
CATEGORIZACIÓN DE FACTORES BIOMIMÉTICOS: ENFOQUES PARA UNA BASE CONCEPTUAL EN DISEÑO SOSTENIBLE, REVISIÓN DE LITERATURA

ANDREA LLORENS VARGAS Y BERNABÉ HERNANDIS ORTUÑO

RESUMEN

Estudiar e imitar la naturaleza constituye un componente distintivo que promueve el desarrollo de soluciones innovadoras, respetuosas del medio ambiente. La biomimesis es la disciplina que busca, con un enfoque metodológico, aprender, imitar e inspirarse en las lecciones biológicas inherentes a los organismos vivos, con el propósito de resolver problemas humanos y desarrollar tecnologías y soluciones más eficientes y sostenibles.

En ese contexto, este estudio tuvo como objetivo identificar, mediante una exhaustiva revisión de literatura, la aplicación de aquellas dimensiones biomiméticas, ya establecidas por otros autores previamente: Forma, Material, Estructura/Construcción, Proceso/Transformación y Función/Estrategia. Asimismo, examinar la inclusión de la dimensión de Geometría, Orden, Organización, como parte de la metodología biomimética. Además, identificar y categorizar Factores o Conceptos asociados a cada dimensión,

creando así, un mapa conceptual biomimético. El método utilizado implicó un análisis cualitativo de artículos de investigación relevantes, aplicando previamente criterios de inclusión y exclusión. Como resultado, fueron seleccionados 33 estudios, los cuales se organizaron en una matriz numerada para facilitar su comprensión y referencia. Otros hallazgos revelaron que, la mayoría de los autores aplicaron, como metodología, las dimensiones mencionadas y la dimensión Geometría, Orden, Organización, con una frecuencia significativa en la imitación de la naturaleza. Además, se identificaron y categorizaron una amplia gama de Factores y Conceptos biomiméticos en función de su frecuencia y relevancia para cada dimensión analizada. El estudio concluye que la biomimética ofrece perspectivas y modelos valiosos para prácticas de diseño sostenible, destacando su potencial para impulsar la innovación y abordar desafíos complejos.

Introducción

 Desde siempre el mundo natural ha sido observado, más allá de ser una fuente de recursos, como modelo de inspiración, técnica y expresiva (Grijalva, 2018) para desvelar conceptos y diseños útiles al ser

humano y su entorno artificial. Como una perspectiva para generar ideas, surge la biomimesis o biomimética, la disciplina que busca entender, aprender, imitar e inspirarse en la naturaleza para resolver problemas y diseñar tecnologías más eficientes y sostenibles (Di Bartolo, 1994), pues es indudable que, las capacidades de la naturaleza son muy superiores en

muchas áreas a las capacidades humanas (Bar-Cohen, 2005). El concepto tiene raíces históricas, desde la antigüedad, cuando los humanos estudiaban los animales y las plantas para obtener conocimiento y soluciones a problemas cotidianos (Gagliano, 2013). La biomimesis moderna es interdisciplinaria, la cual abarca la biología, la física, la química, la

PALABRAS CLAVE / Biomimesis / Biomimética / Diseño Inspirado en la Naturaleza / Diseño Sostenible/ Modelos Biológicos /

Recibido: 23/06/2023. Modificado: 14/08/2023. Aceptado: 16/08/2023.

Andrea Llorens Vargas (Autora para correspondencia). Magister en Construcción en Madera, Universidad del Bío-Bío (UBioBio), Chile. Candidata a Doctora en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV-ETSII), España. Académica, Departamento Comunicación Visual, UBioBio, Chile. Dirección: Avda. Andrés Bello 720, Chillán, Chile. e-mail: allorems@ubiobio.cl.

