sociales con el retroceso evidente de los derechos laborales, sociales y económicos adquiridos históricamente, así como el desconocimiento de la carta de los derechos humanos. Esta vulneración se ha trasladado también a la normatividad medioambiental y del mercado laboral, lo que ha conllevado precariedad laboral, usurpación de recursos naturales comunales o públicos y migraciones incontrolables. Estas dinámicas redundan, a su vez, en un consecuente deterioro del medio ambiente y en la especulación de las materias primas en los mercados financieros, no sólo en las economías desarrolladas, sino también en las nuevas economías emergentes.

Con los graves problemas económicos, sociales y medioambientales imperantes en la actualidad en el mundo, el Desarrollo Humano debe ser biomimético, ya que nuestro confort y supervivencia como especie *Homo sapiens sapiens* depende de la salud integral de los servicios de los ecosistemas; si los ecosistemas están enfermos, tarde o temprano los humanos también nos enfermaremos y, con ello, la economía humana y, desde luego, la economía de la naturaleza. Por lo tanto, concebir un *Desarrollo Humano Sostenible Biomimético* para las próximas décadas debe ser visto como un multiplicador de capacidades y de oportunidades para las personas a nivel local, teniendo en cuenta, además, que las externalidades positivas derivadas de la implementación de la biomimesis benefician a la humanidad en general e impactan a nivel de la biosfera atmósfera terrestre de forma integral (y,

por ello, de forma sistémica, en los respectivos ciclos de la vida, tal y como los conocemos en la actualidad).

Esta explotación desahogada de bienes naturales ha conllevado a un consumo ilógico, al impulsar una demanda suntuosa e inequitativa intra e intergeneracional, y genera antagonismos entre los mismos humanos en relación con el consumo de energía y materiales. En definitiva, el *Desarrollo Humano Sostenible* (DHS) desde los postulados que pretende del paradigma de la Biomimesis, constituye la “punta de lanza de un proyecto que se fundamente en la certidumbre elemental de que tanto el espacio social como el natural constituyen, a fin de cuentas, sistemas sinérgicos y cooperativos” (Sierra, *et al.* 2014, p. 359; Sierra, 2016, p. 65).

Tres experiencias biomiméticas que generan economía circular

Se describen tres ejemplos prácticos en el mundo (uno en Europa, otro en Sudamérica y uno en Oceanía) sobre cómo se está desarrollando la biomimesis desde el ámbito académico y en lo empresarial.

Biomimesis y bioeconomía a partir del reino fungi

La empresa se llama *Hifas da Terra*, localizada en la provincia de Pontevedra, Galicia (España) y trabaja de forma directa con la filosofía de la biomimesis. En concreto, tratan de aplicar en sus trabajos de investigación, desarrollo e innovación tecnológica, el uso inteligente e innovador de algunos componentes de la naturaleza y en este caso específico el reino fungi. Esta forma de proceder contribuye a construir de forma dinámica la denominada sociedad del conocimiento.

Las especies que son investigadas tienen su potencialidad en la producción de alimentos ecológicos, a partir de las explotaciones relacionadas con la agricultura ecológica, y también con la industria ecológica de la rama de la cosmética, de la farmacología y de la nutrición humana. En estas actividades económicas prima un uso y manejo racional de algunas especies vegetales forestales, tanto nativas como introducidas, y del reino fungi; algunas especies de hongos son endémicas y otras introducidas. En lo que tiene que ver con las explotaciones forestales endémicas, su fin es aumentar la producción y la productividad, y en las masas forestales introducidas buscan producir medicamentos para mitigar y superar las dolencias causadas por algunas enfermedades. Las dos actividades simultáneamente permiten conservar y reintroducir algunas especies vegetales consideradas como amenazadas debido a su sobre-extracción antrópica, al cambio en el uso de los suelos con sus respectivas coberturas vegetales locales y al impacto del cambio climático.

Desde sus inicios hasta la actualidad, la empresa *Hifas da Terra* viene desarrollando un proceso de innovación de nuevos productos ecológicos, fundamentados en los principios activos que ofrece el reino de los hongos. La estrategia implementada se fundamenta en un conjunto de acciones de carácter integral y sistémico que cubre desde la educación, la capacitación, el desarrollo científico, el mercadeo, y la cooperación internacional técnico-científica puntera entre los países de la Unión Europea y los EEUU; los campos de actuación técnico-científica de esta empresa están relacionadas con la biotecnología, la biofarmacología, la biorremediación, y la biomedicina, áreas de conocimiento que permiten generar nuevos productos amigables con el medio ambiente y procesos de inclusión social en un entorno rural como el de Galicia. La empresa se caracteriza por tener un recurso humano altamente cualificado muy joven, y cuenta con el apoyo de profesionales versados con una amplia experiencia investigativa que contribuyen a generar nuevas capacidades y oportunidades de desarrollo humano sostenible a nivel local, regional y mundial.

El proceso de formación que implementa los profesionales de *Hifas da Terra* es dirigido a diferentes demandantes, utilizando las tecnologías de información y la comunicación, cursos *online* y presenciales. Lo que se pretende es que se apliquen buenas prácticas productivas y, con ello, mejorar el medio ambiente, los ingresos y la calidad de vida de las personas que se dedican tanto profesionalmente como laboralmente a las explotaciones de hongos y de especies forestales, tal y como se puede apreciar en las fotos (1a y 1b). Su plataforma de profesionales lidera nuevas líneas de investigación en áreas clave como la oncología, la silvicultura y/o forestería, agroforestería, restauración de suelos contaminados y nutrición humana, a partir de redes de investigación en la que participan universidades del estado español (Universidad de Vigo y Santiago, El Instituto de Investigación Biomédica de A Coruña -INIBIC- y Universidad de Universidad de Murcia), de los Estados Unidos de Norte América (Universidad Estatal de Colorado y el Putnam Hospital Center), Bélgica (Katholieke Universiteit Leuven), Rumania (Lucian Blaga University of Sibiu), Italia (Universidad de Salerno), Grecia (Universidad Politécnica Nacional de Atenas, Centre for Research and Technology Hella, Hellenic Institute of Transport -CERTH/HIT-); al mismo tiempo, interacciona también con entes públicos y de la empresa privada españolas.

La empresa *Hifas da Terra* nació en el año de 1999 con el fin de producir setas ecológicas y con ello impulsar un consumo responsable de productos ecológicos. Este proyecto, que se inició como una empresa familiar de producción de setas ecológicas y de los respectivos componentes de producción (kits de producción), se ha venido especializando con el paso del tiempo en el “cultivo ecológico de diferentes variedades de setas, buscando y seleccionando las mejores cepas para, en su nuevo laboratorio, poder cultivar las mejores setas de diferentes puntos del

planeta en un microclima único: el de las Rías Baixas de Galicia” (HDT, 2017).



1a



1b

Fotos 1a & 1b. Colecta de material para el laboratorio y comercialización de setas ecológicas.

Dentro de sus logros, se puede resaltar que ha impulsado y realizado una selección de híbridos entre dos especies vegetales, que se caracterizan por su alto valor económico, social y ecológico, como son el castaño gallego (*Castanea sativa*) y el castaño japonés (*Castanea crenata*), con el fin de obtener una colección de clones que deben ser resistentes a la enfermedad del hongo llamada “la tinta del castaño” (*Phytophthora cinnamoni*). Lo que se pretendió con esta práctica es desarrollar óptimamente la fisiología de los híbridos para que la salud de dichos árboles se traduzca en una gran producción de madera y frutos de castaña de alta calidad (la famosa castaña confitada o marrón glacé); de otra parte, se consigue un valor agregado muy potente, asociado a la producción de oxígeno y al secuestro de carbono atmosférico (HDT, 2017).

La superficie que comprende la empresa *Hifas da Terra* es de 120.000 m², donde se tiene la infraestructura y la logística necesaria para producir y transformar las setas, así como para obtener mejor materia prima. Además, en dicho espacio se cultivan especies maderables, frutícolas y se hace el proceso de micorrizado con el fin de obtener árboles superiores vigorosos y resistentes a las enfermedades y plagas, lo que repercute de forma favorable en un mayor crecimiento vegetativo y, por ende, en una mayor producción con calidad. Se puede afirmar que *Hifas da Terra*, en el momento presente, tiene el mayor vivero de Europa de planta micorrizada, como se puede apreciar en las fotos (2a, 2b y 2c). Es de destacar que, bajo castaños que tienen una edad superior a los cuarenta años, se vienen cultivando las especies de hongos como el Reishi (*Ganoderma lucidum*), Shiitake (*Lentinula*

edodes) y Maitake (*Grifola frondosa*) (HDT, 2017).



Fotos 2a, 2b, 2c. Cultivo en laboratorio de hongos y material vegetal inoculado

Líneas de investigación finalizadas

La empresa *Hifas da Terra* tiene un departamento de investigación cuyo propósito es conocer las aplicaciones de los hongos en dos ámbitos principales: 1) La mejora de la salud de las personas; 2) La rehabilitación medioambiental. En esas líneas de actuación, la empresa lidera y además participa de forma proactiva en proyectos colaborativos con socios tecnológicos de carácter internacional, entre los que se encuentran universidades de todo el mundo (HDT, 2017). Los proyectos de investigación y desarrollo ya concluidos son los siguientes: *Micotécnoles* (2013-2015); *Cosmentinnova* (2013-2016); Dermocosmética (2102- 2014); *Superfood* en capsulas (2012-2014); Caracterización ecológica de la especie *Trompeta Negra* (2008-2011); Lucha biológica contra la especie biológica de género *Acacia* (2010- 2013); Lucha biológica contra la especie *Reynoutria japonica* (2009- 2011); Línea médico-farmacéutica con hongos (2008-2010); Cultivo de setas saprofitas en restos forestales (2006-2008); Producción de castaños híbridos micorrizados e injertados (2004-2006); Proyecto para la micorrización con *Boletus edulis* (2002-2004).

Los proyectos que en la actualidad la empresa *Hifas da Terra* están implementando son los siguientes: 1). *Micotécnoles II* (2016-2018); 2). *Dismetásin* (2015-2017).

Es de destacar el proyecto *FungiTechOnco* (2015-2017). Este proyecto es uno de los más emblemáticos. Su objetivo fundamental está relacionado con la selección, caracterización de cepas de hongos medicinales autóctonas, y lograr su óptimo cultivo utilizando biorreactores de gran capacidad para la producción eficiente de micelio y metabolitos. Existen ciertas especies de hongos medicinales que presentan actividad antitumoral o inmunoestimuladora con un gran potencial de aplicación en la prevención y tratamiento del cáncer; se puede apreciar en las

fotos (3a y 3b) la forma de extracción de los principios activos y la presentación comercial en capsulas. Finalmente, se realizaron estudios científicos en células cancerígenas que demuestren la actividad beneficiosa de los productos resultantes de dicho cultivo.



3a



3b

Fotos 3a & 3b. Desarrollo de productos nutraceuticos, a partir de especies de hongos medicinales, que presentan actividad antitumoral o inmunestimuladora, relacionadas con prevención y tratamiento del cáncer.

El proyecto, que se inició en el año 2015 y terminó el año 2017, estaba orientado a la prevención y tratamiento tanto del cáncer gástrico, colorrectal y otros tipos de cáncer. El objetivo consistía en lograr nuevas terapias y tratamientos con una mejor eficacia, especialmente en la fase invasiva de la enfermedad, para mejorar la calidad de vida del paciente y aumentar sus posibilidades de supervivencia.

Este es un proyecto pionero a nivel europeo. Proyecto de I+D que se centra en el desarrollo de determinados productos nutraceuticos basados en hongos por su actividad anticancerígena en casos de cáncer gástrico y colorrectal. Este tipo de productos ganan repercusión a nivel internacional, especialmente en países como Japón y particularmente en el mercado europeo, donde *Hifas da Terra* ocupa un lugar muy relevante.

Otro proyecto importante está relacionado con la innovación agrícola para optimizar la productividad de plantaciones ecológicas a través de la micorrización con *Boletus edulis* (2016-2017). El objetivo de este proyecto es el de poner a disposición de los agricultores de castaño de material vegetal micorrizado, teniendo en cuenta la edad del castaño y las respectivas tecnologías utilizadas desde el periodo de la siembra hasta el respectivo mantenimiento de las explotaciones agroforestales de castaña. Una vez cumplida esta fase, se procede a hacer el respectivo proceso de seguimiento que permita obtener la mayor información en campo acerca de la optimización en la productividad de *Boletus edulis* con el fin de obtener un producto de alta calidad añadido; en las fotos (4a y 4b), se puede observar el área de invernadero de las especies nativas y exóticas.



4a



4b

Fotos 4a y 4b. Propagación y micorrización de material vegetal nativas y exóticas (roble y pino).

La empresa *Hifas da Terra* participa en un proyecto europeo de innovación agrícola sobre el diseño de nuevas plantaciones de castaños ecológicas que, mediante técnicas sostenibles, podrían revalorizarse con la producción de setas de alto valor gastronómico, además de lograr frutos de castañas y miel de abejas de altísima calidad. Los logros de la micorrización y la polinización permiten lograr cosechas de una mayor calidad y homogeneidad, lo que hace que la castañicultura sea una actividad sostenible, moderna y rentable en Europa.

El grupo de trabajo, dirigido por la empresa *Auriensis Selectum* y completado por *Hifas da Terra*, CTC (Centro Tecnolóxico da Carne) y Enxeñería e Xestión Agrorural Azul e Verde trabaja en la optimización de la producción en plantaciones de castaños a través de un estudio que incorpora la micorrización dirigida para la obtención de setas con alto valor gastronómico, como es el *Boletus edulis*, y de esta manera se cumple con el objetivo de ampliar la gama de productos elaborados a partir de la castaña. Este proyecto se implementa por el apoyo de varias instituciones, entre ellas la Xunta de Galicia y del FEADER (Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural) mediante el programa de ayudas para la creación de Grupos Operativos de la AEI (Asociación Europea para la Innovación) en materia de productividad y sostenibilidad agrícola. Otras instituciones que participan en el proyecto son: *Auriensis Selectum*, Centro Tecnolóxico da Carne (CTC) y Enxeñería e Xestión Agrorural Azul e Verde, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).

Hoy en día cabe considerar a *Hifas da Terra* como una empresa líder en su campo de estudio y desarrollo tecnológico sobre los hongos que viene desarrollando un modelo de bioeconomía o economía circular pionera en Europa. Por eso, durante su corto periodo de vida en el campo de la ecoinnovación, la sosteni-

bilidad y la ecología, ha sido reconocida con varios premios.

La biomimesis y bioeconomía a partir de la acuicultura amazónica

En un momento de mi vida profesional formulamos con una organización no Gubernamental llamada *Centro de Estudios Rurales y de Agricultura Internacional* (CERAI) una propuesta de desarrollo fundamentada en el Pirarucu (*Arapaima gigas*). Esta propuesta, que se socializó en la *Agencia Española de Cooperación Internacional al Desarrollo* (AECID), finalmente no se pudo implementar. Sin embargo, fue una inmensa alegría para mi ver, después de varios años de haber formulado el proyecto de Pirarucú, cómo una especie identificada en peligro de extinción por el CITES se lograba comercializar. Este hecho corroboraba mi convicción de que esta especie podría ser una vector dinamizador del desarrollo humano sostenible en la Amazonia (como se puede apreciar en las fotos -5a y 5b- los juveniles de Pirarucú -*Arapaima gigas*- en los estanques de la finca de *Acuica*). Los expertos colombianos, las instituciones de fomento del sector agropecuario, bien sea por desconocimiento o por salir del paso, no han mostrado interés en una especie íctica que tiene un gran potencial por su carne, su cuero, por el ecoturismo y los procesos de bioinspiración que se pueden lograr con ella. El trabajo con el *Arapaima* en la Amazonia de Brasil, Bolivia y Perú, es muy significativo tanto en lo que tiene que ver con su biología, ecología, como con la reproducción en cautividad y nuevos biomateriales (las publicaciones científicas así lo corroboran). Ejemplo de ello es la investigación, con su respectiva publicación, de la *Empresa Brasileira de Pesquisas/Investigaciones Agropecuaria* (EMBRAPA) denominada “*Alevinagem, recria e engorde do pirarucu*” (Ferreira, 2017).



5a



5b

Fotos 5a & 5b. Juveniles de Pirarucú (*Arapaima gigas*) en los estanques de la finca de ACUICA (www.acuica.org)

La acuicultura que desarrolla la *Asociación de Acuicultores del Caquetá* (ACUI-

CA), se enmarca en los postulados que rigen la biomimesis, al usar de una manera inteligente los componentes de la naturaleza para mejorar los ingresos, diversificar la economía local y regional, teniendo en cuenta que la región del piedemonte andino-amazónico ha sido castigada por la economía ilegal de los psicotrópicos. Siendo así, los peces amazónicos constituyen un gran recurso, con un potencial ilimitado, en la generación de nuevos productos por medio de procesos innovadores relacionados con las características físicas de las especies amazónicas. Dentro de la misión de ACUICA se tiene contemplado el “desarrollar el sector acuícola del departamento del Caquetá y otras regiones del país mediante el apoyo directo a la producción, investigación, transferencia tecnológica y comercialización de bienes y servicios asociados a la acuicultura sostenible con especies nativas, lo que se traduce beneficio socioeconómico y ambiental para los asociados y sus familias” (ACUICA, 2017). En la actualidad, ACUICA cuenta con 119 personas, de las cuales 14 son socios jurídicos que actúan en nombre de los comités municipales de los piscicultores, quienes a su vez representan a una población de 243 afiliados, para un total de 362 personas asociadas.

La forma en que ACUICA está desarrollando ciencia y tecnología resulta muy prometedora para la región amazónica, en tanto que está desarrollando la declaración de Desarrollo Sostenible denominada: “*Transformando Nuestro Mundo: Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*” y, con ello, implementando los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); dicha asociación, al llevar a cabo una economía circular, aborda muchos de los 17 objetivos de desarrollo sostenible en relación con sus afiliados como son los de reducir la pobreza, el hambre y garantizar la seguridad alimentaria, la educación, la igualdad de género y el empoderamiento de la mujer, el agua y el saneamiento, el crecimiento económico, la producción y el consumo sostenible, los bosques, evitar la desertificación y preservar la diversidad biológica, la justicia y la paz, la producción y el consumo responsable. El modelo de ciencia y transferencia de tecnología en la Amazonia desarrollado por ACUICA constituye uno de los grandes retos del siglo XXI para la humanidad, y más aún si es desde la biomimesis. De ahí la importancia para la Amazonia del desarrollo de las denominadas tecnologías convergentes, ya que pueden desembocar en una sociedad amazónica del conocimiento. El valor de los recursos ícticos existentes en la Amazonia permite generar, diversificar e implementar una bioeconomía circular; en las fotos que se muestran a continuación (6a y 6b) se puede apreciar el alevinaje de la especie Araguana (*Anopinella araguana*), considerado como una fase inicial para poder ir construyendo una bioeconomía amazónica (centrada en la producción de peces ornamentales y en el engorde en piscifactorías). La biomimesis es una garantía para la conservación de estas especies, y más aún cuando se basa en una forma de hacer ciencia, tecnología con los propios componentes de la naturaleza (en este caso, con los componentes de los

recursos hidrobiológicos amazónicos) que se convierten en recursos estratégicos por la oferta de proteína animal (para las especies ícticas) y otros recursos que están en proceso de estudio en relación con nuevos biomateriales.

Es importante que la ciencia y la tecnología que se realiza en el Amazonas respondan a las necesidades de los diferentes actores sociales que la intervienen y, además, que sean incluyentes socialmente. La forma en que lo está haciendo la asociación de productores ACUICA va en la línea de implementación de la biomimesis desde los componentes significativos a nivel ecosistémico, como son los peces, y del manejo de la calidad del agua, tanto en instalaciones como a nivel de la microcuenca hidrográfica: “principal materia prima sin la cual la acuicultura no podría desarrollarse. La lluvia, nuestros ríos y quebradas son como lo definimos en ACUICA los diamantes líquidos que le dan un inmenso valor a nuestra tierra caqueteña. Productores, valoremos el recurso hídrico, no lo desperdiciemos ni contaminemos; conservemos las cabeceras del bosque y hagamos reconversión con piscicultura” (ACUICA, 2017).



6a



6b

Fotos 6a y 6b. Alevines de Araguana (*Anopinella araguana*), bien para acuarios en forma de peces ornamentales o como pie de cría para explotaciones comerciales ícticas en la Amazonia.

Esta forma de pensar y de actuar en relación con el uso inteligente de los componentes de la naturaleza y, en este caso, con el manejo del recurso íctico y del agua, permite generar desarrollo humano sostenible (DHS) a nivel local, causando un impacto directo a nivel regional, pero también a nivel nacional e internacional. Este impacto es debido, en parte, al proceso de transferencia de tecnología desarrollada por ciertas instituciones académicas y por la propia asociación hacia sus socios y otras instancias institucionales regionales amazónicas con ocasión de su participación en seminarios, ferias, foros de productores rurales y en congresos a nivel internacional.

La respectiva investigación y la transferencia de tecnología que viene desarrollando ACUICA, posibilita conocer las dinámicas de reproducción, producción y de desarrollo de algunas especies ícticas amazónicas en ambientes construidos

artificialmente, dando lugar a una biomimesis específica fundamentada en la acuicultura amazónica. Este modelo de cuidado en cautividad de las especies ícticas amazónicas hace que las especies que sufren gran presión por su extractivismo extremo se críen en ambientes controlados, ya que se copia o imita la dinámica de los ecosistemas naturales. De igual manera, estos entornos de cría constituyen el mejor escenario para la investigación en temas de dinámicas poblacionales, nutrición, patología, biología y ecología, aspectos que, en condiciones naturales, es muy difícil implementar debido a los pocos recursos públicos y privados destinados a ello.

Es significativo resaltar, finalmente, el importante número de especies con que se está trabajando y el amplio espectro de la funcionalidad ecosistémica amazónica de cada especie íctica utilizada. Las especies manejadas son las siguientes: Cachama Blanca (*Piaractus brachypomus*), Cachama Negra (*Colossoma macropomum*), Bocachico (*Prochilodus magdalenae* - *Prochilodus nigricans*), Yamú (*Brycon siebenthalae*), Sábalo Amazónico (*Brycon hilarii*), Bagre (*Pseudoplatystoma fasciatum*), Arawana Plateada (*Osteoglossum bicirrhosum*), Arawana Azul (*Osteoglossum ferreirae*), Gancho rojo (*Myleus rubipinnis*), Raya común (*Potamotrygon hystrix*), Raya motoro (*Potamotrygon motoro*), Cucha Royal (*Panaque nigrolineatus*), Escalar altum (*Pterophyllum altum*), Cardenal (*Paracheirodon axelrodi*), Cájaro (*Phractocephalus hemiliopterus*), Disco (*Symphysodon discus*), Oscar (*Astranotus ocellatus*), Pirarucú (*Arapaima gigas*); todas estas especies presentan un gran potencial para diversificar la economía extractivista hacia una bioeconomía circular.

Biomimesis y bioeconomía a partir de la robótica blanda

De entre las tecnologías convergentes cabe destacar la robótica y, con ella, la ciencia cognitiva, ya que está desplegando su potencialidad de crecimiento acelerado en el campo de la denominada inteligencia artificial. Con todo, en los últimos años ha aparecido una nueva línea de investigación emergente relacionada con la biomimesis, la denominada robótica blanda, que es complementaria a la robótica dura o robótica convencional. Cuando se hace referencia a la robótica blanda, se hace alusión a la fabricación de unos robots totalmente suaves y autónomos contruidos a través de una electrónica suave de baja densidad.

Estas características relacionadas con una electrónica suave de baja densidad permiten generar unos robots enteramente suaves con un comportamiento similar a la de algunos animales, ya que se fundamenta en un sistema nervioso artificial integrado, lo que abre perspectivas y aplicaciones totalmente novedosas: “La ausencia de electrónica rígida convencional y el uso exclusivo de materiales poliméricos proporcionará un gran paso hacia robots reales parecidos a los animales, interfaces de máquinas humanas compatibles y una nueva clase de control interno

distribuido de neuronas para sistemas robóticos” (Henke, *et al.*, 2017). La base o principio que explica la funcionalidad de este estilo de robótica consiste en el desarrollo de un interruptor elastómero dieléctrico (DES), también denominado músculo artificial, que está compuesto por un electrodo flexible que presenta una conductividad dependiente de la deformación. Estos músculos artificiales están conformados por materiales de polímero blando y carbono (ABI, 2017).