Bernabé Hernandis Ortuño. Ph.D. en Ingeniería en Organización Industrial, Universitat Politècnica de València (UPV), España. Profesor titular, Catedrático e Investigador, Departamento de Expresión Gráfica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, (UPV-ETSII). España. IGD-Grupo de Investigación en Gestión del Diseño, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (UPV-ETSID), España.

medicina, la agricultura, la ingeniería, el diseño y otras áreas relacionadas (Quinn y Gaughran, 2010). El término biomimesis fue acuñado por primera vez por Otto H. Schmitt (Schmitt, 1969), derivado del griego antiguo (bios) vida, y (mímesis) imitación, para describir la reflexión, los conocimientos y la emulación junto a los métodos, mecanismos y procesos observados en la naturaleza. En los años noventa, la bióloga estadounidense Janine Benyus lo rehabilitó, en su libro "Biomimicry: Innovation Inspired by Nature". En él, Benyus explora cómo la naturaleza ha resuelto problemas y ha diseñado soluciones a lo largo de millones de años de evolución (Benyus, 1997). Según Benyus (2002), la biomimesis consigue inspirar innovaciones eficientes y sostenibles a largo plazo, al tiempo que reducen el impacto ambiental y promueven la salud humana, para poder encontrar soluciones eficaces para que el ser humano pueda sobrevivir en el planeta, aumentar el propio confort y la calidad de vida (Alexandridis *et al.*, 2016). La biomimesis ha sido aprovechada ampliamente y su aplicación ha llevado a importantes avances tecnológicos que han colaborado en el desarrollo de la civilización (Pawlyn, 2011; Collado, 2016). Por ejemplo, la creación de materiales superhidrófobos basados en la hoja de loto, pueden tener aplicaciones en la industria y la medicina (Barthlott y Neinhuis, 1997), edificios con sistemas de ventilación inspirados en los nidos de termitas y la obtención de energía a partir de la fotosíntesis artificial, son algunos ejemplos de aplicaciones de la biomimesis (Mann, 2012). Es así que, la biomimesis busca la inspiración e imitación en lo natural (Benyus, 1997; Rocha, 2010), un método por medio del cual, los diseñadores e ingenieros hacen investigaciones biológicas con el propósito de determinar cómo los organismos resuelven problemas complejos (Rangel *et al.*, 2012; Chiras, 1992; Bar-Cohen 2005, 2006), y de este modo concebir conocimiento, generar ideas y encontrar soluciones innovadoras, apreciando el valor intrínseco de la naturaleza durante todo el proceso de aprendizaje (Stevens *et al.*, 2019). Asimismo, la observación, análisis y experimentación, es clave en la comprensión de los procesos biológicos, pues, no se trata de copiar a la naturaleza, sino imitarla, buscar analogías y abstraer conceptos e ideas (López-Forniés y Berges-Muro, 2014). De este modo, las soluciones materiales basadas en la orientación biomimética buscan concientizar, sensibilizar e integrar respuestas bioalfabetizadoras fundadas desde el modelo inter-sistémico de la naturaleza

(Collado-Ruano, 2017), cuyo procedimiento y aprendizaje empírico utiliza como método sustancial, el raciocinio analógico. Entendido este razonamiento por analogía, como la transferencia de información relacional desde un dominio a otro (Rao, 2003) así, captar la semejanza congruente y estructural entre diferentes contextos, y luego, sintetizar y contrastar la información de manera flexible, para nuevos conocimientos y aplicaciones (Merino, 2015). Otro de los cometidos fundamentales de la biomimesis es la identificación de patrones y procesos que ocurren en la naturaleza los cuales pueden ser de los ámbitos físicos, químicos, biológicos u organizativos, y su imitación puede llevar a soluciones innovadoras a problemas que enfrenta la sociedad (Benyus, 1997) así como, la identificación de principios presentes en la naturaleza tales como la eficiencia energética, la economía, la organización y la adaptabilidad los que se aplican en el diseño de tecnologías para lograr resultados más sostenibles y eficientes (Hesselberg, 2012). Lo anterior, se conjuga fundamentalmente con la colaboración interdisciplinaria, la que incluye a expertos que trabajan juntos para identificar y aplicar principios de diseño y patrones presentes en la naturaleza. Precisamente en la creación de su entorno artificial, el hombre ha continuamente imitado estructuras, formas, proporciones geométricas, colores, ritmos, simetrías, materiales, funciones de los organismos biológicos con diferentes finalidades (Mele, 2018) y aplicado en diversas áreas. Di Bartolo (2000) aclara que se deben evitar las sugerencias formales y apunta a la recogida de datos estructurales, funcionales o de procesos en el momento de la investigación y su aplicación en la producción de lo artificial. Stevens (1995), examina estrategias morfológicas, patrones, diseños y formas, que evolucionan, logrando configuraciones más adaptadas al medio, con el menor gasto de energía posible, también, parámetros, características geométricas, texturas y estructuras que rigen el mundo natural, las cuales pueden ser imitadas y combinadas como eficientes distribuciones de la materia en el espacio para alcanzar entornos artificiales coherentes y sostenibles (Stevens, 1995). Lodato (2000) por su parte, refiere a la biomimética en relación con la transformación técnica y la aplicación de estructuras, métodos y principios evolutivos procedentes de sistemas biológicos. En consecuencia, la biomimesis busca emular los patrones usados por los organismos vivos, no solo en aspectos morfológicos sino en sus modelos estratégicos,

organizativos y de proceso (Biomimicry toolbox, 2015).

Se ha expuesto hasta ahora las formas, procesos, estructuras, patrones de los organismos naturales y cómo se relacionan para diseñar lo artificial, imitando lo natural. Para lograr una adopción del método biomimético más generalizado entre las distintas disciplinas, es necesaria la existencia de un marco claramente definido para comprender las diferentes maneras y condiciones en que se puede aplicar en el contexto de un proyecto de diseño (Goss, 2009). Para ello, algunos autores han desarrollado una metodología útil, con el fin de verificar cómo la biomimética puede funcionar práctica y sistemáticamente en el proceso de diseño y precisar su potencial como herramienta para aumentar la capacidad regenerativa del entorno construido (Pedersen, 2007). Janine Benyus en su libro de 1997, presenta un enfoque en el cual divide en tres niveles el abordaje del mimetismo para mejorar la sostenibilidad estos son: Forma (organismo), Proceso (comportamiento) y Ecosistema (contexto biológico), los cuales proporcionan un marco a los diseñadores para identificar qué enfoque tomar, o bien, qué aspecto de la *biografía*, imitar (Pedersen y Storey, 2007). Posteriormente, Pedersen Zari (2007), recupera esta división proponiendo un marco de mayor alcance, para una mejor comprensión de la aplicación de la biomimética, redefiniendo estos diferentes niveles como una metodología para identificar un enfoque efectivo a seguir. El nivel de organismo, refiere a una planta o animal en específico, pudiendo imitar parte o todo el organismo; el segundo nivel del comportamiento, traduce el aspecto de cómo procede un organismo o se relaciona con un contexto más amplio y el tercer nivel es la imitación de hábitats completos y los principios comunes que permiten que funcionen con éxito. Dentro de cada uno de estos niveles, complementa con otras cinco dimensiones del mimetismo, esto es, en términos de cómo se ve (forma), de qué está hecho (material), cómo está hecho (estructura), cómo funciona (proceso) o qué es capaz de hacer (función). El nuevo enfoque ampliado de Pedersen Zari, queda resumido en la Tabla I, sin embargo, cuando se requiere aplicar la biomimesis, existen otros puntos de vista, que pueden perfeccionar y optimizar la imitación de un sistema biológico en el diseño de una solución artificial al incorporar nuevos rasgos a identificar. Además de los niveles y dimensiones mencionados, la naturaleza también ofrece una gran cantidad de patrones y condiciones de organización identificables e imitables