Los elastómeros dieléctricos se componen de un aislante eléctrico con un relieve o espacio entre los dos electrodos conductores de electricidad. Los materiales con los que está realizado el aislador son fundamentalmente de caucho de silicona, mientras que los respectivos electrodos están compuestos de grasa de carbono. Cuando se aplica una corriente a través de los electrodos, esta carga se acumula en cada uno de los electrodos, dejando cargas positivas en uno y cargas negativas en el otro. Estas cargas tanto positivas como negativas son las que permiten el fenómeno de atracción, ya que se contrae y reduce el espacio y, con ello, se “aplasta la membrana aislante” (debido a que la membrana es incompresible y hace que se expanda en la zona (ABI, 2017)).

El movimiento de los músculos artificiales es generado por la tensión oscilante, y esto sucede a causa de un movimiento rítmico en los actuadores que genera una fuerza de arrastre y propulsión hacia adelante. El movimiento producido por la robótica blanda sin electrónica consiste en recibir una carga de corriente continua de las pistas de cobre a través de contactos en la base de los pies. El DES controla la carga de los actuadores de elastómeros dieléctricos blandos, de modo que los interruptores acoplados y los músculos artificiales deben conformar una serie de redes de actuadores inteligentes. Se puede, por tanto, utilizar este mecanismo para lograr impulsar rítmicamente a los prototipos de robots biomiméticos (ABI, 2017).

La robótica blanda se basa en observar el movimiento de algunos organismos vivos, ya que los fenómenos naturales tienen ciertos comportamientos y propiedades que posibilitan la existencia en armonía con el ambiente circundante. Es por ello que la construcción de robots centrándose en el movimiento de las larvas de gusanos, por ejemplo, está considerado como una nueva fase del desarrollo en la robótica. Para cumplir con este reto, el laboratorio de robots biomiméticos desarrolló el interruptor elastómero dieléctrico (DES), también denominado “músculo artificial”, que se ha convertido en la base para el robot bio-inspirado (ABI, 2017).

La utilidad de esta nueva robótica blanda parte del desarrollo de nuevas tecnologías para su uso en las industrias de la salud, especialmente en la aplicación de prótesis y dispositivos de asistencia de fuerza. Debido a la naturaleza viscoelástica de los músculos artificiales, éstos pueden actuar como sistemas de suspensión, eliminando la necesidad de suspensión externa. Como son suaves pueden también ser utilizados en los seres humanos sin temor a lesiones: “los músculos son inte-

ligentes y sensibles en sí mismos. Esto significa que el músculo puede detectar su propia extensión, eliminando la necesidad de sensores externos y reduciendo aún más el costo y la complejidad de los sistemas. Al igual que los músculos humanos, nuestros músculos artificiales pueden sentir donde están con los ojos cerrados” (ABI, 2017).

Los elastómeros dieléctricos se denominan músculos artificiales porque tienen ciertas características generales que no pueden ser reproducidas por otros actuadores lineales. Son rápidos, fuertes, pueden alcanzar extensiones grandes, de manera silenciosa, y son muy ligeros (de hecho, a pesar de su ligereza, son 40 veces más potentes en fuerza que el músculo humano). Actualmente, el *Grupo de Biomiméticos* se centra en el control fino de los músculos artificiales para generar energía. Los miembros del grupo también están investigando la interfase de la máquina humana, de tal modo que las señales nerviosas de un ser humano se puedan interpretar y aplicarse para el desarrollo de dispositivos artificiales y prótesis musculares.

Conclusión

Es importante aclarar que la bioeconomía, tal como es utilizada desde la biomimesis, difiere radicalmente de la perspectiva de la biología sintética, ya que ésta última, pretende romper con la co-evolución de las especies, o sea, generar nuevas especies que no existen a partir de funciones y procesos nuevos de organismos que no viven en la naturaleza. Se puede decir que, en el fondo, es un rediseño de la vida misma a partir de la voluntad humana. En cambio, la biomimesis permite la co-evolución natural de las especies, de tal forma que los seres humanos somos una especie más en la biosfera.

La biomimesis, como construcción humana, podrá tener sus imperfecciones y sus contradicciones en el desarrollo técnico científico y en lo que tiene que ver con la apropiación de sus resultados, pero por el momento es un instrumento muy potente y significativo para poder implementar un modelo de desarrollo humano sustentable (DHS). Y es que, desde el enfoque biomimético, es posible generar una nueva economía del conocimiento (identificada con la bioeconomía) que sea eficaz en la solución exhaustiva de aquellos problemas medioambientales producidos en la biosfera-atmósfera terrestre desde los inicios de la era de la industrialización (y que llegan hasta nuestra inmediata actualidad). En tal sentido, la biomimesis se ve reforzada cuando admite su coexistencia con otros valores culturales en entornos sociales, económicos, políticos que todavía preservan una cosmovisión de respeto con la naturaleza y que, en suma, se traduce en un estímulo de la libertad individual y colectiva para conservar los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- ARREGI, I. A., RODRÍGUEZ-LOINAZ, G., PALACIOS-AGUNDEZ, I., PEÑA, L., DE MANUEL, B., CASADO-ARZUAGA, I. (2016). Biomimesis y los Servicios de los Ecosistemas. En Sierra, C. H., Bernal, H., & Sierra, S (Eds.). *Biomimesis. Inspiración creativa en la naturaleza y escenarios potenciales de sostenibilidad*. Memorias del Simposio Internacional de Estudios Biomiméticos. Bogotá: UNAD.
- ALBORNOZ, M. (2013). Innovación, equidad y desarrollo latinoamericano. *Isegoría*, (48), 111-126.
- ASOCIACIÓN DE ACUICULTORES DE CAQUETÁ (ACUICA). (2017). *Misión*. Obtenido de <http://acuica.org/index.php/nosotros/mision>.
- AUCKLAND BIOENGINEERING INSTITUTE (ABI). (2017). *Soft electronics for robots*. Auckland: The University of Auckland.
- BENYUS, J. (2012). *Biomimesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets.
- BERMEJO, R. (2001). Desarrollo sostenible y humano. En Ibarra, P. & Unceta, K. (Eds.). *Ensayos sobre el desarrollo humano*. Barcelona: Icaria.
- BERMEJO, R. (2011). *Manual para una economía sostenible: principios y estrategias de economía sostenible*. Madrid: Libros de la Catarata.
- BERMEJO, R. (2014). *Handbook for a Sustainable Economy*. Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag.
- BLOK, V., & GREMMEN, B. (2016). Ecological innovation: Biomimicry as a new way of thinking and acting ecologically. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 29(2), 203-217.
- CEPAL. (2016). *Ciencia, tecnología e innovación en la economía digital: la situación de América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas: Santiago de Chile.
- CUERDO MIR, M., GOROSTIZA, I. R., & LUIS, J. (2000). *Economía y naturaleza: una historia de las ideas*. Madrid: Síntesis.
- DALY, H. (1989). *Economía, ecología y ética. Ensayos hacia una economía en estado estacionario*. México D. F.: FCE.
- DE LA RAZA, A. G. (2010). La entropía en una economía abierta. En: *Sistemas complejos. Perspectiva de una teoría general*. Anthropos. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- LIMA, A., RODRIGUES, A., MACIEL, P., REZENDE, F., DE FREITAS, L. E. L., TAVARES-DIAS, M., & BEZERRA, T. 2017. *Alevinagem, recria e engorda de pirarucu*. Embrapa Pesca e Aquicultura-Livro técnico (INFOTECA-E).Brasília. Brasil.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1996). *La ley de la Entropía en el proceso económico*. Madrid: Fundación Argentaria.
- GRIFFIN, K. (2001). *Desarrollo humano: origen, evolución e impacto. Ensayos sobre el desarrollo humano*. Barcelona: Icaria editorial.
- HEYD, T. (2005). Saber tradicional, ética de la tierra y sustentabilidad. *Isegoría*, (32), 175-184.
- HENKE, E. F. M., SCHLATTER, S., & ANDERSON, I. A. (2017). Soft dielectric elastomer oscillators driving bioinspired robots. *Soft robotics*, 4(4), 353-366.
- HIFAS DA TERRA (HDT). (2017). *Líneas de investigación*. Obtenido de <https://www.hifasda terra.com/investigacion/>.
- ALIER, J. M., & JUSMET, J. R. (2015). *Economía ecológica y política ambiental*. México D. F.: Fondo de Cultura económica.
- MONTANA, C. A., & FIORENTINO, C. (2016). Bio-Utilization, Bio-Inspiration and Bio-Affi-

- liation in Design for Sustainability Biotechnology, Biomimicry and Biophilic Design. *The International Journal of Designed Objects*, 10 (3), 1-18.
- MORENO, A. J., MIGUEL V. E., ANDRÉS, T., VALDEZ, C. J. (2015). *Cambio Climático en una comunidad originaria. Estudio de caso en Cuilapan de Guerrero*. Eumed: Oaxaca.
- NAREDO PÉREZ, J. M. (2006). *Raíces económicas de deterioro ecológico y social. Más allá de los dogmas*. Madrid: Siglo XX Editores.
- NAREDO, J. M. (2015). *La economía en evolución: historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico*. Madrid: Siglo XXI.
- OLALDE, M. O. (2010). *Servicios ambientales de los ecosistemas. Amazonía y agua: desarrollo sostenible en el siglo XXI*. Bilbao: Editorial Unesco Etxea.
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD). (1994). *Algunas preguntas y respuestas sobre el desarrollo humano sostenible*. PNUD: Washington.
- RAMAN, R., & BASHIR, R. (2017). Biomimicry, biofabrication, and biohybrid systems: The emergence and evolution of biological design. *Advanced healthcare materials*, 6(20).
- RED DE INDICADORES DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA -Iberoamericana e Interamericana- (RICYT). (2017). *El estado de la ciencia: Principales Indicadores de Ciencia y Tecnología Iberoamericanos / Interamericanos 2017*.
- RIECHMANN, J. (2003). Biomímesis: un concepto clave para pensar la sostenibilidad. *El Ecologista*, 36(28-31).
- RIECHMANN, J. (2005). ¿Cómo cambiar hacia sociedades sostenibles? Reflexiones sobre biomímesis y autolimitación. *Isegoría*, (32), 95-118.
- RIECHMANN, J. (2006). Biomímesis: respuestas a algunas objeciones. *Argumentos de Razón Técnica*, 9, 13-36.
- RIECHMANN, J. (2016). ¿Triunfará el nuevo gnosticismo? Notas sobre biología sintética, nanotecnologías y manipulación genética en el Siglo de la Gran Prueba. *Isegoría*, (55), 409-441.
- SIERRA, C. H. (2016). Biomimesis. El imaginario instrumental de la naturaleza en la techno-ciencia contemporánea. En Sierra, C. H., Bernal, H., & Sierra Hernando, S (Eds.). *Biomimesis. Inspiración creativa en la naturaleza y escenarios potenciales de sostenibilidad*. Memorias del Simposio Internacional de Estudios Biomiméticos. Bogotá: UNAD.
- SIERRA, C. H., BERNAL, H., GAINZA, B. X., PINTO, C. A. (2014). La Biomimesis como eje de la tecnociencia contemporánea: claves desde la perspectiva epistemológica. *Olhallaes Amazoniçôs*, 2 (1), 348-360.
- SCHAFER, D. P. (2000). A new model of development for the new millennium. *World Futures: Journal of General Evolution*, 55(4), 293-328.
- TOPAZ, M. (2016). Bioinspiration education at zoological institutions: an optimistic approach for innovation leading to biodiversity conservation. *International Zoo Yearbook*, 50(1), 112-124.
- UNCETA, K. (2001). *Perspectivas para el desarrollo humano en la era de la globalización. Ensayos sobre el desarrollo humano*. Barcelona: Icaria.
- VALERA L., & MARCOS, A. (2016). Desarrollo humano sostenible: una visión Aristotélica. *Isegoria*, (51), 671-690.

Biomimética y ciencias de la complejidad: fundamentos para el desarrollo regenerativo

Javier Collado-Ruano

Universidad Nacional de Educación (UNAE), Ecuador

Antonio Malo-Larrea

Universidad del Azuay (UDA), Ecuador

El objetivo principal de este artículo es demostrar que la biomimética es una ciencia compleja y transdisciplinaria que representa un meta-modelo para mejorar la economía, la ingeniería, el diseño, la arquitectura, el urbanismo, la industria, la tecnología, la política, la educación, la energía, el arte, etc., y también nos abre las puertas al desarrollo regenerativo. Mientras que la noción de desarrollo sostenible está enfocada en minimizar el impacto negativo de los humanos en el planeta, el desarrollo regenerativo se enfoca en maximizar el impacto positivo del ser humano en la Tierra. En este trabajo también se presentan las diferencias epistemológicas entre la ciencia moderna y las ciencias de la complejidad. Como resultado, la investigación defiende que la biomimética constituye un meta-sistema de pensamiento que busca regenerar el sistema socio-ecológico mediante una relación más cooperativa y menos dominadora con la naturaleza. Este concepto biocéntrico establece un nuevo imaginario colectivo basado en lo que podemos aprender de la naturaleza y no en lo que podemos extraer. Además, este bioconocimiento se aborda desde el fenómeno de la permacultura, basado en asentamientos humanos locales cuya filosofía de vida emula los modelos socio-ecológicos de las comunidades aborígenes tradicionales de Australia. Por último, se concluye que la revolución biomimética representa el inicio de una nueva era civilizatoria que busca transformar la matriz productiva del capitalismo globalizado actual con el fin de respetar los límites biofísicos establecidos por los ecosistemas naturales.

Introducción al sistema socio-ecológico

La ecología humana, la economía ecológica y la ecología política abren un abanico de preguntas muy grande y colorido. Los límites de nuestro planeta y el concepto de la entropía cuestionan profundamente la relación de las sociedades humanas

con la naturaleza. Las ideas de progreso ilimitado y crecimiento infinito son una falacia cognitiva que ha provocado la sexta extinción en masa (Leakey & Lewin, 1996) y el cambio climático del Antropoceno (Steffen, Crutzen & McNeill, 2007), un periodo geológico caracterizado por la gran huella ecológica que dejamos en nuestro planeta (Wackernagel & Rees, 1996). A su vez, estos cuestionamientos filosóficos implican un proceso de re-significación del concepto de naturaleza, ya que producen racionalidades alternativas al capitalismo neoliberal globalizado (Leff, 2004). La noción de naturaleza implica que la *crisis ecológica* actual es causada porque el ser humano ha modificado el equilibrio de los ecosistemas. La realidad ontológica que nos rodea es un *continuum* donde la materia, la energía y la información fluyen libremente desde los circuitos ecológicos hacia los circuitos socio-económicos (Toledo, 2008). Las relaciones de los sistemas sociales con el sistema ecológico son relaciones evolutivas y co-evolutivas (Norgaard, 1984, 1987). Por esta razón, las ciencias sociales comenzaron a asumir la interdependencia del sistema social y del sistema ecológico durante el siglo XX, pero también su indivisibilidad (Morin, 1995, 1996; Stevens, 2012). En este contexto histórico, se produce una conceptualización ecológica de lo social, y social de lo ecológico, formando el sistema socio-ecológico (Gallopín, Gutman, & Maletta, 1989), o sistema social-ecológico (Berkes & Folke, 1992). El *sistema socio-ecológico* es mucho más que la integración conceptual de dos entidades que han sido tradicionalmente entendidas como dos sistemas diferentes, los sistemas social y ecológico. El sistema socio-ecológico es un sistema complejo y en continua evolución (Pujantell-Albós, 2012).

La concepción del sistema socio-ecológico implica, por un lado, que las sociedades humanas son parte del sistema ecológico, y por tanto, están profundamente conectadas a los procesos ecológicos a través de sus funciones biofísicas. Y por otro lado, también implica que el sistema social y el sistema ecológico deben ser considerados como un solo sistema complejo y adaptativo (Madrid, Cabello, & Giampietro, 2013). De acuerdo con Erb (2012), las sociedades humanas son un híbrido que nace del sistema cultural y del sistema biofísico. Para Latour (1993), no existen entidades o cosas, como puede ser la naturaleza, la sociedad o incluso la cultura, sino que existe lo humano y no humano, que forma híbridos socio-naturales que se reproducen constantemente.

El término socio-ecológico fue originalmente utilizado desde la década de 1950 en la etología (la ciencia que estudia el comportamiento animal), concretamente en la etología social, para referirse a las relaciones entre la ecología, la dinámica poblacional y el comportamiento social (Hurrell, 1970). Las primeras referencias a este término usado para enlazar a los sistemas humanos con su sistema ecológico se encuentran en la década de 1960, con el artículo de Gunnar Lindh *Water resources management problems in urban agglomerations*, publicado en 1966, donde

se presenta a las cuencas hídricas como sistemas socio-ecológicos. De esta manera, la idea de sistema socio-ecológico surge en la etología, y es adoptada después por las ciencias sociales y la ecología humana, para referirse al sistema complejo formado por las sociedades humanas y su sistema ecológico.

La ciencia moderna y su reduccionismo epistemológico

Antes de producirse la gran revolución industrial que cambió para siempre el orden natural de los ecosistemas (Malthus, 1926), la ciencia moderna ya había comenzado a vertebrar el conocimiento de forma positivista e hiper-especializada. A pesar de que Galileo y Newton consideraban que la filosofía y la teología continuaban siendo las formas de conocimiento adecuadas para la explicación/comprensión de la realidad, otros padres del método científico moderno como Bacon y Descartes tuvieron posiciones diferentes. Actitudes bien diferentes tuvieron después los iluministas y los positivistas, que llevaron la intelectualidad europea hacia un camino contrario al propuesto por Galileo y Newton.

De este modo, el positivismo europeo irrumpió como una corriente de pensamiento en el siglo XVIII y encontró su punto álgido en la primera parte del siglo XX, con el denominado positivismo lógico promovido por el Círculo de Viena. Se trata de un movimiento filosófico que aparece como reacción a la filosofía idealista y especulativa, afirmando que el único conocimiento verdadero es el conocimiento científico, que surge con el análisis de los hechos empíricos a través del método científico. Con el transcurso del tiempo, el legado epistémico que hemos recibido en la actualidad de la ciencia moderna, es una herencia reduccionista donde el conocimiento dejó de ser el *espejo mental-espiritual* del Universo, el cual estaba presente en muchas tradiciones ancestrales de los pueblos originarios. Este abordaje epistémico objetivizó a la naturaleza y la redujo a un simple proveedor de materia prima para la industria, convirtiéndola en un simple instrumento de manipulación y explotación (Max-Neef, 1986).

Desde el siglo XVII hasta el siglo XIX, la ciencia moderna se fundamentó en la idea de separación del individuo con la naturaleza (separación de sujeto y objeto) y estableció tres postulados fundamentales: 1) la existencia de leyes universales de carácter matemático; 2) la identificación de estas leyes por experimentos científicos; y 3) la reproductibilidad de los datos experimentados. Las matemáticas se constituyeron como el lenguaje de esa nueva ideología científica empírico-racional que pronto se volvió hegemónica en los ambientes científicos y académicos para formular nuevas teorías del conocimiento. Un buen ejemplo es el método analítico creado por Descartes en su "*Discurso del Método*" de 1637, cuyo principio "*cogito ergo sum*" (pienso, luego existo) constituye el elemento esencial para

establecer un dualismo sustancial entre el cuerpo (*res extensa*) y el alma (*res cogitans*); entre el sujeto y el objeto; entre el espíritu y la materia; entre el sentimiento y la razón; entre la libertad y el determinismo.

En términos generales, el pensamiento derivado de la física clásica se fundamentó como el soporte epistemológico para la organización del conocimiento científico de la ciencia moderna, que comprendía al propio universo como una máquina mecanicista y previsible al estar limitado por las leyes de la *continuidad*¹, la *causalidad local*² y el *determinismo*³. La sencillez de estos tres conceptos científicos ha venido fascinando a gran parte de intelectuales racionalistas de los últimos siglos en el mundo europeo y occidental. Esta situación de euforia colectiva científica dio lugar a una nueva organización del conocimiento denominada hoy día como *paradigma mecanicista* o *paradigma de la simplificación* por su tendencia a fragmentar el conocimiento científico en un número creciente de disciplinas especializadas de partes cada vez menores de la realidad (Morin, 2005).

Con el transcurso del tiempo, esta visión reduccionista ha dado lugar a una ilusión o error epistémico que ha llevado a las sociedades occidentales a considerar el conocimiento científico como el único conocimiento válido “para llegar a la verdad”. Esta creencia cultural también marginó a aquellas esferas que no son medibles, constatables ni experimentables. Es decir, las emociones, la espiritualidad y la creatividad, como otras tantas dimensiones humanas, han sido olvidadas históricamente por una ciencia moderna que ha evolucionado de acuerdo a los intereses económicos capitalistas. De este modo, el pensamiento racional y científico se constituyó como el eje de enunciación de paradigmas (Dussel, 2006). Como consecuencia de ello, la economía globalizada nos ha llevado a cuotas de insostenibilidad planetaria sin precedentes históricos.

Si bien es cierto que gracias al pensamiento de reducción epistemológica occidental se ha obtenido un gran desarrollo tecnológico y material en las últimas décadas, la propia especialización disciplinar ha puesto en jaque las fronteras conceptuales y metodológicas del reduccionismo epistemológico en que la ciencia moderna se apoyaba. Paradójicamente, ha sido la esencia misma de las ciencias exactas las que han llevado a la idea de los límites del conocimiento disciplinario (Nicolescu, 2008). Después de un largo período de tiempo bajo un marco epistemológico reduccionista, el conocimiento disciplinario ha llegado a sus propias limitaciones, extendiéndose también para la cultura y la vida social en general. Esta situación ha permitido la aparición de un diálogo interdisciplinar entre las propias disciplinas científicas. Pero también ha provocado un diálogo inter-epistemológico transdisciplinar entre las disciplinas científicas con los saberes no científicos subyacentes de las culturas ancestrales, la sabiduría indígena, las artes, la espiritualidad, las emociones y otras epistemes (Collado, 2018).

Las ciencias de la complejidad y su transdisciplinariedad epistemológica

Si bien la ciencia positivista implicó la muerte de la idea de la naturaleza como un ser cuasi-cósmico y mítico, el nacimiento de la ecología como una ciencia tácitamente compleja, significó el surgimiento de nuevos conceptos como ecosistema y biósfera. Estos conceptos resucitaron a la naturaleza como un ente vivo que se auto-organiza y que se autorregula (Morin, 1995). Lynn Margulis (2002), quien propuso la teoría biológica de la endosimbiosis sobre el origen de los organismos eucariotas, y quien además es coautora de la hipótesis Gaia (Margulis & Lovelock, 1989), sostenía que la naturaleza es una entidad evolutiva y autopoiética (Maturana & Varela, 2011). Ese sistema natural en constante proceso de evolución, autoorganización y automantenimiento, ha sido llamado también sistema ecológico por Berkes & Folke (1992). De esta manera, el sistema ecológico puede ser entendido como un *sistema adaptativo complejo* (Levin, 1998).

Durante la modernidad, la naturaleza se ha ido constituyendo como un ente discursivo, es decir, como una entidad que puede ser protegida, culpada y dominada, en nombre del bienestar de la humanidad (Leff, 2004). La dicotomía sociedad-naturaleza ha permitido el uso de la naturaleza como una fuente de crisis, facilitando el ejercicio del poder, al justificar decisiones geopolíticas y económicas específicas (Kaïka, 2003). De ahí que las percepciones de la *naturaleza* han tenido, y tienen, profundas implicaciones geopolíticas (Gandy, 2004). En este contexto de crisis civilizatoria (Morin & Kern, 2005), las ciencias de la complejidad ofrecen una perspectiva intersistémica que permite estudiar la ambigüedad de la distinción sociedad-naturaleza, evidenciando la interacción de los valores humanos con el entendimiento científico del mundo natural (E. Odum, 1997; H. Odum, 1971; Prigogine & Stengers, 1984; Schneider & Kay, 1994; Schrödinger, 1944; Ulanowicz & Hannon, 1987; Whiteside, 2002).

Dicho de otro modo, las ciencias de la complejidad emergen como una alternativa epistémica transdisciplinar al pensamiento científico positivista, que desde la Grecia antigua hasta nuestro tiempo ha buscado construir un conocimiento humano preciso, cierto y seguro. Este positivismo lógico se sostiene en un pensamiento lineal, donde toda causa tiene un efecto y viceversa, lo que permite modelar al cosmos y predecir su comportamiento. Es decir, entiende al universo como una gran máquina que se puede descifrar y controlar, y a la tierra como otra máquina que nos puede proveer infinitamente de recursos (Munné, 2004).

Si bien es cierto que los principios de universalidad, reducción y separación de la inteligibilidad propia del pensamiento “clásico” dieron lugar a grandes progresos (desde la gravitación de Newton hasta la relatividad de Einstein), no cabe duda que el mismo desarrollo de los conocimientos científicos ha entrado en crisis desde la revolución cuántica (Morin, 2008). Resulta evidente que el abordaje

reduccionista del conocimiento positivista es incapaz de visualizar el contexto planetario actual de crisis ecológica y civilizatoria, puesto que se basa únicamente en una estrategia o inteligencia parcelada, compartimentada y disyuntiva. Por este motivo, las ciencias de la complejidad emergen desde un abordaje epistémico transdisciplinar que nos permite entender mejor la multidimensionalidad e interconectividad de los fenómenos ontológicos de nuestra realidad.

En este sentido, Morin (2005) nos recuerda las palabras del físico y matemático Blaise Pascal: “*es imposible conocer el todo sin conocer las partes, ni conocer las partes sin conocer el todo*”. Pero no se trata de sustituir el orden por el desorden, la separabilidad por la no separabilidad, ni la lógica clásica por la lógica cuántica o por una sinrazón. Se trata de complementar los principios inteligibles del pensamiento clásico reductor con los principios epistémicos transdisciplinares de las ciencias de la complejidad. Del mismo modo que la transdisciplinariedad *se nutre* de la disciplinariedad, en el sentido de que la complementa, la transgrede y no se opone a ella; el pensamiento complejo debe contextualizar globalmente y, al mismo tiempo, reconocer lo singular, lo concreto y lo individual.

En palabras del biólogo y teórico Edward Wilson (1998, 59), “*la complejidad es lo que interesa a los científicos al final, no la sencillez. El amor por la complejidad sin reduccionismo hace arte; el amor por la complejidad con reduccionismo hace ciencia*”. Es decir, las ciencias de la complejidad integran y complementan el abordaje epistémico reductor de la ciencia moderna, puesto que tiene como horizonte gnoseológico la búsqueda de una dialógica entre los diferentes niveles que constituyen los fenómenos de la totalidad viviente. Mientras que el pensamiento simplificador explica todos los objetos, fenómenos y sistemas a partir de la reducción hiperespecializada de sus partes más simples y elementales, el pensamiento complejo y transdisciplinar combina saberes científicos y no científicos. Es decir, las ciencias de la complejidad se constituyen mediante un diálogo inter-epistemológico que fusiona los conocimientos científicos de un universo exterior con la sabiduría ancestral de nuestro universo espiritual interior (Collado, 2018). Es precisamente en este marco epistemológico de ciencias de la complejidad donde aparece la biomimética como un meta-sistema de pensamiento.

La biomimética como meta-sistema de pensamiento

Ante los problemas de insostenibilidad planetaria y la crisis socio-ecológica actual, el enfoque biomimético emerge como una de las respuestas más innovadoras para proteger el medio ambiente y mejorar la calidad de vida a través de nuevos hábitos de consumo y producción sostenibles. El término *biomímesis* proviene del griego antiguo *bios* (vida), y *mimesis* (imitación), por lo que significa “imitación

de la vida”. Pero esta visión científica de estudiar e imitar los procesos naturales es muy antigua, y está presente en la mayoría de las cosmovisiones ancestrales y tradiciones culturales antiguas. “*La biomimesis se vale de un estándar ecológico para juzgar la corrección de nuestras innovaciones. Después de 3.800 millones de años de evolución, la naturaleza ha descubierto lo que funciona, lo que es apropiado y lo que perdura*” señala la bióloga Janine Benyus (2012, 13). En efecto, a diferencia de la Revolución Industrial, que viene usando a la naturaleza como un objeto sin vida para producir materia prima, la Revolución Biomimética inicia un período basado en lo que podemos aprender de la naturaleza para resolver nuestros complejos problemas sociales.

La perspectiva biomimética puede *bioinspirarnos* para mejorar la economía, ingeniería, diseño, arquitectura, urbanismo, industria, tecnología, política, educación, energía, arte, etc. (Collado, 2017). Desde esta perspectiva meta-sistémica, se puede definir la biomimesis como el estudio transdisciplinar de la auto-eco-organización de los sistemas biológicos en su entorno medioambiental, con la finalidad de descubrir los principios de sostenibilidad y las estrategias coevolutivas que se producen en la naturaleza para tomarlos como un meta-modelo a imitar en los sub-modelos humanos. Dicho de otro modo, la biomimética es un meta-modelo epistémico que busca transformar la encrucijada histórica en la que nos encontramos a través de la imitación de los procesos creativos que se hallan intrínsecos en la sabiduría de la naturaleza.

La biomimética constituye una cosmovisión epistemológica que cuestiona los valores y las prioridades occidentales con el fin de transformar el imaginario colectivo actual que nos conduce al colapso ecológico y civilizatorio. También nos muestra que el crecimiento material continuado es insostenible y nos invita a concebir al propio universo desde un pensamiento más holístico, relacional, contextual y participativo. De acuerdo con Benyus (2012, p. 16), “*los seres vivos han hecho todo lo que queremos hacer nosotros, sin devorar combustibles fósiles, contaminar el planeta ni hipotecar su futuro. ¿Puede haber mejores modelos?*”. Sin duda, la biomimética representa una (r)evolución del conocimiento humano porque deja atrás siglos de esfuerzos destinados a dominar y controlar la naturaleza (Riechmann, 2014).

Esta idea de armonía con la Tierra ha estado presente en el ideario de las cosmovisiones ancestrales de los pueblos indígenas y aborígenes originarios, al defender la Pachamama como un sistema orgánico vivo, y no como una entidad muerta que únicamente nos provee de materias primas para su manufacturación. De ahí el carácter transdisciplinar adyacente en la biomimesis, cuya ecología de saberes científicos y no científicos convergen para crear un meta-modelo epistémico que nos abre las puertas a una convivencia socio-ecológica más resiliente. Es por esa razón que muchos científicos están volviendo a estudiar todas aquellas epistemes

que abogan por rescatar y defender a todos los organismos vivos y no vivos de la naturaleza por encima del lucro económico que impone la globalización imperante. Resulta obvio que la biomimética no es una idea nueva, ya que los humanos siempre han observado a la naturaleza en busca de respuestas para solucionar problemas simples y complejos de nuestra existencia.

Por este motivo, la biomimética es una ciencia compleja que comprende a la naturaleza como un meta-punto de encuentro civilizatorio transhistórico entre todas las sociedades del mundo, desde las que se consideran arcaicas hasta las más tecnológicas, ya que constituye la fuente energética y material que las alimenta para su supervivencia pasada, presente y futura. Dentro de cada sociedad pasada o presente, la naturaleza ha sido una fuente de inspiración para todas aquellas personas creativas que han buscado respuestas en la sabiduría intrínseca de especies que han co-evolucionado durante mucho más tiempo que la humana. Por esta razón, la biomimética se fundamenta como iniciativa inter-epistemológica que viene inspirando a múltiples artistas, arquitectos, músicos, escritores, ingenieros, economistas, médicos, biólogos, ecólogos, educadores y científicos de todo el mundo a lo largo de nuestra historia humana. De ahí que Benyus reivindique la necesidad de emular a la naturaleza a través de la biomimesis:

Todas nuestras invenciones ya han surgido antes en la naturaleza en una versión más elegante y menos costosa para el planeta. (...) Nuestros sistemas de calefacción central y acondicionamiento del aire son superados por los 30°C constantes de los termiteros. Nuestro radar más complejo es duro de oído en comparación con la transmisión multifrecuencial de los murciélagos. Y nuestros “materiales inteligentes” tienen que inclinarse ante la piel del delfín o la trompa de las mariposas. Incluso la rueda, que siempre hemos considerado una invención genuinamente humana, ha resultado estar presente en los motores moleculares que accionan los flagelos de las bacterias más antiguas.

También nos dan una lección de humildad las huestes de organismos capaces de hazañas que nosotros sólo podemos soñar. Las algas bioluminiscentes combinan sustancias químicas para encender sus linternas corporales. Los peces árticos y algunas ranas son capaces de congelarse del todo y luego revivir, protegiendo sus órganos de los daños causados por los cristales de hielo. Los osos negros hibernan todo el invierno sin intoxicarse por su propia urea, mientras que sus primos los osos polares permanecen activos gracias a una capa de pelos transparentes que actúan como los paneles de un invernadero. Los camaleones y las platijas se camuflan modificando la coloración de su piel para confundirse con el sustrato. Las abejas, las tortugas y las aves migratorias navegan sin necesidad de mapas, mientras que las ballenas y los pingüinos bucean sin escafandra. ¿Cómo lo hacen? ¿Cómo consiguen las libélulas superar en maniobrabilidad a nuestros mejores helicópteros? ¿Cómo se las arreglan los colibríes para cruzar el golfo de México con menos de tres gramos de combustible? ¿Cómo pueden las hormigas cargar con el equivalente

de cientos de kilos en el sofocante calor de la jungla? (Benyus, 2012, p. 21).

Como bien argumenta Benyus, el mundo natural ha diseñado procesos estratégicos coevolutivos que funcionan y perduran a lo largo de miles de millones de años, por lo que representa el mejor meta-modelo a imitar, copiar, emular y perfeccionar para crear modelos civilizatorios más resilientes, sostenibles y regenerativos. Sin apenas darnos cuenta, las últimas décadas han traído incontables eco-inventos. Turbinas y aerogeneradores más eficientes a partir de la aleta de la ballena jorobada (el mamífero más grande la Tierra). Células fotovoltaicas que emulan a las hojas de las plantas. El tren bala japonés Shinkansen copió al martín pescador para reducir el ruido y el consumo (en un 15% menos de energía), aumentando su velocidad en un 10%. Se han creado hélices, ventiladores e impulsores a partir de la piel de moluscos, que presentan una fricción menor y reduce el ruido en un 75% y las necesidades energéticas en un 85%. Los ingenieros automovilísticos diseñaron la forma del coche “*Mercedes-Benz Bionic*” a partir del pez tropical “*ostracion cubicus*” para mejorar la aerodinámica y la resistencia de su chasis. La fabricación de cerámicas irrompibles basadas en la capa interna de la concha de ciertos mariscos (conocida como madreperla o nácar). La construcción de edificios orgánicos que ahorran un gasto energético considerable gracias a la imitación de las termitas “*macrotermes michaelsoni*”, una especie africana que mantiene la humedad y la temperatura en el interior de sus nidos. La creación de lentes especiales para grandes telescopios y plantas de energía termosolar que imitan los brazos de las estrellas de mar (*ofiuras*). La “hijuela de araña” imita y mejora las propiedades de la fibra arácnida natural para ayudar a fijar implantes de tejidos y órganos en la medicina regenerativa.

También se ha diseñado una pintura que imita el tejido hidrofóbico de la flor de loto (*nelumbo nucifera*) para repeler el agua y arrastrar toda la suciedad y microorganismos que puedan dañarla. Se ha desarrollado una cinta adhesiva auto-limpiable y reutilizable basada en los filamentos de la planta de las patas del reptil gecko. El velcro utilizado en las prendas de vestir reproduce la forma de aguja de gancho que recubren a las espinas del cardo (*xanthium spinosum*). Los cascos de bicicleta *Catlike* se inspiran en los paneles de miel de las abejas. El traje de baño que *Speedo* lanzó en los Juegos Olímpicos de Pekín (2008) simulaba la piel de los tiburones para reducir la fricción, ahorrar energía y aumentar la velocidad de los nadadores.

En suma, todos estos eco-inventos tecnológicos, y muchos otros que están inspirados en la naturaleza, suponen un paso muy importante para aprender a coevolucionar en armonía con la Pachamama. Muchas de las (bio)tecnologías que servirán para innovar y reconstruir ecológicamente nuestras sociedades ya están inventadas, o a lo sumo alcanzarán su madurez en los próximos años. Un buen

ejemplo son las bobinas eléctricas diseñadas por el inventor, físico e ingeniero Nikola Tesla al observar las tormentas eléctricas. Sin duda, todas estas ideas biomiméticas y eco-inventos podrían ayudarnos a cumplir los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) pactados por los Estados-Miembros de las Naciones Unidas para el año 2030, puesto que nos orientan hacia una transformación civilizatoria basada en el bioconocimiento.

La permacultura como gestión resiliente del sistema socio-ecológico

Al hablar de bioconocimiento, es necesario hablar de todas aquellas prácticas socio-ecológicas que comprenden e integran la rica biodiversidad planetaria como una fuente de conocimiento científico y saber ancestral. La permacultura es una práctica agroecológica que acoge de manera transdisciplinar el conjunto de saberes, conocimientos y aplicaciones, tanto tradicionales como científicas, con el fin de producir alimentos obtenidos mediante un abordaje biomimético basado en la imitación y en el perfeccionamiento de los ecosistemas naturales. Para muchas personas, la permacultura es un claro ejemplo de estilo de vida y de planificación del hábitat a través de la ingeniería ecológica, puesto que se logra extender la concepción de sostenibilidad ecológica a la sostenibilidad de los asentamientos humanos locales.

El término de *permacultura* fue acuñado en la década de 1970 por los ecologistas australianos David Holmgren y Bill Mollison, con el objetivo de crear una filosofía de vida basada en los modelos socio-ecológicos de las comunidades aborígenes tradicionales de Australia. La *permacultura* constituye una nueva forma sistémica de pensar y concebir los principios ecológicos que pueden ser usados para proyectar, crear y mejorar los esfuerzos de individuos y comunidades para alcanzar un futuro sostenible. En su versión contemporánea, la permacultura reposa sobre tres pilares éticos fundamentales: (1) cuidar de la Tierra, (2) cuidar de las personas, y (3) repartir todos los excedentes. A partir de esta triética, el propio David Holmgren (2010) definió 12 principios de diseño de la Permacultura en su libro “*Permaculture: Principles & Pathways Beyond Sustainability*”. Apoyado en la Teoría de Sistemas, Homgren (2010) presenta las siguientes guías generales para desarrollar un sistema sostenible dentro de la complejidad social y natural:

- 1) *Observar e interactuar*. Hay que tomarse el tiempo necesario para involucrarnos en los procesos coevolutivos de la naturaleza. Es posible diseñar soluciones específicas que se adapten a cada situación particular.
- 2) *Capturar y almacenar recursos*. Es necesario desarrollar sistemas inteligentes y sostenibles que recolecten y almacenen recursos para las generaciones futuras.

- 3) *Obtener rendimiento.* La productividad debe medirse en términos de producto real a partir del trabajo que se está haciendo, sin hipotecar el futuro.
- 4) *Practicar la autorregulación y aceptar la retroalimentación.* Al comprender cómo funcionan las retroalimentaciones de la naturaleza se pueden diseñar sistemas que sean autorregulados, lo que reduce el esfuerzo destinado a su gestión y manutención.
- 5) *Usar y valorar los servicios y recursos renovables.* Hay que hacer un mejor uso sobre la abundancia natural, reducir nuestro consumismo y acabar con la dependencia que tenemos de los recursos no renovables.
- 6) *Dejar de producir residuos.* El concepto de residuo deja de tener sentido al reutilizar los recursos disponibles e integrarlos adecuadamente dentro de los ciclos naturales.
- 7) *Diseñar de los patrones a los detalles.* Al observar la naturaleza y la sociedad desde una perspectiva más amplia se pueden identificar patrones que formen la espina dorsal de nuestros diseños, para después implementarlos con los detalles.
- 8) *Integrar más que segregar.* Puesto que en la naturaleza existen diferentes tipos de relaciones (depredación, parasitismo, simbiosis, etc.), hay que colocar los elementos apropiados en los lugares adecuados para desarrollar relaciones de cooperación entre los fenómenos que mejoran y fortalecen al conjunto como un todo.
- 9) *Usar soluciones lentas y pequeñas.* Los sistemas lentos y pequeños son más fáciles de mantener que los sistemas rápidos y grandes porque hacen un uso más adecuado de los recursos locales y producen resultados más sostenibles.
- 10) *Usar y valorar la diversidad.* La diversidad reduce la vulnerabilidad de las posibles amenazas y saca partido de la naturaleza única del ambiente en el que reside.
- 11) *Utilizar los bordes y valorar los elementos marginales.* La naturaleza tiene un mayor dinamismo en los bordes, ya que los interfaces entre aire, agua y tierra permiten constantes intercambios que facilitan la formación de condiciones propicias para el desarrollo y procreación de la vida.
- 12) *Usar y responder creativamente al cambio.* Se puede tener un impacto positivo en los cambios inevitables si observamos con atención e intervenimos en el momento justo.

Con estos 12 principios, Holmgren (2010) logra integrar las prácticas humanas con la naturaleza de manera resiliente, buscando responder al rápido crecimiento que se dio tras la Segunda Guerra Mundial, cuando se globalizaron los métodos agroindustriales por todo el planeta. Con la crisis del petróleo en la década de 1970, Mollinson y Holmgren criticaron la necesidad de crear nuevos sistemas agrí-

colas estables para frenar los procesos de envenenamiento de la tierra, del agua y del aire, la reducción drástica de la biodiversidad y la destrucción de toneladas de suelo que estos procesos agroindustriales ocasionan. Una década más tarde, en 1980, esta cosmovisión se expandió desde el diseño de sistemas agrícolas hasta un diseño más holístico y sostenible de los hábitats humanos. Gracias al esfuerzo colectivo de personas que se han enfocado en la puesta práctica de la permacultura se ha logrado revalorizar muchas prácticas y conceptos ancestrales de todo el mundo. En términos generales, el diseño de estos sistemas utiliza ideas de la Teoría de Sistemas, la biocibernética y la filosofía de la ecología profunda. Durante el proceso de diseño permacultural, la planificación, implementación y mantenimiento se enfocan tanto en la optimización del sistema para cubrir las necesidades actuales, como en la prevención de una productividad futura abierta a ser mejorada por las generaciones venideras.

En resumen, los procesos de diseño de la permacultura tienen el objetivo de integrar, de la mejor forma posible, nuestras necesidades socio-ecológicas, de tal modo que a largo plazo se pueda auto-regular y mantener dentro de un equilibrio dinámico mediante un número de interferencias muy reducido. Por eso la permacultura busca inspiración biomimética en los bosques, lagos y océanos, puesto que representan un meta-modelo a imitar para configurar nuevos marcos epistémicos de bioconocimiento. Un movimiento similar a la permacultura se dio en Nuevo México y California (EE.UU.) en la década de 1990, acuñado como “*bioneers*” (*biological pioneer*) por el emprendedor social, periodista y director de cine Kenny Ausubel, para describir el trabajo individual y grupal que busca soluciones creativas en los sistemas autorregulados de la naturaleza para emularlos y solucionar diversos problemas ambientales y socioculturales. Junto a su esposa Nina Simons, Ausubel fundó la ONG de *bioneers* para concientizar a la ciudadanía de que las soluciones a los problemas globales contemporáneos no están en la tecnología, sino en los modelos biológicos de interconectividad.

Conclusiones para caminar hacia el desarrollo regenerativo

Además de todas estas cosmovisiones, filosofías y campos de aplicación emergentes en las últimas décadas, los pensadores biomiméticos también han buscado en la naturaleza el meta-modelo idóneo que les permita solucionar la devastación ecosistémica que ocasiona el crecimiento económico descontrolado en el que nos hallamos inmersos como sociedad-mundo (Morin & Kern, 2005). Como bien advierte el analista medioambiental Lester Brown (2004, p. 20), “si no podemos estabilizar la población y el clima, no habrá un solo ecosistema del planeta que podamos salvar”. De ahí la urgencia en concebir al sistema socio-ecológico desde

el meta-modelo de pensamiento que la biomimética nos ofrece para enfrentar el cambio climático y evitar el desastre ecológico y civilizatorio (Leff, 2004). Como ya se ha explicado, el sistema económico globalizado ha reducido la capacidad biofísica de regeneración de los ecosistemas: empujándonos en dirección opuesta a los procesos coevolutivos de la vida.

Al comprender que ya se han superado los límites ecológicos regeneracionales, tenemos la oportunidad de reinterpretar la economía humana como un subsistema del sistema Tierra, donde es necesario crear bucles cerrados, como sucede en los arrecifes de corales y en los bosques de secuoyas y de nogales. Como explica Wilson (2003, p. 110), “un gran número de observaciones independientes de diferentes tipos de ecosistemas apuntan hacia la misma conclusión: cuantas más especies viven juntas, más estable y productivo es el ecosistema que componen”. Al hacer una revisión historiográfica de aquellos autores y pensadores que ya vislumbraron en la naturaleza el meta-modelo y el punto de partida a emular para lograr procesos socioeconómicos sostenibles y resilientes, encontramos infinidad de voces que están distribuidas por todos los rincones del mundo.

Además de los pueblos originarios y tribus de aborígenes e indígenas tradicionales, que lo defienden desde hace milenios, multitud de activistas y científicos han respaldado la idea de caminar más allá del desarrollo sostenible, y comenzar a construir el camino hacia un desarrollo regenerativo (Orr, 2002; Pauli, 2015; Wahl, 2016). Mientras que el concepto de desarrollo sostenible está enfocado en minimizar el impacto negativo de los humanos en el planeta, el desarrollo regenerativo está enfocado en maximizar el impacto positivo del ser humano en la Tierra. Este concepto biocéntrico establece un nuevo imaginario colectivo basado en lo que podemos aprender de la naturaleza, y no en lo que podemos extraerle.

En este sentido, la República del Ecuador es un país pionero a nivel mundial, ya que la *Constitución de Montecristi* del año 2008 de la República del Ecuador reconoció los Derechos de la Naturaleza y les estableció un nivel conceptual similar al de los Derechos Humanos. La Carta Magna del Ecuador es un claro ejemplo de diálogo de saberes, donde las epistemes de la ciencia moderna occidental se fusionaron con los conocimientos y saberes de los diferentes pueblos, etnias, culturas y naciones que configuran la complejidad de este país andino. Aquí se reconoció, de manera horizontal y transdisciplinar, que nuestro déficit espiritual es la causa principal que nos aboca al consumo desenfrenado de los recursos naturales de la Pachamama.

Sin duda, los conceptos de *economía azul* y *desarrollo regenerativo* que plantea el emprendedor Gunter Pauli (2015) resultan muy importantes para consolidar la biomimética como una ciencia compleja enfocada en restaurar los ecosistemas naturales. A diferencia de la biosfera, que tiende a la diversificación y se auto-eco-organiza como un sistema en equilibrio a escala planetaria, la globaliza-

ción económica promovida desde Occidente ha tendido hacia la homogenización agroindustrial: destruyendo todos los ecosistemas para adaptarlos a sus necesidades industriales. Este comportamiento humano de consumo y producción ha dejado una huella ecológica que ha provocado todo tipo de daños en nuestro planeta: devastación de los recursos naturales, extinción de la biodiversidad, desertificación, contaminación del agua y del aire, calentamiento global, deshielo glaciar, acidificación de los océanos, cambio climático, inseguridad alimentaria, guerras, pobreza multidimensional, etc. De ahí la urgente necesidad de superar el concepto de desarrollo sostenible creado por la tecno-ciencia y de crear estrategias de desarrollo regenerativo que potencialicen nuestro impacto positivo como un sistema socio-ecológico integral. Según expresa Pauli:

Las industrias basadas en la economía azul, altamente productivas y capaces de generar pleno empleo, están en el horizonte. Se inspiran en la manera en que la naturaleza hace uso de la física y la bioquímica para construir totalidades que funcionan armoniosamente, canalizando la abundancia, transformando sin esfuerzo y reciclando eficientemente sin desechos ni pérdidas de energía. Estas fuerzas no sólo determinaron los parámetros de la vida en la Tierra, sino que contribuyeron a moldear la vida misma. Al pasar de una percepción lineal a una concepción cíclica y regenerativa, también podemos remodelar nuestros comportamientos y prácticas para asegurar que se satisfagan las necesidades básicas de todos y que nuestro planeta azul, con todos sus habitantes, progrese hacia un futuro óptimo (Pauli, 2015, p. 35).

En armonía con el artículo 72 de la Constitución de 2008 del Ecuador⁴, que señala que la naturaleza tiene derecho a la restauración, la noción de *desarrollo regenerativo* nos brinda la posibilidad de “restaurar” los ecosistemas de nuestra Madre Tierra. Esta nueva forma de comprender y utilizar el ingenio, la economía y la simplicidad de la naturaleza nos ayuda a emular la ecoeficiencia intrínseca de la lógica ecosistémica y, en consecuencia, transformar de raíz de la matriz productiva que se sustenta en industrias globalizadas. Esta es la esencia de la economía azul: utilizar a la naturaleza como un modelo, una medida y un mentor que nos ayuda a superar la crisis multidimensional provocada por la lógica reduccionista del pensamiento monocultural, colonial y epistemicida de la ciencia moderna (Santos, 2010).