(Vincent, 2009). En este sentido, Stevens (1974), explora los modelos universales con que se expresa la naturaleza, expone la observación de lo natural desde su orden, armonías, geometría, revelando una abrumadora diversidad que la hacen única y sublime, de lo cual la biomimética pudiera imitar. Del mismo modo Grijalva (2018), expone sobre el enorme potencial que la observación, de principios matemáticos, de proporcionalidad, de geometrías que aprovechan mejor el espacio y el material, del número áureo, permiten otorgar lecciones de organización con un impecable criterio de eficiencia y una lógica de optimización, que pueden ser abstraídas de la naturaleza y ser aplicados a diseños artificiales. Por consiguiente, la geometría, el orden y la organización de los sistemas naturales, desde el nivel molecular hasta el nivel ecosistémico, son factores importantes a considerar en la biomimesis, pues pueden proporcionar un modelo para la organización de los sistemas humanos y pueden inspirar soluciones técnicas inéditas.

Este estudio, se ha enfocado por una parte, en comprobar la importancia y la significación que debiera tener la incorporación de la Dimensión *Orden, Organización, Geometría* en el marco para aplicación metodológica de la biomimesis (ya desarrollada por Benyus y Pedersen Zari, Tabla I), junto a las dimensiones *Forma, Material, Estructura/Construcción, Proceso/Transformación, Función/Estrategia*, ya que supone un modelo biológico cuya trascendencia es plausible de ser considerada. Así como también, reafirmar estas dimensiones midiendo la frecuencia en que son

utilizadas por los autores y, por otro lado, identificar aquellos factores o conceptos asociados a cada una de las dimensiones ya enunciadas, y que hasta ahora no se han categorizado a la manera de un mapeo conceptual biomimético pudiendo ser una herramienta valiosa para los diseñadores al utilizar esta metodología en el logro de un Diseño Sostenible. Esto implica crear soluciones que equilibren las necesidades humanas con la conservación del medio ambiente, promoviendo la durabilidad, eficiencia y responsabilidad en todos los aspectos del proceso de diseño. El objetivo central es demostrar la trascendencia a través de una valoración y examinación en cuanto a la nombradía, utilización y frecuencias de mención, en estudios relevantes, acerca de los temas en búsqueda y mencionados en su medio ambiente, es decir, asociados a biomimética.

Material y Método

Con el fin de llevar a cabo el presente estudio, se efectuó una exhaustiva búsqueda y revisión de literatura científica relacionada con la biomimesis, con el objetivo de identificar hallazgos pertinentes a los términos de interés y su relación con factores o conceptos biomiméticos. La revisión bibliográfica se realizó mediante un enfoque cualitativo, centrándose en el establecimiento de referentes taxativos que contribuyen a la recopilación de una lista íntegra de factores y, o conceptos biomiméticos. Para ello, se empleó un diseño hermenéutico basado en la investigación de la argumentación, el cual permitió analizar tanto artículos

científicos cualitativos como empíricos dentro del ámbito de la bio-investigación, así como tesis y revisiones de literatura relevantes. En el proceso, se seleccionaron rigurosamente los documentos pertinentes considerando su calidad científica y su relevancia para el estudio en cuestión. Se utilizó una combinación de bases de datos académicas y recursos de información especializados, con el objetivo de asegurar una cobertura exhaustiva y actualizada del tema.

Posteriormente, se procedió a la revisión y análisis detallado de los documentos seleccionados, cuya información fue organizada y sintetizada de manera sistemática, permitiendo la identificación de patrones, frecuencias y relaciones entre los diferentes elementos estudiados. Es importante destacar que se realizó un enfoque riguroso en el proceso de búsqueda y revisión de literatura con el objetivo de garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. Se siguieron criterios predefinidos para la inclusión y exclusión de los documentos, y se llevó a cabo una evaluación crítica de la calidad metodológica de cada fuente consultada.