Desde el marco de las ciencias de la complejidad, la biomimética emerge como un meta-sistema de pensamiento que busca regenerar el sistema socio-ecológico mediante una relación más cooperativa y menos dominadora con la naturaleza. La “bioeconomía” respeta los límites de la biosfera para producir de forma sostenible sin sobrepasarlos. La “ecología industrial” recompone los ciclos cerrados de los materiales. La “química verde” procura crear procesos similares a la bio-

química de la naturaleza. La “ecoarquitectura” se encamina a construir edificios e infraestructuras que afecten mínimamente a los paisajes y ecosistemas. La “ecología urbana” integra convenientemente los pueblos y las ciudades en el entorno ecosistémico local que los rodea. La “biotecnología” procura ser ambientalmente compatible en la instauración de biomoléculas artificiales al guiarse por el proceder de la naturaleza. Los “agroecosistemas” rechazan los petroquímicos de la agricultura industrial actual para crear una agricultura que imita a los ecosistemas naturales. Todos estos principios socio-ecológicos derivados del meta-modelo biomimético representan una nueva forma de pensar el futuro de la humanidad en la Tierra, donde se busca dar prioridad a la salud de la ciudadanía mundial y de los ecosistemas naturales frente al desarrollo industrial que nos guía hacia el colapso civilizatorio.

Nuestra biosfera no tiene los recursos suficientes para que el modelo socioeconómico predominante en EE.UU., la Unión Europea o Japón pueda expandirse a todos los países del mundo: “si viviéramos el estilo de vida de un residente típico de EE.UU., necesitaríamos 3.9 planetas” (WWF, 2014, p. 36). Por eso el desarrollo regenerativo implica un desarrollo humano que respete los límites biofísicos establecidos por los ecosistemas naturales. Esto significa que debemos transformar la matriz productiva y no cometer el error de intentar cambiar algunas partes del sistema capitalista globalizado actual. La Revolución Biomimética representa el inicio de un cambio de época civilizatoria que nos urge a transformar de raíz los hábitos individuales y colectivos de acumulación capital y explotación medio ambiental, especialmente en los denominados países del Norte global (Collado, 2016).

Si no puede universalizarse el modelo socioeconómico de occidente a los países del Sur global, porque es un modelo insostenible, tampoco es justo que lo sigan manteniendo, ya que está dando lugar a una especie de “apartheid planetario”: donde “el 1% más rico de la población mundial acumula más riqueza que el 99% restante” (OXFAM, 2016, p. 2) y el 80% la ciudadanía mundial está excluida de los grandes avances y privilegios del bienestar social alcanzado por estos países que se han “sobredesarrollado” a costa de utilizar los recursos naturales del resto. Esto significa que, en términos generales, los países del Norte global deben decrecer cuantitativamente y enfocarse en el desarrollo cualitativo, para dejar que los países del Sur global puedan crecer y desarrollarse (Daly, 2014; Georgescu-Roegen, 2011; Martínez Alier, 2011; Max-Neef, 2006; Polanyi, 2001). En conclusión, se requieren estrategias de codesarrollo que pongan en marcha políticas equitativas de redistribución de los recursos naturales que nos acerquen a modelos de vida menos perjudiciales para el medio ambiente y que permitan un desarrollo humano digno para toda la humanidad, presente y futura.

NOTAS

¹ De acuerdo con los órganos sensoriales del ser humano, resulta inconcebible desplazarse del punto “A” al punto “B” sin pasar por todos los puntos intermedios que les separa.

² Todo fenómeno físico es comprendido por un encadenamiento continuo de causas y efectos.

³ Conociendo la velocidad y la posición de un objeto físico, podemos calcular sus posiciones y velocidades en cualquier momento del tiempo.

⁴ Según la Asamblea Nacional (2008), el artículo 72 señala: “La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tienen el Estado y las personas naturales o jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados. En los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración, y adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas”.

BIBLIOGRAFÍA

- ASAMBLEA NACIONAL (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Quito: Asamblea Nacional.
- BENYUS, J. (2012). *Biomímesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets editores.
- BERKES, F., & FOLKE, C. (1992). A systems perspective on the interrelations between natural, human-made and cultural capital. *Ecological Economics*, 5(1), 1-8.
- BROWN, L. (2004). *Plan B. Salvar el planeta: ecología para un mundo en peligro*. Barcelona: Paidós.
- COLLADO-RUANO, J. (2016). *Coevolución en la Gran Historia: una introducción transdisciplinaria y biomimética a los Objetivos de Desarrollo Sostenible* (Tesis Doctoral). Salvador: UFBA.
- COLLADO-RUANO, J. (2017). El Antropoceno en el contexto de la Gran Historia: consideraciones biomiméticas. *ILIA. Debates sobre investigación en Artes*. Guayaquil: UArtes Ediciones Ensayo, pp. 58-68.
- COLLADO-RUANO, J. (2018). Cosmodern Education: Emotional, Spiritual, and Ecological Literacy to Develop a Sustainable Mindset. In: *Developing Sustainability Mindset in Management Education*. New York: Greenleaf Publishing, pp. 133-157.
- DALY, H. (2014). *From Uneconomic Growth to a Steady-State Economy*. Northampton: EEPL.
- DUSSEL, E. (2006). *Ética de la liberación en la edad de la globalización y de la exclusión*. Madrid: Trotta.
- ERB, K.-H. (2012). How a socio-ecological metabolism approach can help to advance our understanding of changes in land-use intensity. *Ecological Economics*, 76(0), 8-14.
- GALLOPIN, G., GUTMAN, P., & MALETTA, H. (1989). Empobrecimiento Global, desarrollo sostenible y medio ambiente: un enfoque conceptual. *Revista Internacional de Ciencias Sociales*, 121, 403-428.
- GANDY, M. (2004). Rethinking urban metabolism: water, space and the modern city. *City: analysis of urban trends, culture, theory, policy, action*, 8(3), 363-379.
- GEORGESCU-ROEGER, N. (2011). *From Bioeconomics to Degrowth*. New York: Routledge.
- HOLMGREN, D. (2010). *Permaculture: Principles & Pathways beyond Sustainability*. London: Permanent Publications.
- HURRELL, J. (1970). Social organization and the environment: Aspects of contemporary social ethology. *Animal Behaviour*, 18, Part 2(0), 197-209.
- KAÏKA, M. (2003). Constructing Scarcity and Sensationalising Water Politics: 170 Days That Shook Athens. *Antipode*, 35, 919-954.
- LATOUR, B. (1993). *We have never been modern*. USA: Harvard University Press.
- LEAKEY, R., & LEWIN, R. (1996). *The Sixth Extinction: Biodiversity and Its Survival*. Nairobi: Phoenix Books.
- LEVIN, S. A. (1998). Ecosystems and the Biosphere as Complex Adaptive Systems. *Ecosystems*, 1(5), 431-436.
- LEFF, E. (2004). *Racionalidad Ambiental: la reapropiación social de la naturaleza*. México D.F.: siglo XXI.
- MADRID, C., CABELLO, V., & GIAMPIETRO, M. (2013). Water-Use Sustainability in Socioecological Systems: A Multiscale Integrated Approach. *BioScience*, 63(1), 14-24.

- MALTHUS, T. (1926). *An essay on the Principle of Population*. Londres: John Murray.
- MARGULIS, L. (2002). *Planeta simbiótico. Un nuevo punto de vista sobre la evolución*. Madrid: Debate.
- MARGULIS, L. & LOVELOCK, J. (1989). «Gaia and Geognosy». *Global Ecology: towards a science of the biosphere*, 1-29.
- MARTÍNEZ ALIER, J. (2011). *El ecologismo de los pobres. Conflictos ambientales y lenguajes de valoración*. Barcelona: Icaria.
- MATURANA, H., & VARELA, F. (2011). *A Árvore do Conhecimento. As bases biológicas da compreensão humana*. São Paulo: Palas Athena.
- MAX NEEF, M. (1986). *La economía descalza. Señales desde el mundo invisible*. Buenos Aires: Nordan.
- MAX NEEF, M. (2006). *Desarrollo a Escala Humana*. Barcelona: Icaria.
- MORIN, E. (1995). La relación átropo-bio-cósmica. *Gazeta de Antropologia*, 11.
- MORIN, E. (1996). El pensamiento ecologizado. *Gazeta de Antropologia*, 12.
- MORIN, E. (2005). *Ciência com Consciência*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- MORIN, E. (2008). *Introdução ao Pensamento Complexo*. Lisboa: Instituto Piaget.
- MORIN, E., y Kern, A. (2005). *Tierra-Patria*. Barcelona: Kairós.
- MUNNÉ, F. (2004). El retorno de la complejidad y la nueva imagen del ser humano: Hacia una psicología compleja. *Revista Interamericana de Psicología/Interamerican Journal of Psychology*, 38(1), 23-31.
- NICOLESCU, B. (2008). *O Manifesto da Transdisciplinaridade*. São Paulo: TRIOM.
- NORGAARD, R. (1984). Coevolutionary development potential. *Land economics*, 60(2), 160-173.
- NORGAARD, R. (1987). Economics as mechanics and the demise of biological diversity. *Ecological Economics*, 38(1-2), 107-121.
- ODUM, E. (1997). *Ecology: A Bridge between Science and Society*. USA: Sinauer Associates Incorporated.
- ODUM, H. (1971). *Environment, Power, and Society for the Twenty-First Century: The Hierarchy of Energy*. USA: Columbia University Press.
- ORR, D. (2002). *The Nature of Desing. Ecology, culture, and human intention*. Oxford: Oxford University Press.
- OXFAM (2016). *Una economía al servicio del 1%. Acabar con los privilegios y la concentración de poder para frenar la desigualdad extrema*. Informe no 210 de OXFAM, 18 enero 2016.
- PAUL, P. (2009). *Formação do sujeito e transdisciplinaridade: história de vida profissional e imaginal*. São Paulo: TRIOM.
- PAULI, G. (2015). *La Economía Azul. 10 años, 100 innovaciones, 100 millones de empleos*. Barcelona: Tusquets Editores.
- POLANYI, K. (2001). *The Great Transformation. The Political and Economic Origins of Our Time*. Boston: Beacon Press.
- PRIGOGINE, I., & STENGERS, I. (1984). *Order out of chaos*. London: Heinemann.
- PUJANTELL-ALBÓS, J. (2012). *Les manifestacions del canvi global en àrees de muntanya mediterrània: Un cas d'estudi al Baix Montseny*. (Tesis de Ph.D.). Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- RIECHMANN, J. (2014). *Un buen encaje en los ecosistemas. Segunda edición (revisada) de Biomímesis*. Madrid: Ed. Catarata.

- SANTOS, B. (2010). *Descolonizar el saber, reinventar el poder*. Montevideo: Trilce.
- SCHNEIDER, E. D., & Kay, J. J. (1994). Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. *Mathematical and Computer Modelling*, 19(6–8), 25-48.
- SCHRÖDINGER, E. (1944). *¿Qué es la vida?* Salamanca: Universidad de Salamanca.
- STEFFEN, W., CRUTZEN, P., MCNEILL, J. (2007). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36 (8): 614-621.
- STEVENS, P. (2012). Towards an Ecosociology. *Sociology*, 46(4), 579-595.
- TOLEDO, V. (2008). Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, 7. Recuperado de <http://www.raco.cat/index.php/Revibec/article/view/87196>.
- ULANOWICZ, R., & HANNON, B. M. (1987). Life and the Production of Entropy. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 232(1267), 181-192.
- WACKERNAGEL, M., Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers.
- WAHL, D. C. (2016). *Designing Regenerative Cultures*. Axminster: Triarchy Press.
- WHITESIDE, K. (2002). *Diveded Natures: French Contributions to Political Ecology*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- WILSON, E. (1998). *Consilience. The Unity of Knowledge*. New York: Random House.
- WILSON, E. (2003). *The Future of Life*. London: Abacus.
- WORLD WILDLIFE FUND (WWF). (2014). Living Planet Report 2014. *Species and Spaces, People and Places*.

Biomimética de las plantas o cómo nos inspira el reino vegetal

Gustavo Vargas-Silva
Angelo State University (ASU)

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

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

colas lejanas, por ejemplo en Europa.



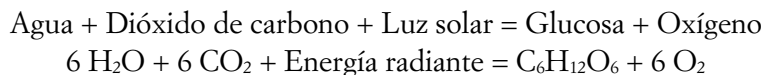
Figura 1. Lagos de Yahuarcaca en el noroeste de Leticia (Colombia). Foto: G. Vargas.

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

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

Relaciones entre el mundo vegetal y el humano

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



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

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

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

Vegetales como alimento

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

«Bebercio» y comercio

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

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

Vestidos vegetales

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



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

Materiales de construcción a partir de las plantas

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

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

Papel, escritura e imprenta

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

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

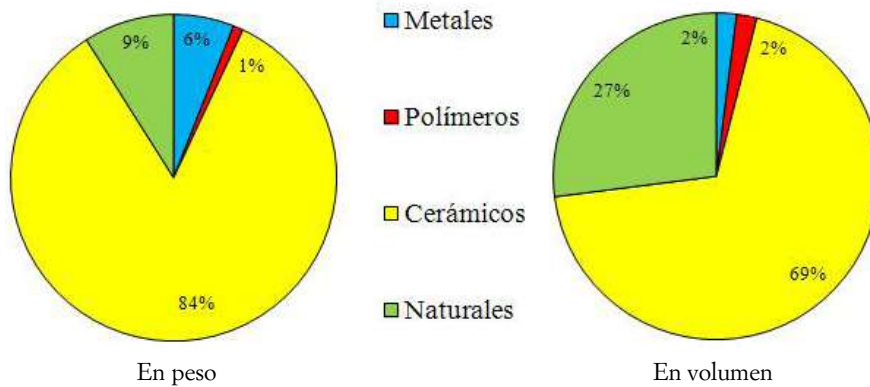


Figura 3. Consumo anual de materiales por la familia (Ashby, 2012).

Las plantas en el transporte

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

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



Trabajo artesanal



Embarcación tradicional

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

Energía vegetal

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

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

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

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

Vegetales como puentes con lo sagrado

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

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

Colorantes y tintes vegetales

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

Valor estético de los vegetales

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

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

Perfumes y plantas

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

Jardines

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

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

Cultura = Cultivo

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

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

Lecciones biomiméticas de las plantas y los árboles

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

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

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

Diseño centrado en la vida

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

Niveles biomiméticos de analogía

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

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

Copia directa

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

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



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

Inspiración

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

bilidad (Vogel, 2000).

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

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

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

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

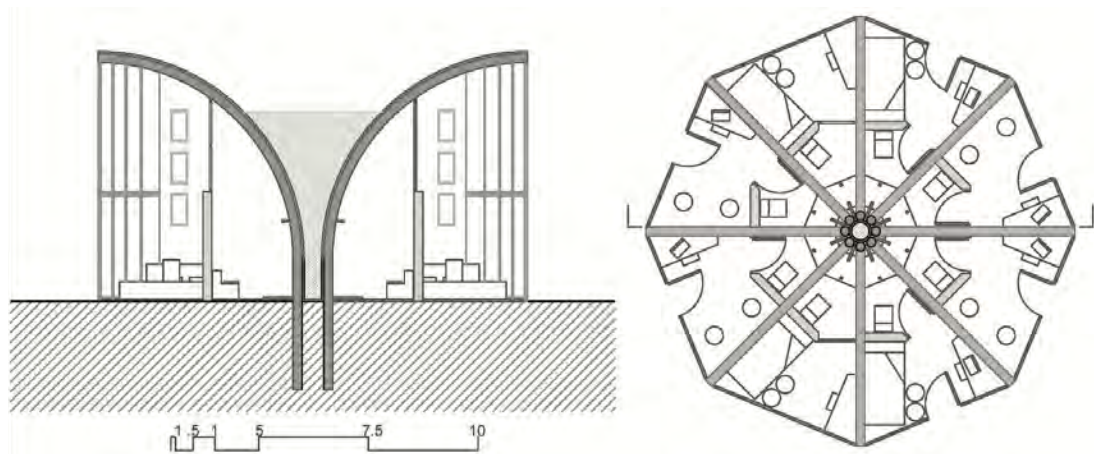


Figura 6. Sistema prefabricado para la construcción de viviendas provisionales de bajo coste.

Abstracción

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

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



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

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

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



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

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

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

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



(a)

(b)

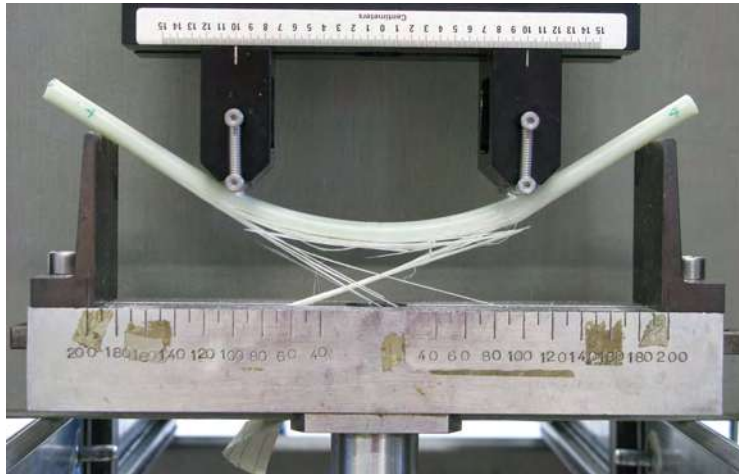


Figura 9. Fractura en tallo verde. (a) De ramas, (b) De barras pultruidas de plástico reforzado Fotos: G. Vargas.

Cierre

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

La isla era un paraíso

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

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

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

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

Soluciones colectivas

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

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

El primer biomimético latinoamericano

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

BIBLIOGRAFÍA

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

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

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

Imaginarios sobre ecología y tecnociencia. El trasfondo epistemológico de la Biomimesis

Carlos Hugo Sierra

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
European Society for History of Science (ESHS)

Si ejecución de sueños ancestrales es poder volar con los pájaros y navegar con los peces, penetrar como la broca en los cuerpos de montañas gigantes, enviar mensajes a velocidades divinas, divisar lo invisible y percibir lo remoto, oír hablar a los muertos, anegarse en salutíferos sueños milagrosos, ver con ojos vivos el aspecto que tendremos veinte años después de muertos, descubrir en noches resplandecientes mil cosas de encima y de abajo de este mundo que antes nadie conocía; si luz, calor, fuerza, placer, comodidad son los sueños primordiales del hombre, en tal caso las investigaciones actuales no solamente son ciencia, sino también una magia, un rito de poderosísima fuerza sentimental e intelectual que induce a Dios a doblar el uno sobre el otro los pliegues de su manto, una religión cuya dogmática está regida y basada en la dura y valiente lógica de la matemática, aguda y desbocada como la hoja de un cuchillo.

Rober Musil. *El hombre sin atributos* (Cap. 11, fragmento)

El filósofo y secretario perpetuo de la Academia de Ciencias de Francia, Bernard le Bouvier de Fontenelle (1657-1757), manifestaba hace ya más de trescientos treinta años en una de sus obras más destacadas y exitosas, *Conversaciones sobre la Pluralidad de los Mundos*¹, que la naturaleza se asemejaba a un soberbio espectáculo operístico. El público asistente, cuando no está discretamente concentrado en pasar revista a quienes ocupan las butacas contiguas, presta toda su atención a la propia acción escénica, a los fastuosos decorados, al virtuosismo de los cánticos corales o el lucimiento vocal del solista, a la intensidad dramática o a los insospechados vericuetos de la trama argumental, pero, sobre todo, no es consciente de la compleja maquinaria que se oculta tras el telón. Se encuentra allí para disfrutar de un acto memorable que embelese sus sentidos.

Al respecto, yo me figuro siempre que la naturaleza es un gran espectáculo que se parece al de la ópera. Desde donde estáis, en la ópera, de hecho no veis el teatro como es. Se han dispuesto los decorados y las máquinas para producir un efecto

agradable desde lejos, y se ocultan a nuestra vista todas las ruedas y contrapesos que causan los movimientos. Tampoco os preocupáis demasiado en adivinar cómo funciona todo esto. Quizá no hay más que algún maquinista, oculto en el patio de butacas, que se preocupa por un vuelo que le habrá parecido extraordinario, y que quiere desentrañar totalmente cómo ha sido ejecutado. Observaréis fácilmente que este maquinista es bastante parecido a los filósofos. Pero lo que aumenta la dificultad, respecto a éstos, es que, en las máquinas que la naturaleza presenta a nuestros ojos, las cuerdas están perfectamente ocultas, tan bien que se ha tardado largo tiempo en adivinar lo que causaba los movimientos del universo².

La analogía ideada por Fontenelle representa, sin ningún atisbo de duda, uno de los ejemplos más esplendentes de la insólita mirada sobre la naturaleza que iba a determinar el curso y los cimientos de la cosmovisión moderna occidental³. Ante el incipiente régimen de transparencias y opacidades que pugna por despuntar y ordenar el mundo mediante el ímpetu irrefrenable de la abstracción mecánico-matemática de la realidad (esa prodigiosa y escurridiza gramática oculta tras los velos físicos del universo advertida por Galileo Galilei)⁴, no vale ya una mirada profana e inexperta. Hace falta un lector diestro e instruido para interpretar convenientemente el lenguaje universal con el que se elabora el gran *libre du monde*. La ciencia seguirá a rajatabla, en adelante, una lógica de desvelamiento, una predisposición a reconocer la regularidad trascendente bajo las superficies mudables de lo aparente, un anhelo de ir más allá, hasta los más lejanos entresijos de la realidad, que no ha abandonado nunca desde entonces. Con todo, esta audaz empresa exploratoria conllevaba, a su vez, la erección de un modelo arquetípico del cosmos sumamente restrictivo, que respondía a las exigencias de traducción lógica y de control técnico de lo real, pero desterraba al mismo tiempo, en una confusión crucial denunciada por autores como S. Toulmin (2001), P. Feyerabend (2013), R. T. Tarnas (2016) o L. Mumford (2016)⁵, todo aquello de la vida que no era susceptible de mensuración. Desde este punto de vista, la biomimesis, como síntoma postrero de ciertas decantaciones de alta sofisticación operativa a las que se entrega la tecno-ciencia de vanguardia, ha retomado con abierto e inusitado entusiasmo este imaginario de la opacidad natural. Las espectaculares formas en las que se muestra la naturaleza bajo los parámetros de abstracción ingenieril permiten reivindicar este distintivo modo de captar, a diferentes escalas de apreciación, la diversidad de lo viviente. De lo que se trata aquí es de lograr erradicar los defectos de refracción óptica o de distorsión perceptiva⁶ que tradicionalmente ha acompañado nuestra forma de interpretar la vida. Ahora bien, el enfoque biomimético no sólo se explica en el propósito de “revelar” una vertiente genuina de la actividad natural que ha quedado ignorada hasta el presente, sino también en la pretensión de viabilizar instrumentalmente una propiedad orgánica característica (ya sea morfológica o funcional) que posibilite, en última instancia, la sosteni-

bilidad o una relación de equilibrio del *ordo naturalis* dentro del macro-sistema antropogénico. Como cabe barruntar de lo anterior, el dominio representacional y el propiamente tecnológico convergen en un proceso constante de retroalimentación, ya que únicamente a través de la manipulación operativa de la realidad a escalas hasta hace muy poco inconcebibles ha sido posible acceder al umbral perceptivo sobre el que se fundamenta la biomimesis. Sólo en virtud del modelo de abstracción funcional de la vida basada en la eficacia se hizo viable la síntesis tecnológica de sistemas no biológicos. Y como resultado de ello, la biomimesis ha tenido que abandonar las metáforas nucleares del teatro o de la biblioteca del mundo para abrazar la figura analógica más apropiada de la máquina o del laboratorio de ingeniería.

La naturaleza ama ocultarse⁷. La biomimesis: una vindicación de la transparencia

Si por algún rasgo distintivo ha de reconocerse el concepto de biomimesis es por el hecho de hacer referencia a una estrategia aplicada de creación en el campo del diseño cuyo especial interés está centrado en el modo en que la vida, de acuerdo a los procesos evolutivos que le otorgan continuidad en el tiempo, es capaz de conformar sistemas complejos con un alto nivel de eficacia. Entendido desde este punto de vista y atendiendo el recorrido histórico y semasiológico de este concepto (que deviene de la conjunción de dos términos centrales, aunque no del todo unívocos, pertenecientes a la cultura arcaica y clásica griega, esto es, *bios*, vida, y *mimesis*, imitación)⁸, se trataría, en principio, de un enfoque que se gesta a la sombra de los trepidantes procesos de desarrollo tecno-científico a los que estamos asistiendo en los últimos años. Es cierto que, al menos bajo una perspectiva epistemológica, no nos es posible identificar un modelo unitario, preciso, coherente y claramente reconocible que remita a una manera inconfundible de aproximarse a la realidad natural estrictamente biomimética. Tan es así, que en los últimos tiempos se ha comenzado a constatar, por parte de algunos expertos y estudiosos del asunto (V. Blok & B. Gremmen, 2016), la heterogeneidad congénita de este enfoque al demostrar una profunda divergencia, en el plano epistemológico, ético y axiológico, entre lo que podría considerarse como una propuesta “fuerte” y “débil” de biomimesis⁹. Ciertas vertientes todavía más críticas (A. Marshall & S. Lozeva, 2009), que cuestionan la inevitable avenencia del enfoque biomimético con la sostenibilidad, defienden, con base en los planteamientos de la tecnología alternativa y de la ecología profunda, una perspectiva “ecomimética” alejada de cualquier atisbo tecnocéntrico¹⁰. O, incluso, se propone ya con ciertos visos de verosimilitud aunque no sin cierto poso sarcástico, emprender la senda contraria

y, en consecuencia, extender los beneficios instrumentales del avance tecnológico, en una especie de “biomimesis recíproca”, no sólo al hombre y sus enrevesadas circunstancias, sino también a otros organismos (Jonathon Keats, 2017)¹⁰. Sea como fuere, digamos que, en términos generales, con esta noción (o “meme”¹², según lo expresado por Janine Benyus, su divulgadora más destacada)¹³ se trata de esbozar una empresa de reformulación o re-pensamiento de la imagen o percepción preeminente de la naturaleza, cuyas raíces han vertebrado la historia de la tradición científica occidental, a fin de que la conceptualización del universo orgánico resultante sea cognitivamente adecuada para el buen desarrollo de alternativas de innovación tecnológica.

Visto así, la biomimesis se impone como tarea clave impugnar la autoridad infalible de la imagen mecánica del mundo que se extiende, como si de un axioma intocable se tratase, desde el periodo de la ilustración hasta alcanzar la modernidad más inmediata con la inquietante interpretación de un orden natural sometido a las fuerzas irrefrenables de la competencia y a un instinto creciente de dominación. Aun cuando esta pretensión pueda no estar del todo desencaminada en su diagnóstico, el creer vislumbrar vías de escape en la reordenación física de lo biológico, circunstancia que tiene su punto de arranque en el siglo XIX¹⁴, nos devuelve, una vez más, a las antiguas aspiraciones del programa baconiano en torno a la utilización absoluta del mundo terrenal¹⁵.

En este sentido, la biomimesis da una última vuelta de tuerca a los dominios empíricos que “emergen” (siguiendo el vocablo de L. Daston -*Entstehung*- y los demás artífices de la nueva epistemología histórica)¹⁶ en virtud de la fuerza irresistible de abstracción que va a transformar el mundo natural, fundamentalmente en estos últimos doscientos años, para dar lugar a las nuevas categorías y leyes estructurales que fundan el saber biológico. La mirada biomimética se encuentra, de este modo, entrenada y preparada para vislumbrar, de forma depurada, aquel campo positivo atravesado de inéditas funcionalidades y estructuras vinculadas que “muestran” la organización interna de los seres vivos. No parece aventurado afirmar, por lo tanto, que la biomimesis, lejos de acaecer como una extrañeza incidental en el devenir epistémico occidental, obtiene su fundamentación en los cuadros cognoscitivos que vienen a alumbrar el nacimiento de la biología moderna (allá por el siglo XIX)¹⁷. De hecho, la biomimesis retoma y abunda en aquella ininterrumpida tradición del conocimiento occidental que ha perseguido (y aún sigue haciéndolo) la construcción definitiva de un armazón cognitivo en torno a la escurridiza complejidad orgánica con base en ciertos criterios de clasificación o de ordenamiento morfológico-funcional. Desde Aristóteles o A. Cesalpino, pasando por C. Linneo, Jean Baptiste de Lamarck, hasta llegar a Arthur Cronquist, Willi Hennig o Norman I. Platnick, el enfoque biomimético supone una secuela postmoderna de esta tendencia al alumbrar y poner sobre la mesa una propuesta

de categorización taxonómica propia de patrones y reglas específicas de comportamiento natural que se identifican, en este caso concreto, como principios esenciales de la vida: adaptación a condiciones cambiantes, armonización con el entorno, uso de una química respetuosa con la vida, eficiencia con los recursos, integración de desarrollo y crecimiento, evolución para la sobrevivencia¹⁸. Con independencia de la validez explicativa de esta clasificación, lo que parece cierto es que su contundencia persuasiva obedece a un imaginario implícito sobre la naturaleza, en tanto que *spatium experimentalis*, desde el que se interpreta, bajo los parámetros de un auténtico laboratorio de I+D, el principio transformista (pilar central de la teoría evolucionista) por el que se produce un tránsito morfológico y funcional a partir de un diseño no intencionado e inmanente¹⁹.

Pero eso no es todo. Nos atreveríamos a afirmar que la perspectiva biomimética parte de este patrimonio analítico histórico para ir incluso más allá en la empresa clásica de abstracción de lo viviente (aproximación reductiva), en la medida en que su objetivo fundamental estriba en lograr la prevalencia identificativa y la maniobrabilidad operativa (aproximación constructiva), a través de la ingeniería de lo orgánico, sobre ciertas características atribuidas a una función particular de un sistema biológico. Con ello la posibilidad fáctica de traducir, en diferentes escalas, la complejidad de lo vivo a una serie de principios ajustables a un diseño tecnológico correspondiente permite obtener información relevante en torno a su específica articulación como estructura-función y de su modo de interactuar con el entorno.

En consecuencia, si se asume como pretensión fundamental la realizabilidad tecnológica del correlato vital (en los términos fijados por H. Radder, 2012)²⁰, la biomimesis debe, como *conditio sine qua non*, ahondar en los vínculos de mediación cognitiva con el mundo de lo viviente y transformarlos a través de una recomposición de los cuadros de abstracción. No hay, pues, inmediatez. La aproximación biomimética descansa sobre lo biológicamente posible sin que, por ello, logre apresar lo irreductible y singular del acontecimiento vital²¹. En su búsqueda de un marco de inteligibilidad para la naturaleza, bascula entre la experiencia que se regula normativamente y la meta-abstracción o la abstracción de segundo orden que se anuncia desde lo post-biológico²².

Coincidiendo con el definitivo acomodo, tras los múltiples intentos y resistencias que atraviesan la historia de la ciencia moderna, de la complejidad asociada con la materia viviente en sus diferentes escalas a los modelos de la física contemporánea²³, la biomimesis, desde sus primeras formulaciones allá por los años cincuenta y sesenta, ha dedicado todos sus esfuerzos en lograr diseñar, mediante una estrategia de abstracción selectiva, un modelo particular, factible y esencialmente tecnológico de la naturaleza con el objeto de facilitar los procesos de traducibilidad instrumental hacia la esfera material humana. Con ello se trata de garantizar un tránsito

lógico, mediante los avances tecnológicos potenciales de la ingeniería inversa, que vaya desde las funciones o características funcionales de los seres vivos a los sistemas sintéticos no-naturales. El argumento de fondo que subyace a esta tesis es que resulta factible y deseable replicar las propiedades de los organismos vivos, recrear las condiciones de procesamiento que son empleadas por la naturaleza para traducirlas, transferirlas y aplicarlas a las tecnologías de síntesis *in vitro*. Hay por tanto, una convicción de que la ciencia puede establecer una continuidad entre lo orgánico y lo no orgánico mediante un re-pensamiento de la naturaleza desde una óptica ingenieril. Es así, y no de otro modo, como puede entenderse que sea en el campo de la bioingeniería donde aparece por vez primera la concepción de biomimesis, ideada por el biofísico Otto Herbert Schmitt²⁴ en 1960, y desarrollada más explícitamente en el diccionario Merriam-Webster en 1970:

El estudio de la formación, de la estructura o de la función de sustancias y materiales biológicamente producidas y procesos y mecanismos biológicos (como síntesis de proteínas o fotosíntesis) especialmente para el propósito de sintetizar productos similares por mecanismos artificiales.

Es evidente que este principio operativo se ha mantenido inalterable e indiscutido durante las siguientes décadas, incluso cuando Janine M. Benyus, a través de su conocido libro *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*²⁵, difunde, populariza y amplía la carga semántica del término incluyendo, además, la dimensión ambientalista bajo la inspiración directa de los planteamientos del ecólogo y taxónomo Henry Allan Gleason²⁶ y el geobotánico Frederic Edward Clements²⁷. La interpretación que se sigue de lo anterior es clara: la propia modelización instrumental de la naturaleza para producir nuevas estructuras y procesos también puede servir para combatir impactos medioambientales negativos (a través de la reducción de la brecha metabólica entre la tecno-esfera y la biosfera).

De esta forma, el inventario sistemático elaborado por el conocimiento biomimético ordena la fenomenología natural en torno a unas leyes, a unos patrones de comportamiento, a una especie de taxonomía funcional, que sirve de base para orientar la capacidad adaptativa del proceso tecnológico. Yendo un poco más allá en nuestro análisis, cabe afirmar que la biomimesis ve con buenos ojos recurrir a los esquemas interpretativos que subyacen tras la sensacional potencia operativa de la tecnología moderna para disipar la negatividad, conjurar los misterios ocultos de la naturaleza, y exponer la vida al dominio de la transparencia²⁸. Con ello, la naturaleza dejaría de ser una alteridad, una extrañeza que nos distancia y nos determina, para pasar a convertirse en una realidad diáfana y cristalina, como un calmo océano de aguas transparentes, abierto a las pretensiones heurísticas y transformadoras de la tecno-ciencia contemporánea.

El placer de la exactitud especular. Las bases cognitivas de la mimesis

La puesta en escena (*mise-en-scène*) del enfoque contemporáneo de la biomimesis nos da algunas pistas significativas para poder constatar que, desde un punto de vista gnoseológico, tiende a reproducir las viejas y recurrentes aspiraciones de un modelo cognoscitivo especular. La deliberada remisión al concepto de *mimesis*, responde, en mi opinión, a la finalidad de afianzar la convicción de una supuesta correspondencia más profunda entre la naturaleza (en su elemental desnudez empírica) y los marcos de aprehensión teórico-conceptual trazados desde la exploración biomimética. Bajo la apariencia de hallarse ante un vigoroso intento de reconsideración radical del paradigma imperante, lo que se lleva a cabo, en el fondo, es una profundización en los postulados elementales del realismo naturalista, especialmente bajo la presunción de un acceso intelectual no mediado y objetivo, para subrayar el carácter distintivo y privilegiado de su modo de entender el orden de lo viviente²⁹.

El diseño tecnológico, bajo las premisas biomiméticas, se convierte en la contraparte de referencia en virtud de la cual cabe verificar la tesis del empirismo esencialista que propugna la coincidencia de intelecto y realidad (*adaequatio intellectus et rei*)³⁰. Al establecerse una correspondencia en términos ontológicos entre la tecnología y el mundo, se nos muestra un campo de la experiencia auto-evidente y ajena a las propias coordenadas epistemológicas (y también sociopolíticas) sobre las que se ha construido. Se hace evidente aquí el problema de la superación de la discontinuidad ontológica entre lo tecnológico y la naturaleza a través de la modelización de ésta desde la normativización de pautas que expresan el comportamiento de la vida (auto-organización, adaptación, emergencia y resiliencia). Con ello se deja a un lado la complejidad de los mecanismos cognitivos movilizados en los procesos de “imitación” de los seres vivos y de los ecosistemas.

Ahora bien, el punto de interés aquí estriba en la peculiar connotación que adquiere el término dentro de un contexto de progresiva centralidad de la racionalidad tecno-económica ante la posibilidad factible de sintetizar tecnológicamente los correlatos del mundo natural. Ciertamente, el rápido aumento de las capacidades de ingenierización de la realidad física genera el caldo de cultivo propicio para extender un imaginario en torno a la *aemulatio* y a la posibilidad de traslación orientada de ciertos principios de actividad funcional natural. Desde este punto de vista, la relación con el referente natural se ajusta a una organización racional, a una estructura de modelización abstracta, a una “economimesis” (J. Derrida, 1975)³¹ específica, si se nos permite el término, que se encubre bajo la iluminación de lo “realmente constitutivo”. La opacidad que paradójicamente subyace tras el acto de “desvelamiento objetivo” se convierte en el almacén metafísico para el real abordaje operativo del mundo natural. Con esta operación se oculta una re-

lación asimétrica con el referente natural. En la mirada adiestrada del especialista que asume de buen grado los postulados cognoscitivos del enfoque biomimético subyacen ciertas operaciones de selección, de enfatización y de control con los que se consigue ajustar aquellas características más relevantes de un fenómeno orgánico y los propósitos pre-determinados en las diversas tareas de desarrollo y aplicación tecnológica. Siendo así, el “descubrimiento” de una peculiaridad insólita de la naturaleza tiene lugar dentro de un régimen perceptivo concreto de visibilidades e invisibilidades y de acuerdo a un direccionamiento gnoseológico intencional y discriminativo.

En este juego de luces y sombras puesto en marcha desde las estrategias de modelización biomimética, toda información significativa del entorno natural que queda desvelada entraña, a su vez, la existencia de otras propiedades sumidas en la opacidad gnoseológica. La idea aquí de que el diseño tecnológico puede constituir un espejo del acontecer natural puede entenderse como una aberración óptica, en la medida en que lo hay detrás es un proceso de sujeción instrumental a partir de la abstracción espacio-temporal de las características de los organismos. Visto de esta manera, la bioinspiración mimética (oxímoron en sí mismo) pasa a resolverse como una síntesis selectiva, es decir, como una re-interpretación y re-contextualización de lo natural. El problema que se suscita en todo esto es persistir en la creencia de que la naturaleza se muestra tal como es y no bajo los parámetros funcionales de diseño tecno-científico. Valga el ejemplo planteado por J. S. Turner y R. C. Soar (2008) acerca del supuesto funcionamiento termorregulador de los termiteros³². La construcción del edificio *Eastgate Centre* (en Harare, Zimbabwe) se basó en las apreciaciones del arquitecto Mick Pearce sobre las prácticas de regulación térmica y ventilación llevadas a cabo por las termitas africanas (*Macrotermes michaelseni*). Por aquel entonces (entre 1993 y 1996), se consideraba que el sistema de climatización de los termiteros atendía a la combinación de dos efectos bien conocidos: el efecto sifón y el efecto chimenea (flujo inducido)³³. Sin embargo, las investigaciones recientes han venido a descartar el flujo inducido como fenómeno físico aprovechado por estos insectos neópteros para su estrategia de mantenimiento de la temperatura. Por el contrario, se ha concluido que el sistema se ajusta a los parámetros de una ventilación pulmonar. Pues bien, este interesante hallazgo, que puede no incidir substancialmente en la preservación de la eficacia y del principio de sostenibilidad en el diseño arquitectónico, es crucial, sin embargo, en términos epistemológicos. O se ha cometido un fallo de entendimiento, esto es, un error en la captación de lo que nos comunica genuinamente la naturaleza o, por el contrario, se ha producido una orientación diferente en la estrategia de modelización sobre la misma.

Esta problemática en la forma de proceder cognitivamente de la biomimesis, centrada en el ideal de la objetividad mecánica³⁴, se encuentra presente también

en el objeto epistémico resultante. Y es que, más allá de la evocadora imagen de la naturaleza que apuntala la perspectiva biomimética, encontramos una proyección representacional que, además de silenciar y poner en suspenso la compleja trama sociopolítica que condiciona la redistribución de los límites y espacios de sentido, fortalece una toma de posición proclive al mononaturalismo³⁵. Digámoslo con claridad. La concepción de la naturaleza auspiciada desde la biomimesis, pese a que aspira a tal propósito, no tiene un alcance universal. Subyace en ella un régimen ordenador de lo vivo que se ha ido estabilizando históricamente en el horizonte cognitivo de la epistemología occidental. En tal sentido, resulta de gran interés acudir a la antropología comparada (P. Descola, Gísli Pálsson, E. Viveiros de Castro, etc.)³⁶ para tomar conciencia de que las culturas no occidentales no han contado con esta idea en sus narrativas cosmológicas. Dicho de otra manera, la naturaleza no ha sido objeto de su pre-ocupación ya que no ha formado parte del contenido simbólico o del horizonte experiencial de sus tradiciones sapienciales. Del mismo modo, resulta conveniente hacer un repaso a vuelapluma del recorrido histórico transitado por las denominadas ciencias humanas, y especialmente por la etnología, a través de sus diferentes perspectivas teóricas (y aquí cabe aludir, por citar únicamente los clásicos, los trabajos de G. Tarde, D. Sperber, J. G. Frazer, F. Boas, E. Durkheim o M. Mauss) para no pasar por alto el hecho evidente de que la imitación en los contextos socioculturales no occidentales (llámese como se quiera: reflejo automático, magia simpática, homocromía, camuflaje, simulacro, vector de asimilación, psicastenía, figuración analógica...) presenta mecanismos cognitivos y aspectos semánticos, representacionales y simbólicos muy diversos, en extremo complejos y en gran medida distantes de los patrones conceptuales que predominan en la biomimesis.

Es razonable, pues, pensar que la mayúscula transformación conceptual que se anuncia bajo el enfoque biomimético no pasa de ser un eficiente corrimiento interno, un desplazamiento semiótico que no pone en peligro los *a priori* epistémicos occidentales. Y con ello las esporádicas alusiones a los conocimientos tradicionales nativos que se reflejan en la literatura académica centrada en la disciplina biomimética, consideradas aquí como elementos que legitiman una cultura ambiental emergente, acaban integrándose en una lógica implícita de traducción y ajuste a las coordenadas discursivas de la tecno-ciencia moderna. En otras palabras, la eficacia retórica en el mensaje de la propuesta biomimética tiene que ver, en parte, con una reorganización inter-discursiva y una re-significación de la estructura perceptivo-conceptual de la praxis ambiental indígena en los términos fijados por los esquemas epistémicos comprensibles desde occidente³⁷.

No estaremos muy desencaminados si se entiende que la apertura tecnológica de un canal de intercambio entre lo humano y lo no-humano, como resultado de la capacidad de producir una copia o réplica a escala humana de la diversidad

viviente, abre un horizonte inimaginable de posibilidades en el direccionamiento y la estabilidad funcional de la naturaleza. Pero no sólo eso. El acceso, a partir de una lógica perceptiva de transparencia y neutralidad, a la secreta intimidad de lo viviente consolida también un imaginario asociado a lo que Jacques Derrida denominada como “metafórica de la proximidad”³⁸. Contraídas las distancias a través de la puesta en suspenso de cualquier mediación conceptual, siguiendo las presunciones del realismo objetivista, se tiene la impresión de poseer un contacto más íntimo y estrecho con el orden natural. Ciertamente, este abordaje concreto de la realidad natural no sólo atiende a motivaciones epistemológicas, sino que en él cabe vislumbrar un entramado retórico encubierto que despacha los retos de legitimación de la innovación biomimética gracias a la transferencia o apropiación de un imaginario concreto acerca de la naturaleza. De esta forma, se trataría de establecer un nexo gnoseológico reconocible, una equivalencia funcional entre el modo de hacer de lo natural y su contraparte tecnológica para vindicar la existencia de valores o principios socialmente reconocidos del ecosistema natural en el propio artefacto tecnológico. Dicho con otras palabras, la praxis biomimética permite acoger y conservar una impronta natural en la aplicación tecnológica, “biologiza”, por así decirlo, la innovación artificial porque, bajo esta perspectiva, siguen principios de actuación idénticos.

En ese sentido, no deja de resultar ciertamente llamativo que esta re-interpretación del orden natural venga precedida o se gesticione como consecuencia de una reubicación “novedosa” de los ejes perceptivos. Siendo así, la propuesta biomimética viene a hacer suya la atribución característica de desvanecer aquellas distorsiones ópticas que el paradigma racional de la ciencia moderna había generado en su particular modo de contemplar la naturaleza. Esta mirada renovada con la que se “descubre” la naturaleza parte de la asunción de una actitud intelectual, representada por la *mimesis*, que paradójicamente ha sido central en el desarrollo de la historia epistemológica de occidente. Tan es así que es posible hablar de una lógica mimética (o *mimetología*, según lo planteado por B. Sandywell)³⁹ como la fórmula de aprehensión teórica (bajo el significado antiguo que vincula el término *theorein* al concepto de *contemplatio*) prototípica que ha estructurado la experiencia epistémica occidental⁴⁰. A pesar de ciertos matices, el discurso de fondo que subyace aquí expresa e incluso actualiza un antiguo imaginario del proyecto racional occidental centrado en la factibilidad de trasladar objetivamente al plano teórico y tecnológico lo que de modo genuino constituye la naturaleza.

Ahora bien, en todo este debate no se ha tenido en cuenta la verdadera envergadura histórica del concepto *mimesis*, ya que en su dilatado recorrido (que se extiende ya por cerca de veinticinco siglos), ha adoptado, con el transcurrir del tiempo, múltiples y dispares significaciones (y en no pocas ocasiones contrapuestas), a la vez que ha experimentado prolongados periodos de olvido o desinterés junto a

otros momentos caracterizados por su omnipresencia en el discurso filosófico occidental. Este hecho, a todas luces soslayado bajo el enfoque biomimético, permite concluir que el término *mimesis* escapa a cualquier intento de definición unívoca. No nos vamos a extender en demasía sobre este asunto, pero es posible ilustrar la tradicional opacidad que rodea al sentido de la *mimesis* con el encendido debate suscitado hace unas décadas entre Hermann Koller (1954 & 1980)⁴¹ y Gerald Frank Else (1958)⁴² en relación con la prospección genealógica del término con anterioridad al *Corpus Aristotelicum* y a sus referencias clásicas. Mientras que el primero de estos autores cree identificar un sentido primigenio asociado a la *mimesis* en la idea de “expresión” (esto es, como proyección ético-emocional externa de un contenido espiritual) y no tanto como “copia” o “imitación” (acepción que provendría de Platón -libros II, III y X de la *República*-), el segundo plantea una argumentación contrapuesta al afirmar la no existencia de una doctrina consolidada de la imitación en el periodo pre-platónico y atribuir al concepto tres significados concretos: “actividad mímica”, “imitación” y “replicación”. El carácter polisémico del término es ratificado por Stephen Halliwell (2002)⁴³ quien, sin entrar en esta polémica, sostiene que la variedad del empleo del término es tal que resulta harto complicado trazar un esquema lineal sobre el significado histórico del concepto *mimesis*. De hecho, nos remite a cinco significados distintos, a saber: “representación visual”, “comportamiento imitativo”, “la actuación”, “la imitación vocal” y la “mimesis metafísica”.

Todo este asunto de gran importancia ha sido, sin embargo, ignorado completamente desde el enfoque biomimético, que, más bien, se inclina generalmente por llevar a cabo, en una suerte de “presentismo” histórico⁴⁴, una mera transcripción anacrónica del término *mimesis*. En el mejor de los casos, los únicos intentos de emprender una exploración genealógica del término han venido, precisamente, de la mano de aquellos autores que interpretan el enfoque biomimético de manera más crítica (en este punto hay que destacar los trabajos de Vincent Blok & Bart Gremmen, 2016)⁴⁵, remitiéndose esencialmente a la *mimesis* aristotélica con el objeto de fundamentar una alternativa biomimética que vaya más allá de una relación imitativa con la naturaleza. Esta perspectiva, que sigue los trabajos del filósofo francés Philippe Lacoue-Labarthe (1990 & 1998)⁴⁶ y se hace eco de la reapropiación contemporánea del concepto *mimesis* como objeto central de preocupación filosófica (como así lo atestiguan las aproximaciones de R. Ingarden, H. G. Gadamer, A. Danto, T. W. Adorno, J. Derrida, M. Foucault, N. Luhmann, R. Girard, etc.), re-interpreta la concepción aristotélica de la naturaleza presente en su *Física* como una realidad carencial susceptible de ser complementada tecnológicamente a través de la cualidad productiva, y no sólo reproductiva, de la *mimesis*⁴⁷. Aun cuando esta aproximación exegética excede con creces lo dicho por Aristóteles⁴⁸, presenta la virtud de señalar uno de los “niveles de representación”

de la *mimesis* (de acuerdo a lo expuesto por Erich Auerbach -2006-) ⁴⁹ que quiebra, por extensión, la preconcepción que asocia la biomimesis con una actividad especular de replicación imitativa de lo natural.