Criterios para la indagación

Se aplicaron criterios de inclusión (publicaciones en revistas académicas o científicas, libros, escritos en español o inglés, términos biomimesis o biomimética en el título, tesis Mg y doctorales, conferencias) y exclusión (informes, ensayos, estudios en idiomas diferentes al español e inglés, estudios en grupos de educación universitaria). A partir de estos criterios, se llevó a cabo una búsqueda amplia con el objetivo de identificar aquellas publicaciones que cumplieran con los criterios de selección establecidos. No se estableció un periodo de tiempo específico para la búsqueda, abarcando desde la aparición del término Biomimesis en 1969 hasta la actualidad. Los participantes del estudio fueron considerados como los autores de las investigaciones examinadas, las cuales fueron seleccionadas como unidades de observación para determinar y analizar el contenido de cada artículo revisado. La búsqueda de la población de referencias para esta investigación se inició utilizando la herramienta de búsqueda de documentos proporcionada por la base de datos *Web of Science*, así como otras fuentes de información como IEEE Xplore, Dialnet, Redalyc, SciELO, Scopus y Google Scholar. Los criterios de selección incluyeron, la revista o conferencia y las áreas temáticas determinadas mediante términos populares y comunes en los títulos. Basándonos en estos criterios, se

TABLA I
MARCO PARA APLICACIÓN METODOLÓGICA DE LA BIOMÓMESIS

Categorías	Dimensiones	Rasgos a identificar
Nivel Organismo (imitar vida o sistema biológico)	Forma	Cómo se ve?
	Material	De qué está hecho?
	Estructura / construcción	Cómo está hecho?
	Proceso / transformación	Cómo funciona
	Función / estrategia	Qué es capaz de hacer?
Nivel Comportamiento (imitar conductas o desempeños)	Forma	Cómo se ve?
	Material	De qué está hecho?
	Estructura / construcción	Cómo está hecho?
	Proceso / transformación	Cómo funciona
	Función / estrategia	Qué es capaz de hacer?
Nivel Eco-sistema (imitar hábitats o biosferas)	Forma	Cómo se ve?
	Material	De qué está hecho?
	Estructura / construcción	Cómo está hecho?
	Proceso / transformación	Cómo funciona
	Función / estrategia	Qué es capaz de hacer?

Fuente: Elaboración propia basada en Pedersen Zari (2007).

distinguieron los artículos de acuerdo con su enfoque temático, lo que incluye el resumen y las palabras clave. Para la búsqueda y selección de los artículos, se establecieron las siguientes palabras clave: varios sinónimos de "biomimético" como términos de búsqueda, incluyendo "biomimética", "biomimético", "biomimesis", "biomimetismo" y "diseño biomimético". El enfoque de este estudio se centró específicamente en la biomimética en diseño y disciplinas relacionadas, por lo que la búsqueda se limitó a artículos de diseño, diseño de productos, diseño de materiales y disciplinas afines. En inglés, se utilizaron términos como *biomimetics*, *biomimetic*, *biomimicry* y *biomimetic design*. Posteriormente, se analizó la base de datos resultante y se evaluaron las áreas temáticas en función de las palabras comunes encontradas en los títulos. Aquellos artículos que no fueron etiquetados como biomiméticos en sus títulos, a pesar de que su contenido podría considerarse claramente biomimético, no se incluyeron en nuestra base de datos, al igual que artículos etiquetados incorrectamente como biomiméticos, a pesar de que su tema no correspondía a dicho campo. Por lo tanto, el enfoque adoptado en este estudio identifica aquellos estudios que han sido etiquetados como biomiméticos en sus títulos, asumiendo que los resultados obtenidos en este conjunto de datos representan fielmente el campo de investigación de la biomimética.

La razón por la cual no se incluyeron los términos "diseño bioinspirado" y *Bio-inspired Design* en la búsqueda, se justifica en mantener un enfoque claro y consistente en el estudio pues al centrarse en terminología específica relacionada con la biomimética, se asegura que los resultados sean más precisos y directamente relevantes para el objetivo del estudio, el cual es explorar la aplicación de la biomimética en el diseño y disciplinas relacionadas. Además, son términos más amplios y pueden abarcar una gama más diversa de contextos no necesariamente limitados al diseño y la biomimética ya que, la inspiración biológica puede aplicarse en muchos campos. Por ejemplo, para el desarrollo de sistemas informáticos, estrategias empresariales, modelos matemáticos, creación artística y la expresión cultural, entre otros.