Desde este punto de vista, las operaciones cognitivas que se ponen en marcha en la aprehensión conceptual biomimética, revelan de modo implícito una actividad creativa de pre-comprensión e inteligibilidad muy afín a los términos que ha puesto sobre la mesa el filósofo y antropólogo francés P. Ricoeur ⁵⁰. La firme sospecha de una íntima contigüidad entre la *mimesis* y la *poiesis*, lejos de servir únicamente de trasfondo heurístico para comprender la acción tecnológica como un fenómeno de consumación de lo natural, puede ser vista también como un principio de articulación gnoseológica con lo real que posibilita, más bien, un acto de “impulso de la naturaleza más allá de sí misma”. En este tránsito determinante, los parámetros biomiméticos de discernimiento de lo viviente, en una maniobra de oscilación entre lo cercano y lo lejano, remiten a la realidad natural a través de su invención y de su recomposición metafórica ⁵¹. El análisis bajo la perspectiva ricoeuriana (y a este respecto podríamos traer también a colación la metaforología del filósofo alemán Hans Blumenberg ⁵²) de la empresa de indagación y desciframiento de la naturaleza emprendido por la disciplina biomimética presenta la virtud de poder trasponerlo de la vertiente estético-literaria (punto de origen de las exploraciones del filósofo y antropólogo francés) al campo de la modelización científica (Max Black & Mary Hesse) ⁵³.

Contemplado desde esta óptica, el carácter metafórico en la emulación biomimética viene dado porque, al construir un modelo en apariencia descriptivo y denotativo de lo natural, incurre realmente en una estrategia heurística de “re-descripción”. Ciertamente, la incontestable copiosidad de tropos, analogías y catacrexis existentes en el discurso apologético del enfoque biomimético (que identifica la dinámica natural con conceptos tales como mecanismo, sabiduría, obras maestras, computación, creaciones, lecciones, diseños, maquinaria, tecnología, invención, programas, software, códigos, ingeniería, economía, recurso, planos...) ⁵⁴ demuestran que la emulación forma parte del entramado metafórico con el que se substancia la modelización de la naturaleza. En cuanto tal, guía y direcciona el entronque analógico, la juntura ontológica, el laberinto de reflejos especulares que aproximan sutilmente lo natural y lo tecnológico. Y esto no supone exclusivamente un modo particular de observar la naturaleza, sino también cierta conducción pragmática respecto a la misma. De esta manera, emprendiendo un provocativo rodeo a través de la articulación estratégica entre codificación y desciframiento de la estela “algorítmica” que encubre la vida, la biomimesis re-actualiza el mito esplendente en la cosmovisión científica moderna (cuyo origen se remonta, cuando menos, a T. Campanella, Galileo o J. Kepler) acerca de la legibilidad de la naturaleza.

Tras los engranajes de la naturaleza. El diseño biomimético

La fórmula heurística que acentúa la propuesta biomimética entra de lleno en el asunto del punto de anclaje racional, esto es, el trasfondo de sentido desde el que la tecno-ciencia contemporánea re-organiza la intervención operativa en el escenario natural. A resultas de ello, la naturaleza, considerada como un determinante básico y un objetivo prioritario del irrefrenable ímpetu técnico de nuestro presente, se encuentra sometida a una empresa cognitiva concreta de desocultamiento que aspira a fijar correctamente el estado de cosas de lo viviente y, con ello, a instaurar un régimen normativo de apropiación sobre el mundo orgánico. Desde este punto de vista, la biomímesis, a mi entender, se decanta por una particular lectura evolucionista de la naturaleza de la que cabe destacar la eficacia y la eficiencia como dos de los rasgos inherentes que aseguran su auto-preservación en el tiempo. Esta aproximación teleológica de la naturaleza se fundamentaría, *grosso modo*, en la existencia de ciertos patrones de actuación que garantizarían la continuidad del material genético individual a través de la sucesión de miles y miles de generaciones de seres vivos. El destino inevitable de este lineamiento evolutivo de millones de años queda expuesto en la consecución de expresiones morfológicas y funcionales que son altamente significativas por su eficacia y eficiencia a la hora de propiciar un acoplamiento coyuntural con las particulares circunstancias del entorno. A esta tesis parece sumarse la propia J. Benyus cuando, en el pasaje siguiente, afirma lo siguiente:

La biomímesis está descubriendo lo que funciona en el mundo natural y, cosa aún más importante, lo que dura. Después de 3.800 millones de años de investigación y desarrollo, los fracasos han quedado fosilizados y lo que nos rodea es el secreto de la supervivencia. Cuanto más se parezca nuestro mundo al mundo natural, más probable es que seamos aceptados en esta casa que es la nuestra, pero no de nosotros solos⁵⁵.

En consecuencia, todas estas consideraciones nos llevan a barruntar una más que presumible coincidencia, en términos de un epistemología del discurso biológico, entre la perspectiva biomimética y aquel frente programático, muy activo en las últimas décadas, que lleva a cabo una interpretación *sui generis* del principio transformista darwiniano⁵⁶ partiendo de las tesis del adaptacionismo evolutivo⁵⁷. De todo lo anterior se sigue naturalmente que el análisis biomimético retoma, bajo una versión remozada, la problemática del diseño sobre la naturaleza que tanta discusión y controversia ha generado, especialmente desde el siglo XIX, con la archiconocida analogía del relojero concebida por William Paley⁵⁸. Las consecuencias y objeciones de orden metafísico y teológico que, hasta bien entrado el siglo XXI, se han ido gestando en torno a esta conjetura ya clásica por la que

se subsume el ser vivo en el sofisticado mecanismo de un cronómetro, sirven de contexto adecuado para discernir el modo en que la exégesis biomimética acierta a vislumbrar cierto grado de intencionalidad en la actividad de los patrones inteligentes que vertebran el mundo orgánico. No se trata aquí de volver a fundamentar, ya sea bajo los parámetros de la teología natural clásica o del cristianismo crítico, la existencia latente, tras la complejidad del proceso natural, de un plan premeditado pergeñado por una deidad benevolente y racional⁵⁹. Pero tampoco de dar por sentado que el hecho evolutivo sólo puede entenderse como una concatenación contingente. Por el contrario, la biomimesis opta por solventar el problema esencial de la variabilidad en la teoría de la evolución de C. Darwin (que es uno de los problemas claves) asumiendo que el mecanismo de la selección natural es un método de “ensayo y error en todas las direcciones”. Está claro que, con la puesta en escena de esta metáfora, cuya fuerza expresiva es clave para comprender el alto grado de elocuencia del discurso biomimético, se persigue reinterpretar el conocido principio transformista de los seres vivos (que lleva siendo el germen de enconadas disputas en el pensamiento biológico desde 1800⁶⁰) mediante el reconocimiento de una especie de diseño no-planificado cuyo principio rector tiene que ver con el mejoramiento adaptativo a escala planetaria. Visto desde este punto de vista, el mecanismo de la selección consiste en un proceso de mejora continua de la capacidad adaptativa, reflejada en rasgos discretos y específicos, a través de la “investigación ingenieril”.

Esta lectura particular del mecanismo de selección natural, que se presenta de manera paradigmática con la sugerente imagen de un laboratorio de investigación y desarrollo, encierra la tesis de que el transcurso del tiempo, en conjunción con las condiciones del medio natural (que, en este caso, representaría el campo de operaciones y tentativas donde la biomasa altera sus parámetros de adaptación), posee un efecto directo y profundo en el gradual perfeccionamiento morfológico-funcional de los seres vivos. Seamos todavía más precisos en esta idea. Si nos atenemos al relato subrepticio que late en el discurso biomimético (con un tinte marcadamente utilitarista), cabría colegir con cierto fundamento que, en esta fértil correspondencia desde la que se gesta la vida, es precisamente la función la que contiene el principio rector, puesto que, en su realización fáctica, guía el impulso de la morfogénesis y de las variaciones morfológicas. Aquí la forma sigue a la función⁶¹. Digamos más aún. Pese a que los cuadros heurísticos del entramado interactivo del sistema natural despliegan, si cabe, un mayor nivel de profundidad bajo la perspectiva biomimética en comparación con otras interpretaciones más ortodoxas, el ideal último de completar una transposición tecnológica eficaz de lo investigado suscita, en el plano gnoseológico, el desarrollo de una estrategia de detección descontextualizada de ciertas características de animales o vegetales. De esta forma, la historia de perfeccionamiento funcional determinado por la

supervivencia relativa de un ser vivo en un hábitat específico queda compendiada, bajo la observación selectiva biomimética, en la manifestación de una serie de rasgos independientes que inciden sobre la totalidad del organismo. Así, la práctica inspirada biomimética, que tiende indefectiblemente a la consecución ideal de una aplicación “homeotecnológica”⁶², acarrea un mecanismo de evasión de las coordenadas espacio-temporales para establecer, *hic et nunc*, la correlación del rasgo con una función normal, dejando al margen el resto de la historia evolutiva por selección natural de cada espécimen objeto de estudio. Con ello, no sólo se resaltaría la omnipotencia de la selección natural como agente optimizador en el diseño orgánico, sino que también se trae a colación el principio de utilidad como factor causal prioritario en la generación de atributos morfológicos. No nos vamos a extender en este aspecto. Son suficientemente conocidos los ejes por los que se vertebra la crítica fundamentada a esta lectura particular del evolucionismo darwiniano, considerada como epítome arquetípica del paradigma panglosiano (J. S. Gould & R. C. Lewontin, 1979)⁶³. Por un lado, la noción de adaptación bajo este programa, centrado en una concepción atomizada de la dinámica viviente, no responde a la complejidad de niveles bajo los que los organismos se ajustan al entorno (plasticidad fenotípica, procesos “heredables” de adaptación no darwinianos y mecanismos darwinianos convencionales de selección sobre variación genética). Por otro lado, la interpretación que se realiza sobre el poder del mecanismo de selección natural desemboca en una desestimación de hipótesis no adaptativas en la generación de formas (alometría, pleiotropía, retribución material, correlación forzada mecánicamente)⁶⁴.

Ahora bien, si la evolución queda descifrada como una imperecedera indagación que hace uso de una estrategia metodológica afín a la bioingeniería, cabe la posibilidad de ir pasando el poder de direccionamiento del devenir del mundo vital de las manos de la naturaleza al dominio del ingenio humano. Justamente, éste y no otro es el escenario prospectivo que proyecta la propuesta biomimética de J. Benyus. Con el argumento de que el hombre, desde hace milenios, lleva desempeñando un papel protagónico en el mejoramiento genético de plantas y animales, la biomimesis aborda la cuestión de la selección artificial teniendo muy en cuenta los últimos y más recientes avances en la biología de vanguardia, en la medida en que, desde este campo disciplinar, se están preparando las condiciones para un horizonte venidero centrado en la “evolución dirigida”⁶⁵. La capacidad tecnológica para imitar los procesos de la selección natural, ya que en palabras de Benyus “los ordenadores son dispositivos de cultivo de primera”⁶⁶, permiten reorientar la mutabilidad de proteínas y ácidos nucleicos en concordancia con objetivos previamente fijados. De esta forma, en las insólitas y halagüeñas previsiones contenidas en el imaginario biomimético, siguiendo los supuestos de la computación evolutiva, la biocomputación y las nuevas posibilidades que, dentro de la

Inteligencia Artificial (IA), ofrece la simulación de ecosistemas artificiales (no es casual la mención aquí de Michael Conrad, John Holland o de Richard Dawkins), se aspira a maximizar la “utilidad” proveniente de la optimización adaptativa de la naturaleza mediante su exacta traducción a una secuencia algorítmica. Ciertamente es que Benyus sitúa en la propia naturaleza la fuente primordial provisor de elementos para la prefiguración de una solución práctica. Pero, en realidad y a pesar de que toma una postura refractaria al reduccionismo, la transformación en el modo de concebir la naturaleza, el re-dimensionamiento de la biología, supone acceder, mediante ingeniería inversa, a los complejos “estilos computacionales”, todavía en gran parte desconocidos, de la vida.

Lo cierto es que, en esta toma de postura, salen a relucir algunos matices diferenciales respecto a las líneas de pensamiento que encabezan autores como R. Dawkins o D. Denett, en la medida en que la biomímesis articula una unidad coherente de actividad en los procesos homeostáticos a nivel planetario. Este dato cobra, sin duda, especial relevancia por cuanto presupone, en sentido estricto, un metarrelato teleonómico (recogiendo una perspectiva abierta, a mediados del siglo XX, por Ernst Mayr, George C. Williams y Jacques Monod)⁶⁷. De esta forma, se trata de resolver la problemática existente detrás de la depuración funcional en la evolución (selección de lo que funciona y eliminación de lo que no funciona) mediante la remisión a la capacidad autorreguladora y sinérgica de la biosfera terrestre. Tal circunstancia nos lleva a algunas reflexiones de fondo que no es posible dejar de exponer en este punto. En primer lugar, el enfoque biomimético ontologiza, substancializa y reifica la naturaleza desde dos frentes complementarios: 1) re-interpreta y seculariza el argumento del diseño intencional a través del plan divino mediante la transferencia retórica de atributos vinculados con una mente sobrehumana a la propia naturaleza (que se convierte, por lo tanto, en modelo y también en guía); 2) re-define veladamente el papel de la naturaleza, considerada en este caso como el trasfondo y el agente intencional que activa el proceso de optimización evolutiva a escala planetaria.

No resulta extraño, por tanto, que el enfoque biomimético se haga eco y extrapole aquellas tendencias que, a lo largo del siglo XX, fomentan una visión planetaria de la actividad de la materia vital, al modo de un “superorganismo”, como una entidad funcional unificada (E. Suess⁶⁸, V. Vernadsky⁶⁹, J. E. Lovelock⁷⁰). Con ello la modelización tecnológica que se estimula desde el paradigma biomimético, en tanto que trata de enmendar los consabidos trastornos del capitalismo a escala globalizada (sin ir más allá), acoge abiertamente en su *corpus* conceptual la matriz ontológica “holística” de la naturaleza (en los términos fijados por L. Trepl & A. Voigt, 2011; R. Levins & R. Lewontin, 1994), convirtiéndose así en un nebuloso y chocante referente ecológico que, sin embargo, contribuye a articular los consensos socio-políticos contemporáneos.

El universo metaforológico de la biomimesis. En busca de las bases maquinales de la naturaleza

La naturaleza, como concepto, no sólo logra conjurar en su universalismo las diversas atribuciones simbólicas del fenómeno vital que han arraigado profundamente en el heterogéneo universo cultural humano, sino que ha alcanzado una eficacia retórica inusitada en la demarcación del territorio de lo objetivo en la contemporaneidad. Pese a que en su trasfondo semiótico se suceden maniobras soterradas de construcción de sentido que dan al término un carácter ambiguo y escurridizo, mantiene sin embargo una pátina de neutralidad y transparencia que le hace presentarse como el sustrato pre-ideológico fundante de la tradición epistemológica occidental. Desde este punto de vista, no han sido ni mucho menos excepcionales, en estos últimos años, los discursos críticos, ya sea en el campo de la filosofía, de la antropología o en el de la ecología política (y aquí podemos hacer mención a autores tales como B. Latour⁷¹, T. Morton⁷², S. Žižek⁷³, E. Swyngedouw⁷⁴, Y. Stavrakakis⁷⁵, etc.) que han detectado en ello una maniobra política por antonomasia. La radical desustancialización del componente cultural (R. Ellen & K. Fukui, 1996⁷⁶), el eficaz velamiento de la genealogía constructiva que da fundamento a la categoría “naturaleza” deja fuera a ésta de los espacios prototípicos del debate colectivo (tanto en el ámbito académico como en los foros en los que se condensan las lógicas de institucionalidad) y le hace, aparentemente, inmune a las relaciones y maniobras que se prodigan en los regímenes del poder contemporáneo. Lo natural, como una realidad que se impone, se sitúa más allá del radio de atención reflexiva humana. Queda reducido a una inmanencia inexplorada que, sin embargo, constituye el anclaje elemental de la existencia y de toda elaboración gnoseológica. Ahora bien, este velado juego de apariencias y enmascaramientos, que da cuenta del contexto históricamente situado en el que se desarrolla, cumple sus metas de ordenación de la realidad a través de la potencia metonímica que atesora el concepto de naturaleza.

En relación con ello, no es posible soslayar la efectividad demostrada, en términos retóricos, desde la perspectiva biomimética a la hora de dar impulso a un modelo de operatividad tecnológica mediante la incuestionable versatilidad metafórica de la naturaleza. La imagería nuclear de la biomimesis atiende a la correspondencia fraguada con la representación maquinale, y sus versiones adyacentes del ingeniero y del laboratorio de I+D, para deslizar la evocación de una línea de continuidad entre la técnica humana y los ciclos naturales. La decidida inmersión en las profundidades de la naturaleza, a diferencia de lo hallado por el escritor y naturalista estadounidense H. D. Thoreau en sus travesías por las Montañas Blancas de Walden Pond, Quebec o la región de los Grandes Lagos, lleva a los apologetas de lo biomimético a desentrañar un orden regulativo maquinale (en lo

referente a los procesos de auto-organización, en las acciones adaptativas, en las fases emergentes o en las estrategias de resiliencia). La “naturalización” del hecho tecnológico, imbricado en un credo ambientalista hasta cierto punto ambivalente, resulta, en el fondo, una proyección especular de la razón tecnocrática. La vida, como fenómeno puesto en el punto de mira de la tecno-ciencia de vanguardia (S. Helmreich⁷⁷), se ve expuesta a una voluntad de saber destinada a la acción (P. Schyfter⁷⁸) y, en última instancia, a la fabricación de un dominio ontológico inédito (S. Roosth)⁷⁹.

En tal sentido y teniendo en cuenta todo lo dicho, no debe extrañar que la biomimesis pueda ser considerada como verdadera legataria del relato mítico en torno al fértil universo de sentido atribuido a la metáfora maquinale que, autores como L. Mumford, han situado en el centro de la cosmovisión occidental desde los siglos XVII y XVIII. Frente a lo que en un plano superficial pudiera darnos a entender, la perspectiva biomimética, con su encendido énfasis por la redención ecológica a partir del potencial operativo del correlato tecnológico, viene a apuntalar lo que M. H. Nicolson denomina la “muerte de la Tierra”⁸⁰ en cuanto que certifica el declive de la idea que asocia a la naturaleza con lo “orgánico”. En la cultura tecnológica del siglo XXI en la que nos hallamos, la semiótica que irrumpe en el discurso biomimético, plagado de notables referencias a lo maquinale, a la fábrica, al dispositivo de ingeniería o, incluso, a los métodos de exploración, ensayo y experimentación del laboratorio de I+D⁸¹, resulta sumamente convincente como eje heurístico desde el que interpretar la naturaleza. Cabe precisar, con todo, que el modelo maquinístico que evoca el corpus analógico de la biomimesis contiene elementos gnoseológicos que se alejan de modo substancial de la filosofía mecanicista renacentista o, incluso, de la propia cultura mecánica que irrumpe con todo su esplendor en el pensamiento occidental allá por el siglo XVII. El biólogo teórico R. Rosen (2000) ha contextualizado históricamente los cambios experimentados en el concepto de naturaleza a lo largo del tiempo y sostiene que la metáfora maquinale asociada a los organismos se cimienta sobre dos pilares característicos: la emergencia de la biología molecular y el crecimiento de las tecnologías⁸². Por lo tanto, cabe afirmar que el arquetipo maquinale que evoca la biomimesis contiene algunos aspectos inéditos y matices interpretativos distintos en lo que respecta al “re-descubrimiento” *sui generis* de la naturaleza llevado a cabo por aquellas ciencias que, en la actualidad, se organizan en torno a la bio-ingeniería. La inflexión mecanicista con la que se guía la exploración de los sistemas orgánicos o los ecosistemas ha logrado un nivel de sofisticación descriptiva inédito hasta el presente, debido sin duda al avance en las escalas y en los niveles de profundidad perceptiva generados por la ingeniería aplicada al campo de la vida a la hora de modelizar y diseñar las estructuras y funciones de los sistemas biológicos. Ni que decir tiene que lo que se constata aquí es una diferencia de grado⁸³. En otras palabras, no se

detecta ningún atisbo de quiebra o ruptura en términos epistemológicos respecto al modo clásico en que se ha “fabricado” la naturaleza desde la cosmovisión mecánicista occidental. La formidable audacia de la ciencia moderna sigue descansando, en gran medida, en su empeinado intento de “conquistar la naturaleza”⁸⁴. Visto bajo esta perspectiva, la biomimesis, al movilizar la analogía maquinal, se transforma en una expresión subliminal de la racionalidad económica dominante que se sirve de los procesos de abstracción tecno-científica para ahondar en la capitalización de la naturaleza⁸⁵.

Por otro lado, la resistencia a abandonar la metáfora de la máquina, aunque se esté haciendo alusión a un prototipo que asume la complejidad natural o un espacio de ensayo experimental recurrente, no atendería al hecho de someterse rigurosamente a los mecanismos heurísticos de los que dispone la ciencia actual para describir la realidad natural. En este asunto cabe entrever otras motivaciones. Cierrtamente, es creciente la posición refractaria en el campo de la biología o de la filosofía de la biología (y aquí podemos destacar a autores como K. Baverstock, D. Nicholson, A. Gauger, S. Talbott) a utilizar la imagen de la máquina como instrumento descriptivo del funcionamiento real de la vida ya que, más allá de ciertas entelequias con significativo éxito en el terreno de la divulgación científica, se incurre en un reduccionismo manifiesto. La figuración en la que se expresa el hecho tecnológico en la narrativa biomimética nos traslada a otro orden de análisis. Como instanciación antropomórfica del mundo natural, pone encima de la mesa ciertos problemas sobre la naturaleza de lo tecnológico (ligados, más bien, a la antropología física) en tanto que fenómeno que, no sólo se asocia a la evolución de la inteligencia humana, sino que remite también a la controversia, permanente en el tiempo, acerca de la integración innata o, por el contrario, a la escisión ontológica del hombre en relación con la naturaleza. No vamos a entrar siquiera de manera somera en discusión que, sin duda, nos llevaría lejos por los hitos más destacados de reflexión sobre la naturaleza de lo tecnológico (desde K. Marx a la Sociedad Alemana de Ingenieros -*Verein Deustcher Ingenieure*- con E. Kapp o F. Dessauer, desde J. Ortega y Gasset a M Heidegger, desde L. Mumford a J. Ellul, desde L. Winner al enfoque de sistemas de T. Hughes, desde el enfoque Actor-Red -con B. Latour y M. Callon- al enfoque SCOT -con T. Pinch o W. Bijker-). Lo que se afirma aquí es que la necesidad perentoria de esta reflexión, expresada de manera más precisa en la posibilidad de gestar una especie de prácticas homeotecnológicas (P. Sloterdijk)⁸⁶ en un horizonte biopolítico posthumanista, se elude de modo taxativo en las teorizaciones que dan fundamento al enfoque biomimético. Dicho de otra manera, se da por supuesta la neutralidad constitutiva del fenómeno tecnológico, frente a un enfoque perspectivista e históricamente situado, y con ello queda zanjada cualquier controversia que supondría, por extensión, abordar las bases sociopolíticas, económicas e ideológicas sobre las que se sustenta la biomimesis.

No obstante, es innegable que el proyecto biomimético desliza subrepticamente una concepción de lo tecnológico muy concreto que tiene su fundamento en un marcado dualismo⁸⁷. La clave aquí no es materializar una aproximación de horizontes entre lo natural y lo tecnológico (lo que vendría a corregir cierta presunción errónea en la metafísica clásica occidental sobre la tecnología y las condiciones bio-antropológicas del hombre), sino llevar a cabo una reformulación operativa de la práctica tecnológica a partir los principios formativos e interactivos del orden natural. La plena confianza en la posibilidad de un desarrollo alternativo de lo tecnológico como mecanismo principal para resolver los problemas de fondo que asolan en la actualidad al hombre a escala planetaria, sitúan al enfoque biomimético en la línea del determinismo tecno-optimista. La tecnología se presenta aquí como un criterio que demarca a la naturaleza y expone sus limitaciones. La naturaleza, de esta forma, se ve sobrepasada, perfeccionada a través del componente suplementario⁸⁸ que alberga la tecnología biomimética. No se trata de reproducir o conseguir capacidades o funciones similares a las mostradas en la naturaleza, sino ir más allá y alcanzar un campo de realización o de mejoramiento (*bioenhancement*) humano inédito⁸⁹. No es posible, en consecuencia, dejar de advertir las conexiones o, por lo menos, las cercanías de propósito entre la biomimesis y las corrientes de pensamiento asociadas al posthumanismo o extropianismo⁹⁰. En suma, la biomimesis, a la espera de que se alcance esa venidera “singularidad tecnológica” (dicho de otra forma, el advenimiento generalizado de la inteligencia artificial) anunciada por el científico de la computación R. Kurzweil⁹¹, pone sobre la mesa el encendido debate sobre las nuevas estrategias de adaptación que se asoman por el horizonte futuro de la especie humana mediante la probabilidad de un auto-diseño artificial cuyo nivel de complejidad equivalga o, incluso, aventaje a la organización compleja desplegada por la naturaleza desde aquel remoto periodo en que los primeros signos de vida afloraron sobre la Tierra.