Identificación de publicaciones

El proceso de selección de publicaciones se inició mediante la búsqueda exploratoria inicial de literatura utilizando las palabras clave previamente establecidas. Como resultado, sin aplicar ningún filtro, se identificaron 2.702

publicaciones relacionadas con el tema en cuestión. En una segunda etapa, se refinó la búsqueda aplicando criterios de selección y filtros temáticos específicos, excluyendo, por ejemplo, odontología, medicina, química, polímeros, metalurgia, biomedicina, entre otras, reduciendo el número de publicaciones a 542. Se realizó un refinamiento adicional de la búsqueda, excluyendo informes, ensayos y tópicos que no estuvieran directamente relacionados con el diseño, materiales, educación, metodología y ecosistemas, resultando 127 publicaciones que cumplían con los criterios de elegibilidad establecidos. Luego de analizar y leer los títulos y resúmenes, se seleccionaron 38 artículos para una lectura completa, para asegurar una selección precisa del tema de investigación. Finalmente, el número de publicaciones consideradas se redujo a 31. El análisis de los artículos se llevó a cabo en varias etapas. Se verificó la mención de las dimensiones *Forma/Material*, *Estructura/Construcción*, *Proceso/Transformación*, *Función/Estrategia* al menos dos veces dentro del texto, de modo de ratificar su utilización por parte de los autores en su aplicación de la metodología biomimética. Se buscó evidencia de que, además de las dimensiones mencionadas, los autores también hacían uso de la *Geometría*, *el Orden y la Organización* en su trabajo de imitación de la naturaleza, nombrándolos al menos dos veces. Luego, el objetivo consistía en realizar un mapeo conceptual biomimético, buscar e identificar factores o conceptos que son de utilidad al momento de imitar lo natural y que pueden ser transferidos al diseño de lo artificial, es decir, verificar si en la metodología biomimética existen hallazgos del uso de factores o conceptos, de modo de poder categorizarlos formalmente. Este proceso garantizó la rigurosidad y la calidad de los artículos considerados en esta revisión, permitiendo un análisis exhaustivo y una base sólida para el estudio en cuestión.

Resultados

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos a partir de la selección y análisis de los artículos incluidos en el estudio, para lo cual, se organizó una matriz numerada (Tabla II) que facilita la comprensión y consulta de los resultados, incluyendo información sobre los autores, título, año de publicación y revista o sitio donde es posible consultarlos. En consecuencia, la matriz quedó conformada por 33 estudios relevantes seleccionados, pues se incluyeron los dos libros mencionados en el apartado introducción (números 1 y 27 de la Tabla II), que, aunque no contienen explícitamente el término

"biomimesis" en sus títulos, son consideradas valiosas herramientas para la metodología de la biomimética. La extracción de datos se llevó a cabo a través de una lectura profunda y análisis riguroso de cada uno de los estudios seleccionados con el objetivo de identificar los conceptos utilizados por los autores en su metodología, desarrollo y visión de la biomimética. Todos estos estudios, en su mayoría asociados al diseño, la innovación y el método biomimético. Los resultados se organizaron en dos etapas. En la primera etapa, se ratificaron los conceptos definidos en las dimensiones utilizadas por los autores en su metodología. Estos conceptos se resumen en la Tabla III, donde se puede observar que casi el cien por ciento de los autores aplican las dimensiones de *Forma*, *Material*, *Estructura/Construcción*, *Proceso/Transformación* y *Función/Estrategia* como método de imitación de la naturaleza. Estos términos se observaron en varias ocasiones dentro de cada uno de los textos revisados. En una segunda instancia, se encontró una evidencia significativa de la inclusión de la *Geometría*, *el Orden y la Organización* en la praxis de la biomimesis, ya que estas dimensiones aparecen con alta frecuencia en la mayoría de los textos revisados. Esto indica que estas dimensiones podrían agregarse a las dimensiones propuestas por Benyus (1997) y Pedersen Zari (2007).