Conclusión

De todo lo esbozado con anterioridad, cabe inferir que el imaginario biomimético se está instalando de manera paulatina en ciertos protocolos de actuación de las tecno-ciencias de vanguardia, lo que ha desembocado en la internalización de un acervo representacional en torno a la naturaleza compatible con las pretensiones operativas del desarrollo tecnológico contemporáneo. Sin caracterizarse como una ciencia *stricto sensu* (coincido en este extremo con el biólogo francés Gilles Bœuf), la biomimesis se presenta como una constelación de planteamientos teóricos y valorativos sobre la vida que, aunque no están en absoluto exentos de contradicciones intrínsecas (en términos epistemológicos e incluso éticos), po-

seen una potencia retórica de convencimiento y de persuasión incuestionables. Tal circunstancia resulta hasta cierto punto inquietante, ya que entraña una aproximación tan ambigua a la biodiversidad que puede hacernos caer en la ofuscación del espejismo: creer atisbar una realidad sólida en lo meramente ilusorio o en lo inexistente.

Ante este escenario concreto, resulta hasta cierto punto comprensible llevar a cabo un profundo cuestionamiento sobre la capacidad efectiva del enfoque biomimético para condicionar el direccionamiento axiológico de la praxis tecno-científica contemporánea. Este hecho es realmente sintomático y desvela cómo la biomimesis, lejos de constituir una herramienta útil para proporcionar circunspección y conciencia a la deriva marcadamente instrumentalista de la tecno-ciencia occidental, puede por el contrario servir para divisar en la actividad natural de los ecosistemas que se distribuyen a lo largo y ancho del mundo los últimos horizontes epistémicos a los que aplicar, hasta el agotamiento, el principio de utilidad de acuerdo a la lógica competitiva del mercado a escala global.

Y es que la mirada verdaderamente transgresora, revolucionaria, lo que tal vez pueda redimir a este planeta de las graves amenazas que ponen en riesgo la existencia de todo ser viviente consiste inevitablemente en atisbar (y aquí me acojo a lo dicho por N. Ordine²) la discreta hondura de sabia y fascinante “inutilidad” que atraviesa y colma el *mundus naturalis*.

Il n'y a de vraiment beau que ce qui ne peut servir à rien
Théophile Gautier. *Préface de Mademoiselle Maupin* (1835)

NOTAS

¹ Se trata de uno de los primeros y más destacados ensayos dedicados a la ciencia astronómica escritos en lengua vernácula, concretamente en francés, en el que podemos hallar un ejercicio de popularización y divulgación de las ideas del filósofo, matemático y físico francés René Descartes en relación con el mecanicismo y del monje astrónomo polaco Nicolás Copérnico en relación con el heliocentrismo. La obra, publicada en 1686 (con la edición de Veuve de Claude Blageart), obtuvo un éxito sin precedentes y es considerada una de las referencias prototípicas del periodo ilustrado.

² Fontenelle, B. B. (1982). *Conversaciones sobre la Pluralidad de los Mundos*. Madrid: Editora Nacional, p. 72. Primera edición: (1686). *Entretiens sur la pluralité des mondes*. Paris: Vve C. Blageart.

³ No en vano, Bernard Le Bovier de Fontenelle se iba a posicionar decididamente a favor de superar los lastres del pasado y de renovar la experiencia del mundo en la célebre querrela de los antiguos y de los modernos que se suscitó, en un primer momento en el seno de la Academia Francesa, a finales del siglo XVII y principios del XVIII.

⁴ “La filosofía natural está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir, el universo, pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto”. Galileo Galilei (1984). *El ensayador*. Madrid: Sarpe, p. 61.

⁵ Véase al respecto, Toulmin, S. (2001). *Cosmopolis. El trasfondo de la modernidad*. Barcelona:

Península; Feyerabend, P. (2013). *Filosofía Natural*. Buenos Aires: Debate; Mumford, L. (2016). *El pentágono del poder. El mito de la máquina*. Logroño: Pepitas de Calabaza; Tarnas, R. (2016). *La pasión de la mente occidental. Para una comprensión de las ideas que han configurado nuestra visión del mundo*. Girona: Ediciones Atalanta.

⁶ La ametropía es un defecto o anomalía de refracción ocular congénito que afecta al enfoque adecuado de la imagen en la retina y que puede ser corregido mediante el uso de lentes correctoras. Las principales ametropías esféricas son la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo. Bajo esta perspectiva y haciendo uso de esta analogía, la biomimesis, como revelación especular del comportamiento natural, se reivindica como un ideal en la representación genuina del comportamiento vital.

⁷ Hacemos referencia, claro está, al célebre apotegma heraclíteo (Diels Kranz 22, B123). Para un conocimiento más exhaustivo de la compleja cosmovisión del filósofo de Éfeso, no es posible dejar de mencionar las siguientes obras que considero fundamentales: Diels, H. y Kranz, W. (1951-1952). *Die Fragmente der Vorsokratiker*. Berlín: Weidmann; Kirk, G. S. & Raven, J. E. (1987). *Los filósofos presocráticos*. Madrid: Editorial Gredos.

⁸ El análisis sobre la genealogía de estos términos y su asentamiento histórico en la cultura occidental excede con creces el alcance de este texto. Para dirimir, por ejemplo, el sentido último de *bios* es preciso remitirnos, al menos, a las obras de M. Foucault, G. Agamben, H. Arendt, L. Dubreuil, J. Finlayson. El interés adicional aquí estriba, además, en que es posible entrever nexos evidentes de conexión entre la praxis biomimética y las estrategias biopolíticas contemporáneas (desde los albores del siglo XX, con Rudolph Kjellen a la cabeza, hasta la actualidad). Por otro lado, la equívocidad ínsita y la oscuridad sobre la etimología del término *mimesis* ha suscitado enconados debates en el campo de la filología, como el mantenido por H. Koller y G. Else, en torno a su contenido semántico. Más prudente, en ese sentido, parece la postura mantenida por P. Woodcruff o S. Halliwell, a pesar de que éste último autor atribuye cinco usos distintos a este concepto. En el siguiente apartado nos detendremos brevemente sobre este asunto.

⁹ Estos autores, partiendo de la interpretación de Aristóteles acerca de la *mimesis* (contenida en su celeberrima *Física*) y su relación, representativa o productiva, con la naturaleza, aciertan a distinguir dos planteamientos opuestos en la biomimesis: una perspectiva fuerte (la que personifica Janine Benyus, fundadora del *Biomimicry Institute*) y una perspectiva débil (representada por Joanna Aizenberg, codirectora del *Instituto Kavli de Ciencia y Tecnología BioNano* de la Universidad de Harvard). Véase al respecto, Blok, V. & Gremmen, B. (2016). Ecological innovation: Biomimicry as a new way of Thinking and Acting Ecologically. *J Agric Environ Ethics*, 29, pp. 203–217.

¹⁰ “The introduction of the label *ecomimicry* is not intended as a launch of a grand new philosophy and practice of technology, it merely acts as a categorisation system that delineates between practices of mimicking nature that are not particularly socially and environmentally responsible (*biomimicry*) and practices of mimicking nature that aim to be environmentally sensitive and socially just (*ecomimicry*)”. Marshall, A. & Lozeva, S. (2009). Questioning the Theory and Practice of Biomimicry. *Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 4, No. 1, p. 7.

¹¹ Jonathon Keats, filósofo experimental y artista conceptual estadounidense, pone el acento crítico en el carácter unidireccional de la transferencia tecnológica auspiciada por el enfoque biomimético. Si se parte del “conocimiento” existente en la esfera orgánica para suscitar su traducción aplicativa a la sociedad humana, la biomimesis, entendida de esa manera, se encuadra en una lógica de expropiación y saqueo del mundo natural. Resulta necesario, por tanto, una re-distribución efectiva del impacto tecnológico que compense al resto de los seres vivos y los hábitats naturales del estado de destrucción al que ha abocado el avance del homo technologicus. Véase al respecto, Keats, J. (2017). *The Reciprocal Biomimicry Initiative*. San Francisco: Blurb, pp. 56-62.

¹² No es casual en modo alguno la utilización de esta noción, propuesta por primera vez en 1904, aunque con un sentido algo diferente, por el zoólogo alemán Richard Wolfgang Semon (*Die*

Mneme als erhaltendes Prinzip im Wechsel des organischen Geschehens), para referirse a la biomimesis, en la medida en que responde a ciertos intentos de “biologización de la cultura” establecidos por autores sobradamente conocidos como Richard Dawkins, acuñador del neologismo, o Daniel Dennett, Derek Gatherer, F. Ted Cloak, J. M. Cullen, Robert Aunger, Elan Moritz o Aaron Linch, para explicar la transmisión y evolución cultural del mismo modo en que se desencadena la replicación genética. No pasa desapercibido tampoco que dicho objeto cultural, entendido como una unidad discreta de información socialmente aprendida y transmitida, se replique por una acción mimética. Véase al respecto, Dawkins, R. (1993). *El gen egoísta. Las bases biológicas de nuestra conducta*. Barcelona: Salvat.

¹³ Se considera que Janine M. Benyus (1958-...), cuya obra se ha convertido en una referencia de consulta esencial a este respecto, es la divulgadora más reconocida en la actualidad de aquella disposición del ser humano, que se pierde en la noche de los tiempos, hacia la especulación o la indagación productiva, con base en el aprendizaje y la emulación de la “sabiduría” atesorada por la naturaleza. Véase al respecto, Benyus, J. M. (2012). *Biomimesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores.

¹⁴ El nacimiento de la biofísica, término introducido por el matemático y bioestadístico inglés Karl Pearson en 1892 en su obra *The Grammar of Science*, coincide con la introducción de los principios de la física newtoniana al campo de la biología, de la fisiología o de la medicina. El punto de arranque tiene que ver con los trabajos pioneros llevados a cabo, en torno a 1847, por parte de destacados científicos alemanes (Ernst Heinrich Weber, Richard von Volkmann, Hugo von Ziemssen, Julius Bernstein, Johannes Müller, etc.) agrupados en torno a la Escuela de Fisiología de Berlín. En un paso más allá, a mitad del siglo XX surge un nuevo campo derivado de la aplicación de los avances, técnicas e ideas de la ingeniería para la creación de productos o el control o modificación de sistemas biológicos. El científico británico Heinz Wolff denominó por primer vez en 1954 a este campo como bioingeniería.

¹⁵ En oposición a la apatía y menosprecio con que A. Koyré aborda el papel de F. Bacon en el avance de la ciencia, L. Mumford atribuye a su obra el mérito de llevar a cabo la justificación pragmática más poderosa para estimular el conocimiento técnico. Véase al respecto, Mumford, L. (2016). *El pentágono del poder. El mito de la máquina*. Logroño: Pepitas de Calabaza, pp. 171-206; Funari, A. J. (2011). *Francis Bacon and the Seventeenth-Century Intellectual Discourse*. New York: Palgrave Macmillan.

¹⁶ Con este concepto aludimos a una corriente de pensamiento reciente en el campo de la historia y de la filosofía de las ciencias que subraya el carácter histórico, expresado en estrategias desiguales que se suceden en el tiempo de organizar el conocimiento y las prácticas científicas, de los propios contenidos epistemológicos. Desde este punto de vista, se utiliza de forma consciente este enfoque (en el que también caben conceptos afines como el de “surgimiento”, “disolución” o “desaparición”) con el objeto de impugnar el valor heurístico del descubrimiento en la particular afiliación cognitiva con la realidad natural que establece la biomimesis. Véanse al respecto, los trabajos de I. Hacking, J. Renn, H. J. Rheinberger, P. Galison, S. Schaffer, entre otros. A modo de introducción en la materia, recomendamos sin duda la obra pionera de Daston, L. (2000). *Biographies of Scientific Objects*. Chicago & London: Chicago University Press.

¹⁷ Es a través, fundamentalmente, de las rupturas desatadas por G. Cuvier y C. Darwin, cómo la vida, en tanto que realidad ontológica singular, accede a la visibilidad. Véase al respecto, M. Foucault: “*Se quieren hacer historias de la biología en el XVIII pero no se advierte que la biología no existía y que su corte del saber que nos es familiar desde hace más de ciento cincuenta años, no es válido en un periodo anterior. Y si la biología era desconocida, lo era por una razón muy sencilla: la vida misma no existía*”. Foucault, M. (1990). *Las palabras y las cosas. Una arqueología de las ciencias humanas*. Madrid: Siglo XXI, p.128.

¹⁸ La confusión del manejo en los entramados clasificatorios como si fueran objetos empíricos

directos es objeto de una virulenta crítica por parte, entre otros, de B. Latour, que lleva a inferir la existencia, en el fondo, de una crisis de objetividad (muy especialmente, vinculada a la ecología política) que nada tiene que ver con la propia naturaleza. En ese sentido, la identificación de lo natural en lo pre-reflexivo contribuye a abrir un quiasmo insuperable con respecto a su dimensión política. En vez de re-pensar el mundo socio-político se opta por una intervención tecno-científica. Véase al respecto, Latour, B (2004). *Politics of Nature: How to Bring the Sciences into Democracy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, pp. 10-42.

¹⁹ Entiendo que la retórica del discurso biomimético enmascara el mecanismo de la selección natural en un nuevo escenario, afín a los esquemas representacionales de la tecno-ciencia contemporánea, donde la vida lleva a cabo un constante proceso de ensayo y error. La adaptación funcional se convierte, así, en el factor causal de la dinámica y variabilidad orgánica. Sin duda, este planteamiento contraviene la creencia, arraigada incluso en el periodo de irrupción de la teoría darwiniana, acerca de la innata heterogeneidad de la evolución y del hecho de que, en realidad, la selección natural no produciría variabilidad, sino que preservaría las variaciones. Véase al respecto, Galera, A. (2010). La omnipresente selección natural. *Endoxa: Series Filosóficas*, nº 24, pp. 47-60.

²⁰ Radder, H. (1996). *In and About the World. Philosophical Studies of Science and Technology*. New York: State University of New York, p. 1.

²¹ Esta perspectiva viene a coincidir, en esencia, con algunos presupuestos epistemológicos nucleares desarrollados en la obra del filósofo francés G. Canguilhem relativos a la radical inadecuación entre lo viviente y el pensamiento. La empresa de hacer inteligible lo vital, como realidad original e irreductible, desde una aproximación teórica concreta no puede agotar, ni mucho menos, aquello que se aprende conceptualmente y demuestra, además, los límites reales del conocimiento biológico. Véase al respecto, Canguilhem, G. (1992). *La connaissance de la vie*. Paris: Vrin, pp. 10-15.

²² A grandes rasgos, cabe definir la condición post-biológica como un estado venidero de superación del paradigma biológico a través de la convergencia tecnológica. Este escenario de futuro ha sido recreado y anticipado en los últimos tiempos por los adalides del pensamiento transhumanista contemporáneo (H. Moravec, R. Kurzweil, S. Dick, D. Pearce, N. Bostrom y otros). Más adelante hacemos referencia a la llamativa vinculación entre la biomimesis y ciertos planteamientos del transhumanismo.

²³ “ (...) although we cannot definitely assert that life is a mechanism until we know more exactly what we mean by the term mechanism as applied to organic corpuscles, there still seems little ‘doubt that some of the generalisations of physics-notably the great principle of the conservation of energy-do describe at least part of our perceptual experience of living organisms. A branch of science is therefore needed dealing with the application of the laws of inorganic phenomena, or Physics, to the development of organic forms. This branch of science which endeavours to show that the facts of Biology -of Morphology, Embryology and Physiology- constitute particular cases of general physical laws has been termed Aetiology. It would perhaps be better to call it Bio-physics”. Pearson, K. (1911). *The Grammar of Science*. London: Adam & Charles Black, p. 588.

²⁴ Schmitt, O. Some Interesting and Useful Biomimetic Transforms. Proceeding, *Third International Biophysics Congress*, Boston, Mass., Aug. 29-Sept. 3, 1969, p. 297.

²⁵ De acuerdo con esta autora la biomimesis se funda en tres principios básicos: *La naturaleza como modelo*. La biomimesis es una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza para imitar o inspirarse en los diseños o procesos biológicos para resolver problemas humanos; *La naturaleza como medida*. La biomimesis se vale de un estándar ecológico para juzgar la ‘corrección’ de nuestras innovaciones; *La naturaleza como mentor*. La biomimesis es una nueva manera de contemplar y valorar la naturaleza”. Benyus, J. M. (2012). *Biomimesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores, p. 13.

²⁶ H. A. Gleason (1882-1975) desarrolla su hipótesis individualista de la sucesión ecológica y con ello cuestiona los planteamientos de F. E. Clements sobre la interrelación y distribución asociativa

de las especies. Este enfoque, que quedó en el olvido hasta los años cincuenta del siglo XX (cuando es retomado por especialistas como Robert Whittaker y John T. Curtis), permite un estudio estadístico eficaz del asentamiento espacial de especies vegetales a partir del azar matematizado. Véanse al respecto: Gleason, Henry A. (1917). *The Structure and Development of the Plant Association*. *Bull. of the Torrey Bot. Club* 43: 463-481; Gleason, Henry A. (1922). *On the Relation between Species and Area*. *Ecology* 3(2): 158-162.

²⁷ La teoría de F. E. Clements (1874-1945) sobre el “estado climático” en relación con el desarrollo vegetal va a dominar los principios epistemológicos de la ecología durante las primeras décadas del siglo XX. Se entendía que los vegetales se asociaban como una unidad interdependiente (similar a un organismo) y alcanzaban así una estabilidad basada también en la cooperación (mutualismo) y no sólo en la competencia.

²⁸ Véase al respecto, Han, B-C. (2013). *La sociedad de la transparencia*. Barcelona: Herder.

²⁹ “Thus, while biomimicry reproduces the Cartesian dualisms that it claims to overcome, it conceals this in order to maintain (n)ature as an ontologically distinct and pristine domain divorced from human society- which it can then look to as an alternative source for (intuitive) design concepts and principles”. Fisch, M. (2017). *The nature of Biomimicry: toward a novel technological culture*. *Science, Technology, & Human Values*, 42 / 5, pp. 795-821.

³⁰ Hacemos nuestra la terminología empleada por K. R. Popper, cuyo abordaje crítico a los postulados del empirismo (sintetizados en el principio de inducción) es del todo punto conocida. Para una introducción general a la obra del filósofo austriaco, véase Miller, D. (Comp.) (2013). *Popper: escritos selectos*. México D. F.: Fondo de Cultura Económica.

³¹ Si prestamos atención a la reflexión deconstructiva derridiana sobre la metafísica de la verdad y de la presencia que acompaña a la *mimesis* desde Platón, encontramos cierta propensión al escepticismo respecto a la existencia de una referencia original que oriente la significación representacional y articule de modo equilibrado la relación signo-realidad. Por el contrario, J. Derrida, en su recorrido analítico por la estética kantiana, plantea más bien que bajo la *mimesis* se oculta una relación productiva de intercambio analógico. Derrida, J. (1975). *Economimesis*. En Agacinski, S.; Derrida, J.; Kofman, S.; Lacou-labarthe, Ph.; Nancy, J. L.; Pautrat, B. (eds.). *Mimesis-Desarticulations. La philosophie en effet*. Paris: Aubier-Flammarion.

³² “For the past several years, we have been studying the structure and function of the termite mounds that inspired Mick Pearce. In the process, we have learned many things, among them something quite remarkable: the Eastgate Centre is modelled on an erroneous conception of how termite mounds actually work. This is not intended to be a criticism, of course: Pearce was only following the prevailing ideas of the day, and the end result was a successful building anyway. But termite mounds turn out to be much more interesting in their function than had previously been imagined”. 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.

³³ Como es bien sabido, estos dos efectos, que permiten la introducción en la arquitectura bioclimática de sistemas de ventilación natural inducida, se han utilizado en los últimos tiempos para mejorar el confort térmico y reducir el gasto energético de edificios eficientes. Se parte aquí del principio físico de que la masa de aire más caliente posee menor densidad y asciende por convección natural, de acuerdo a la diferencia de densidades y temperaturas, sobre la porción más fría (ya que ésta ejerce una presión ascensional).

³⁴ La objetividad mecánica es un concepto utilizado por L. J. Daston y P. Galison para describir un paradigma intelectual, un ideal científico que se pone en marcha en el siglo XIX y que exhorta a centrarse en el conocimiento obtenido de la operatividad reproductiva sobre la realidad, a la vez que se mitiga o reprime la dimensión subjetiva en el acto del conocer. De esta forma, el científico tan sólo debe limitarse a observar y escuchar lo que la naturaleza “muestra” y “dice”. Véase al respecto,

Daston L. J. & Galison, P. (2007). *Objectivity*. New York: Zone Books, pp. 121-125.

³⁵ No corresponde aquí entrar a desgranar en detalle la acerada crítica de B. Latour sobre las estrategias subterráneas que nutren, a lo largo de la historia de occidente, el constructo epistémico de la naturaleza y su efecto decisivo en la apertura de un desgarramiento ontológico y político entre la ciencia y la sociedad. Tan sólo indicaremos que esta concepción idealizada y con pretensiones universalistas se extiende, no sólo en las diferentes versiones de la ecología política contemporánea, sino también en aquellas propuestas más perspectivistas que asumen la diversidad cultural. Bajo esta óptica, considero que la biomimesis no marca distancias a este respecto y asume, en su configuración conceptual, el precepto etnocéntrico que subyace bajo esta instancia trascendente y absoluta. Latour, B. (2004). *Politics of Nature: How to Bring the Sciences into Democracy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, pp. 9-52.

³⁶ “Todas las sociedades admiten la existencia de pequeños trozos de naturaleza, si se puede decir, pero sólo en el moderno Occidente se da a la oposición entre naturaleza y sociedad, una función rectora dentro de su cosmología. Para escapar al etnocentrismo de esta dicotomía, parece preferible plegarse hacia una distinción menos cargada de implicaciones filosóficas, morales y epistemológicas; aquellas entre humanos y no-humanos”. Descola, P. (2002). La antropología y la cuestión de la naturaleza. En Palacio, G. & Ulloa, A. (Eds.). *Repensando la naturaleza. Encuentros y desencuentros disciplinarios en torno a lo ambiental*. Leticia: Universidad Nacional de Colombia, p. 159.

³⁷ En el libro de Janine Benyus podemos localizar contadas alusiones a las culturas nativas o ancestrales (apenas una mención preliminar a un líder guaraní y escasas referencias a cazadores koyukón, nativos de Alaska o tribus africanas) mientras que abundan los desarrollos provenientes de campos como la biología, agronomía, bioquímica, ingeniería o antropología. A pesar de este llamativo desequilibrio epistemológico, la autora está persuadida de que “los nativos americanos no tendrían inconveniente en aceptar la biomimesis”. Benyus, J. M. (2012). *Biomimesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores, p. 228.

³⁸ Con este concepto J. Derrida expresa sus reservas o, más bien, su distanciamiento en relación con la depuración fenomenológica del ser instanciada por M. Heidegger para alcanzar la cosa misma. Véase al respecto, Derrida, J. (1993). *La deconstrucción en las fronteras de la filosofía. La retirada de la metáfora*. Barcelona: Paidós & Universidad Autónoma de Barcelona.

³⁹ Sandywell, B. (1996). *Reflexivity and the Crisis of Western Reason. Logological Investigations*. London & New York: Routledge, Vol. 1, p. 102.

⁴⁰ M. Heidegger explica en *Ciencia y Meditación* (exposición contenida en *Vortrage und Aufsätze*) el modo en que se transformado el significado de *theoria* a lo largo del tiempo, desde sus orígenes en los que se pone el énfasis en identificar las causas de lo que se nos hace presente hasta desembocar en una idea de contemplación en la que se incluye la separación de la cosa para situarla en un marco ontológico mensurable de seguridad. De ahí que Heidegger asocie esta última acepción a la ciencia y haga referencia al dictum de Max Planck: “Es real lo que se deja medir”. Heidegger, M. (1997). *Filosofía, ciencia y técnica*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria, pp. 149-181.

⁴¹ Véase al respecto, Koller, H. (1980). Mimesis. En Ritter, J., Grunder, K. y Gabriel, G. (eds.). *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Vol. 5, pp. 1996-1999. Darmstadt: Schwabe; Koller, H. (1954). *Die Mimesis in der Antike*. Bern: Francke.

⁴² Else, G. F. (1958). Imitation in the Fifth Century. *Classical Philology*, LIII (2), 73-90.

⁴³ Halliwell, S. (2002). *The Aesthetics of Mimesis. Ancient Texts and Modern Problems*. Princeton-Oxford: Princeton University Press.

⁴⁴ El término procede de los estudios sobre la articulación del pasado, presente y futuro desarrollados por el historiador francés François Hartog. Véase al respecto, Hartog, F. (2007). *Regímenes de historicidad: presentismo y experiencias del tiempo*. México D. F.: Universidad Iberoamericana.

⁴⁵ Block, V. & Gremmen, B. (2016). Ecological Innovation: Biomimicry as a New Way of Thinking and Acting Ecologically. *J Agric Environ Ethics*, 29:203–217.

⁴⁶ Lacoue-Labarthe, P. (1990). *Heidegger, art and politics*. Oxford: Basil Blackwell Inc; Lacoue-Labarthe, P. (1998). *Typography*. Stanford: Stanford UP.

⁴⁷ “Lacoue-Labarthe conceptualiza esta relación entre *techne* y *phusis* en términos de una suplementariedad original. La *techne* aporta algo nuevo al proceso mimético de la naturaleza. Se trata de un suplemento, y solo este suplemento tecnológico proporciona acceso a la *phusis* y se constituye en el origen de la *mimesis* porque, de acuerdo a Lacoue-Labarthe, la perfección de la *phusis* por la acción de la *techne* implica una deficiencia en la naturaleza. La naturaleza es deficiente porque no puede producir todo y tiene que ser perfeccionada por la tecnología”. Block, V. & Gremmen, B. (2016). Ecological Innovation: Biomimicry as a New Way of Thinking and Acting Ecologically. *J Agric Environ Ethics*, 29:203–217 (traducción del autor).

⁴⁸ Véase al respecto, Suñol, V. (2012). *Más allá del arte: mimesis en Aristóteles*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

⁴⁹ Auerbach, E. (2006). *Mimesis: la representación de la realidad en la literatura occidental*. México: Fondo de Cultura Económica.

⁵⁰ La consideración de la *mimesis* como un acto cognoscitivo de carácter creativo está presente, con un tratamiento más o menos extenso, en varias obras de P. Ricoeur. Con todo, cabría resaltar dos trabajos concretos: Ricoeur, P. (1980). *La metáfora viva*. Madrid: Ediciones Cristiandad; Ricoeur, P. (1982). “Mimesis and représentation”. *Actes du XVIII Congrès des Sociétés de Philosophie de langue française*. Paris: Association des Publications près les Universités de Strasbourg, pp. 51-63.

⁵¹ Esta diversidad semántica permite concluir a V. Suñol que el término *mimesis* es un instrumento útil para la construcción de analogías. Suñol, V. (2012). *Más allá del arte: mimesis en Aristóteles*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

⁵² La inmersión por parte de Hans Blumenberg en los procesos de construcción de los conceptos y en el estudio del papel de la metáfora en la historia de la ciencia ha sido abordado en diversas obras. Blumenberg, H. (2003). *Paradigmas para una metaforología*. Madrid: Trotta; Blumenberg, H. (2000). *La legibilidad del mundo*. Barcelona: Paidós; Blumenberg, H. (1999). *Las realidades en que vivimos*. Barcelona: Paidós.

⁵³ Black, M. (1966). *Modelos y Metáforas*. Madrid: Tecnos; Hesse, M. (1966). *Models and Analogies in Science*. Notre Dame: University of Notre Dame Press. En este campo, cabe añadir también autores posteriores como D. Bailer-Jones, A. I. Miller, A. Rivadulla,

⁵⁴ Este amplio espectro de nociones de procedencia tecnológica para determinar el orden natural ha sido extraído de una revisión extensiva de la obra de J. Benyus.

⁵⁵ Benyus, J. M. (2012). *Biomimesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores, p. 17.

⁵⁶ El principio transformista o de transmutación de las especies vino a quebrantar durante el siglo XIX, gracias a los avances y descubrimientos en los campos de la anatomía comparada, la embriología y la paleontología, la hipótesis fijista con la que se contemplaba tradicionalmente la naturaleza. En esencia, la tesis transformista prueba la existencia de cambios de una especie a otra desde las formas orgánicas más simples mediante medios y procesos naturales. Este principio epistémico, que es formulado básicamente por Jean-Baptiste Lamarck en 1809 (en su obra *Filosofía Zoológica*), ejercerá una influencia decisiva en la creación del modelo evolutivo darwiniano.

⁵⁷ A pesar de que la formulación canónica del programa adaptacionista es completada por A. R. Wallace en 1889 (en su obra *Darwinism: an exposition of the theory of natural selection with some of its applications*) será posteriormente, durante el siglo XX y en parte debido a la recepción y acomodamiento teórico de las observaciones impulsadas desde la ecología, cuando alcance una consolidación definitiva (con autores paradigmáticos como J. M. Smith, W.D. Hamilton, R. Dawkins y D. Dennett). A grandes rasgos, cabe resumir este enfoque a través de la convergencia de dos ideas centrales: los cambios adaptativos que se producen en los rasgos morfológicos y comportamentales de los seres vivos se deben predominantemente por la acción de la selección natural. Por otro lado,

está el principio de utilidad como vía comprensiva para atribuir valor a las estructuras orgánicas. Una muy recomendable introducción a la historia del programa adaptacionista lo encontramos en Caponi, G. (2011). Las raíces del programa adaptacionista. *Scientiae Studia*, v. 9, n. 4, pp. 705-738.

⁵⁸ “*This mechanism being observed (it requires indeed an examination of the instrument, and perhaps some previous knowledge of the subject, to perceive and understand it; but being once, as we have said, observed and understood), the inference, we think, is inevitable; that the watch must have had a maker; that there must have existed, at some time and at some place or other, an artificer or artificers who formed it for the purpose which we find it actually to answer; who comprehended its construction, and designed its use*”. Paley, W. (2006). *Natural Theology or Evidence of the Existence and Attributes of the Deity, collected from the appearances of nature*. Oxford: Oxford University Press, p. 8.

⁵⁹ El cristianismo crítico aborda el hecho evolutivo saliéndose de las perspectivas finalistas y de las contingenciales clásicas, dejando constancia de la autonomía del proceso cósmico en conjunción con la libertad humana y con la existencia de un *Deus absconditus*. Aquí puede encajar, claro está, los planteamientos de Philip Hefner asociados al paradigma del naturalismo religioso o el principio antrópico cristiano de George F. R. Ellis y el diseño kenótico del universo. Es decir, que la divinidad renuncia a imponer su presencia en el mundo para garantizar el libre albedrío. Véase al respecto, Hefner, P. (2008). *Religion-and-Science as Spiritual Quest for Meaning*. Ontario: Pandora Press; Ellis, G. F. R. (ed.) (2002). *The far-future universe: eschatology from a cosmic perspective*. Philadelphia & London: Templeton Foundation Press.

⁶⁰ Fundamentalmente, corresponde al botánico francés Frédéric Gérard el mérito de introducir la hipótesis de la transformación orgánica en su obra *Théorie de l'évolution des formes organiques* (1841-49), aunque cabe identificar modelos evolutivos pre-darwinianos en los trabajos de G. Cuvier, E. G. Saint-Hilaire o Heinrich-Georg Bronn.

⁶¹ “*Ya sea el águila en pleno vuelo o la flor de manzano abierta, el incesante trabajo de los caballos, el cisne alegre, la ramificación del roble, el arroyo que serpentea en su base, las nubes a la deriva, sobre todo el sol que cursa, la forma sigue a la función, y esta es la ley. Dónde la función no cambia, la forma no cambia. (...) Es la ley que prevalece a todas las cosas orgánicas e inorgánicas, de todas las cosas físicas y metafísicas, de todas las cosas humanas y todas las cosas sobrehumanas, de todas las verdaderas manifestaciones de la cabeza, del corazón, del alma, que la vida es reconocible en su expresión, que forma siempre sigue a la función*”. Sullivan, L. H. (1896). The Tall Office Building Artistically Considered. *Lippincott's Magazine*, pp. 403-409.

⁶² Este término es introducido en el texto con la acepción empleada por el filósofo alemán Peter Sloterdijk, esto es, como un concepto que permite comprender, frente a la vieja ontología de la materia o a la metafísica clásica, las nuevas tipologías tecnológicas que emergen en el campo de las biotecnologías y nootecnologías en este periodo civilizatorio “post-humanista”. Se trata de nuevos modelos operativos no dominantes que son eficaces en su desarrollo sin generar un efecto transgresivo sobre los entes. El resultado de esta nueva etapa de avance tecnológico no contrapuesta a la naturaleza y alejada de toda pretensión cosificadora llevará, según Sloterdijk, a un nuevo paradigma operacional emancipatorio. Véase al respecto, Sloterdijk, P. (2001). *El hombre operable. Notas sobre el estado ético de la tecnología génica*. En: <http://www.revista-artefacto.com.ar/revista/nota/?p=91>.

⁶³ Se trata de una referencia explícita al conocido personaje de *Cándido o el optimismo* (*Candide, ou l'Optimisme*), cuento filosófico del escritor ilustrado francés Voltaire. El Doctor Pangloss, que representa de manera satírica y caricaturista la filosofía de Gottfried Wilhelm Leibniz, asume una cosmovisión en la que todo suceso ocurre por un propósito determinado, ya que “*las cosas no pueden ser de otra forma: todo tiene una finalidad y todo está hecho necesariamente para el mejor fin. Nótese atentamente que las narices han sido hechas para llevar gafas y por ello tenemos gafas. Los pies han sido instituidos visiblemente para ir calzados y por este motivo tenemos zapatos*” (capítulo 1). El paleontólogo Stephen J. Gould y el biólogo evolutivo Richard Lewontin trasladan esta perspectiva al programa adaptacionista en su celeberrimo artículo de 1979, *The Spandrels of San Marco and the*

Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. *Proceedings of the Royal Society B*, 205, pp. 581-598.

⁶⁴ Gould, S. J. & Lewontin, R. (1979). The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. *Proceedings of the Royal Society B*, 205, p. 581.

⁶⁵ Método utilizado especialmente en el campo de la ingeniería de las proteínas y en la biotecnología basado en la imitación del mecanismo de la selección natural con el propósito de orientar o conducir la evolución de proteínas o ácidos nucleicos hacia objetivos definidos.

⁶⁶ Benyus, J. M. (2012). *Biomimesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores, p. 260.

⁶⁷ Al parecer, fue el biólogo británico Colin Pittendrigh, fundador junto con Jürgen Aschoff y Erwin Bünning de la cronobiología, quien primero utilizó el término de teleonomía- “Adaptation, natural selection, and behavior”, en Roe, A. & Simpson, G. G. (Eds.). (1958). *Behavior and Evolution*. New Haven: Yale University Press, p. 394 -, situando a partir de entonces el debate en el campo de la biología sobre la finalidad en la naturaleza (aspecto éste que se remonta hasta Aristóteles) bajo unas coordenadas epistemológicas distintas.

⁶⁸ Suess, E. (1885–1909). *Das Antlitz der Erde*. Prag, Wien & Leipzig: Tempsky & Freytag.

⁶⁹ Vernadsky, V. I. (1998). *The biosphere*. New York: Springer-Verlag.

⁷⁰ Lovelock, J. E. (1985). *Gaia: A New Look at Life on Earth*. Oxford: Oxford University Press.

⁷¹ Latour, B. (2004). *Politics of Nature: How to Bring the Sciences into Democracy*. Cambridge, MA: Harvard University Press

⁷² Morton, T. (2007). *Ecology without Nature*. Cambridge: Harvard University Press.

⁷³ Žižek, S. (2002). *Looking Awry: An Introduction to Jacques Lacan through Popular Culture*. Cambridge: M.I.T. Press.

⁷⁴ Swyngedouw, E. (2007). *The Post-Political City. Urban Politics Now. Re-imagining Democracy in the Neoliberal City*. Rotterdam: Netherlands Architecture Institute NAI Publishers.

⁷⁵ Stavrakakis, Y. (2000). On the Emergence of Green Ideology: The Dislocation factor in Green Politics. In Howarth, D; Norval, A. J. & Stavrakakis, Y. (Eds.) *Discourse Theory and Political Analysis-Identities, Hegemonies and Social Change*. Manchester: Manchester University Press, pp. 100-118.

⁷⁶ Ellen, R. & Fukui, K. (Eds.) (1996). *Redefining Nature: Ecology, Culture and Domestication*. Oxford & Washington: Berg.

⁷⁷ Helmreich, S. (1998). *Silicon second nature: culturing artificial life in a digital world*. Berkeley & London: University of California Press; Helmreich, S. (2008). Species of biocapital. *Science as Culture*, 17:4, pp. 463-478.

⁷⁸ Schyfter, P. 2013. How a ‘drive to make’ shapes synthetic biology. *Studies in History and Philosophy of Science*, 44:4, pp. 632-640.

⁷⁹ Roosth, S. (2017). *Synthetic: how life got made*. Chicago: University of Chicago Press.

⁸⁰ Nicolson, M. H. (2011). *Mountain Gloom and Mountain Glory*. Seattle: University of Washington Press.

⁸¹ El sociólogo Frans C. Verhagen nos desvela que la metáfora que vincula la naturaleza con un laboratorio o una factoría no es de nuevo cuño cuando nos remite a la fantasía profética que el biólogo Hermann Renheimer evocaba en 1910: “*Hablando desde un punto de vista bioeconómico, es un deber del mundo de las plantas fabricar el alimento para su complemento, el mundo animal... todos los días, desde el amanecer hasta la puesta de sol, miles de laboratorios, fábricas, talleres e industrias de plantas en todo el mundo hacen su contribución al fondo general de la riqueza orgánica*”. Reinheimer, H. (1910). *Survival and Reproduction: A New Biological Outlook*. London: John M. Watkins.

⁸² Rosen relativiza de modo muy consistente y con multiplicidad de ejemplos históricos la novedad del enfoque biomimético y de propuestas afines al encuadrarlas en una larga tradición en el campo de la biología que aspira a simular, en términos reduccionistas, el comportamiento de los

organismos. Véase al respecto, Rosen, R. (2000). *Essays on Life Itself*. New York: Columbia University Press.

⁸³ “*This is the other side of the coin of the mechanistic view, the side that has dominated much of our management of natural resources and the environment in the twentieth century. Not only has it been customary to use civil-engineering approaches to environmental issues, but it is consistent with the mechanistic perception of nature that, as a machine, nature is better improved by using novel engineering devices than by employing organic approaches. This point of view is consistent with much of our attitude toward the development of land and resources*”. Botkin, D. B. (2012). *The Moon in the Nautilus Shell. Discordant Harmonies reconsidered from climate change to species extinction, how life persists in an ever-changing world*. Oxford & New York: Oxford University Press, p. 147.

⁸⁴ “*Si bien la conquista de la naturaleza a un nivel puramente físico fue una proeza física menor que cualquier forma de victoria militar -por lo menos hasta que esta conquista comenzó a tener, en el siglo XIX, un efecto disruptor sobre el equilibrio ecológico de todos los organismos, incluyendo al hombre-, sus principales exponentes fueron cayendo presa de las mismas ambiciones, los mismos impulsos y, de hecho, las mismas compulsiones neuróticas que tienden a sacrificar cualquier otra justificación de la vida en pro de la demostración de poder*”. Mumford, L. (2016). *El pentágono del poder. El mito de la máquina*. Logroño: Pepitas de Calabaza, p. 193.

⁸⁵ “*El centro de gravedad del desarrollo técnico esté en su condicionamiento económico; sin el cálculo racional como base de la economía y, por consiguiente, sin las condiciones histórico-económicas en extremo concretas, tampoco hubiera surgido la técnica racional*”. Weber, M. (1983). *Economía y Sociedad*. México D. F.: Fondo de Cultura Económica, p. 49.

⁸⁶ “*La homeotecnología, al tener que vérselas con información realmente existente, no hace más que avanzar en el camino de la no-violación de los entes; gana en inteligencia inteligentemente, creando así nuevos estados de inteligencia. Toma en cuenta las cualidades de los cuerpos. Debe apoyarse en estrategias cointeligentes, coinformativas, incluso allí donde se aplica egoísta y regionalmente como ocurre en las tecnologías convencionales*”. Sloterdijk, P. (2001). *El hombre operable. Notas sobre el estado ético de la tecnología génica*. En: <http://www.revista-artefacto.com.ar/revista/nota/?p=91>.

⁸⁷ Blok, V. & Gremmen, B. (2018). Agricultural technologies as Living Machines: toward a biomimetic conceptualization of Smart Farming Technologies. *Ethics, Policy & Environment*, 21:2, p. 251.

⁸⁸ Blok, V. & Gremmen, B. (2016). Ecological innovation: Biomimicry as a new way of Thinking and Acting Ecologically. *J Agric Environ Ethics* (2016) 29, p. 213.

⁸⁹ “*[N]o hay razón para que no podamos crear humanos con la visión de un balcón, el oído y el olfato de un perro, el sónar de un murciélago, el equilibrio y la gracia de un gato, la velocidad de un guepardo e incluso la capacidad de generar energía mediante la fotosíntesis a partir de la luz del Sol. No hay razón, en principio, por la que los “posthumanos” no puedan beneficiarse de los genes del reino de los seres vivos*”. Savulescu, J. (2012). *¿Decisiones peligrosas? Una bioética desafiante*. Madrid: Tecnos, p. 263.

⁹⁰ Cabe definir el posthumanismo como una corriente de pensamiento, más o menos coherente en su discurso, integrado por múltiples científicos y filósofos que apoya el empleo de las nuevas ciencias y tecnologías para mejorar las capacidades mentales y físicas con el objeto de corregir lo que considera aspectos indeseables e innecesarios de la condición humana, como el sufrimiento, la enfermedad, el envejecimiento o incluso en última instancia la mortalidad. De entre sus más destacados representantes podemos destacar a Raymond Kurzweil, Natasha Vita-More, Hans Moravec, Max More, Nick Bostrom o David Pearce.

⁹¹ Véase al respecto, Kurzweil, R. (2005). *The Singularity Is Near*. New York: Viking.

⁹² Véase al respecto, Ordine, N. (2013). *La utilidad de lo inútil*. Barcelona: Acantilado.

BIBLIOGRAFÍA

- ARISTÓTELES (1995). *Física*. Madrid: Gredos.
- AUERBACH, E. (2006). *Mimesis: la representación de la realidad en la literatura occidental*. México: Fondo de Cultura Económica.
- BACON, F. (2006). *Nueva Atlántida*. Madrid: Akal.
- Benyus, J. M. (2012). *Biomimesis. Innovaciones inspiradas por la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores.
- BLOK, V. & GREMMEN, B. (2016). Ecological innovation: Biomimicry as a new way of Thinking and Acting Ecologically. *J Agric Environ Ethics* (2016) 29:203–217.
- BLOK, V. (2017). Earthing Technology: towards an Eco-centric concept of Biomimetic Technologies in the Anthropocene. *Techné: Research in Philosophy and Technology*, 21, 2/3.
- BLOK, V. & GREMMEN, B. (2018). Agricultural technologies as Living Machines: toward a biomimetic conceptualization of Smart Farming Technologies. *Ethics, Policy & Environment*, 21:2, pp. 246-263.
- BŒUF, G. (2014). Biomimétisme et bio-inspiration. *Vraiment durable*, 5/ 6,(1), pp. 43-55.
- BOTKIN, D. B. (2012). *The Moon in the Nautilus Shell. Discordant Harmonies reconsidered from climate change to species extinction, how life persists in an ever-changing world*. Oxford & New York: Oxford University Press.
- CROWE, N. (1995). *Nature and the Idea of a Man-Made World*. Cambridge: The MIT Press.
- DICKS, H. (2017). Environmental Ethics and Biomimetic Ethics: Nature as Object of Ethics and Nature as Source of Ethics. *J Agric Environ Ethics*, 30: 255.
- FISCH, M. (2017). The Nature of Biomimicry: Toward a Novel Technological Culture. *Science, Technology, & Human Values*, 1-27.
- GALERA GÓMEZ, A. (2010). La omnipresente selección natural. *Endoxa: Series Filosóficas*, nº 24, pp. 47-60.
- GARRELS, S. R. (2011). *Mimesis and Science. Empirical Research on Imitation and the Mimetic Theory of Culture and Religion*. Michigan: Michigan State University.
- GOLDSTEIN, J. & JOHNSON, E. (2015). Biomimicry: New Natures, New Enclosures. *Theory Culture & Society*, 32(1), pp. 61-81.
- GOULD, J. S. & LEWONTIN, R. C. (1979). The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, 205, pp. 581-598.
- HAKEN, H.; KARLQVIST, A. & SVEDIN, U. (Eds.) (1993). *The Machine as Metaphor and Tool*. Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag.
- HALLIWELL, S. (2002). *The Aesthetics of Mimesis. Ancient Texts and Modern Problems*. Princeton-Oxford: Princeton University Press.
- HALLYN, F. (2000). *Metaphor and Analogy in the Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- JASPERS, K. (2017). *Origen y meta de la historia*. Barcelona: Acantilado.
- KEATS, J. (2017). *The Reciprocal Biomimicry Initiative*. San Francisco: Blurb.
- LAKHTAKIA, A. & MARTÍN-PALMA, R. J. (Eds.) (2013). *Engineered Biomimicry*. Oxford & Amsterdam: Elsevier.
- LATOUR, B (2004). *Politics of Nature: How to Bring the Sciences into Democracy*. Cambrid-

- ge, MA: Harvard University Press.
- LEVINS, R. & LEWONTIN, R. C. (1994). Holism and reductionism in ecology. *Capitalism Nature Socialism*, 5:4, pp. 33-40.
- MAASEN, S.; MENDELSON, E. & WEINGART, P. (Eds.) (1995). *Biology as Society. Society as Biology: metaphors*. Dordrecht: Kluwer.
- MARAN, T. (2017). *Mimicry and Meaning: Structure and Semiotics of Biological Mimicry*. Switzerland: Springer.
- MARSHALL, A. & LOZEVA, S. (2009). Questioning the Theory and Practice of Biomimicry. *Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 4, No. 1, 1-10.
- MARTÍNEZ SÁNCHEZ, A. (2006). Invención y realidad. La noción de mimesis como imitación creadora en Paul Ricœur. *Diánoia*, volumen LI, número 57, pp. 131-166.
- MATHEWS, F. (2011). Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry. *Organization and Environment*, 24, 4, pp. 364-387.
- MUMFORD, L. (2016). *El pentágono del poder. El mito de la máquina*. Logroño: Pepitas de Calabaza.
- PITROU, P.; DALSUET, A. & HURAND, B. (2015). Modélisation, construction et imitation des processus vitaux. Approche pluridisciplinaire du biomimétisme. *Natures Sciences Sociétés*, Volume 23, Number 4, pp. 380-388.
- ROOSTH, S. (2017). *Synthetic: how life got made*. Chicago: University of Chicago Press.
- ROSEN, R. (2000). *Essays on Life Itself*. New York: Columbia University Press.
- SEGERSTRÅLE, U. (2000). *Defenders of the truth. The battle for science in the sociobiology debate and beyond*. Oxford: Oxford University Press.
- SIERRA, C. H. & KUIRU, N. (2014). Biomimesis: nuevos horizontes de sostenibilidad y tendencias globales de la praxis tecno-científica en el mundo contemporáneo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, vol. 5, n° 2, pp. 85-98.
- SOAR, R. C. & TURNER, S. (2008). Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building. *Proceedings of 1st International Conference on Industrialized, Intelligent Construction*.
- SUESS, E. (1923-1930) *La Faz de la Tierra*. Versión española de Pedro de Novo y F. Chicharro. Madrid. Imprenta R. Velasco, 4 vols.
- SUÑOL, V. (2012). *Más allá del arte: mimesis en Aristóteles*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- SWIEGERS, G. F. (Ed.) (2012). *Bioinspiration and Biomimicry in Chemistry. Reverse-Engineering Nature*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- TREPL, L. & VOIGT, A. The Classical Holism-Reductionism debate in Ecology. In SCHWARZ, A. & JAX, K. (Eds.). *Ecology Revisited. Reflecting on Concepts, Advancing Science*. Heidelberg, London & New York: Springer.
- VERHAGEN, F. C. (2008). Worldviews and Metaphors in the Human-Nature Relationship. *Language & Ecology*, vol. 2, no. 3.
- VERNADSKY, V. I. (1998). *The biosphere*. New York: Springer-Verlag.
- WILLIAMS, G. C. (1996). *Adaptation and Natural Selection. A critique of some current Evolutionary Thought*. Princeton: Princeton University Press.
- WOSTER, D. (1983). *The Wealth of Nature. Environmental History and the Ecological Imagination*. New York & Oxford: Oxford University Press.