Si bien este objetivo no estaba propuesto, durante la revisión se encontró que los niveles *Organismo*, *Comportamiento* y *Eco-sistemas*, fueron percibidos en numerosas oportunidades en los estudios examinados, por lo que se consideraron reafirmados dentro de los hallazgos notables que pueden ser revisados en la Tabla III. En la segunda etapa, se demostró el uso de factores y, o conceptos biomiméticos por parte de los autores en su metodología para transferir lo natural, al diseño de lo artificial. Se identificaron y recopilaron diversos términos que se nombraron y frecuentaron, en 15 publicaciones o más, y varias veces, dentro del mismo texto. Estos factores se sistematizaron y ordenaron según su afinidad y coherencia con las dimensiones previamente vistas, así como por su frecuencia en los textos revisados. Los resultados se presentan en la Tabla IV, que proporciona una categorización de los factores extraídos y sus correspondientes frecuencias respecto de los 33 textos analizados. Esta tabla, como resultado muy significativo, puede servir como referencia de modelos biológicos para futuras prácticas de la biomimesis por parte de otros investigadores. Para complementar y ratificar las frecuencias apreciadas de los términos dilucidados, se presenta otro resultado que viene a

TABLA II
COMPENDIO DE PUBLICACIONES REVISADAS Y SELECCIONADAS

	Autor(es)	Título	Año	Revista
1	Stevens P. S	Patrones y pautas en la naturaleza.	1986	Salvat Editores S.A. Barcelona, España.
2	Benyus, J. M.	Biomimicry: Innovation inspired by nature.	1997	William Morrow ed., Nueva York, EE.UU.
3	Chakrabarti, A., Sarkar, P., Leelavat-hamma, B., Nataraju, B.S.	A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas.	2005	<i>Ai Edam</i> , 19(2), 113-132.
4	Bar-Cohen, Y.	Biomimetics—using nature to inspire human innovation.	2006	<i>Bioinspiration & Biomimetics</i> , 1(1), p1.
5	Kaplinsky, J.	Biomimicry versus humanism.	2006	<i>Architectural Design</i> , 76(1), 66-71.
6	Pedersen Zari M., Storey J. B.	An ecosystem based biomimetic theory for a regenerative built environment.	2007	Lisbon Sustainable Building Conference 07, Lisbon, Portugal.
7	Pedersen Zari, M.	Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.	2007	The SB07 NZ Sustainable Building Conference (pp. 1-10).
8	Bhushan, B.	Biomimetics: lessons from nature—an overview.	2009	<i>Mathematical, Physical and Engineering Sciences</i> , 367(1893), 1445-1486.
9	Singh, R. A., Yoon, E. S., Jackson, R. L.	Biomimetics: the science of imitating nature.	2009	<i>Tribology & Lubrication Technology</i> , 65(2), 40.
10	Goss, J.	Biomimicry: Looking to nature for design solutions.	2009	Corcoran College of Art+ Design. Washington, DC.
11	Rocha Rangel, E.	Biomimética: de la naturaleza a la creación humana.	2010	<i>Ciencias</i> , 98(098).
12	Bar-Cohen, Y.	Biomimetics: nature-based innovation.	2011	CRC press. Taylor & Francis Group, FL., U.S.A.
13	López-Forniés, I., Berges Muro, L.	Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético	2012	Tesis Doctoral. Departamento de Diseño y Manufactura Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.
14	López-Forniés, I., Berges-Muro, L.	Diseño conceptual de productos. Un enfoque biomimético para la mejora de funciones	2012	<i>Dyna Ingeniería e Industria</i> , 87.
15	Maglic, M. J.	Biomimicry: using nature as a model for design.	2012	Master's Theses 1911 - February 2014. 871.
16	Volstad, N. L., Boks, C.	On the use of Biomimicry as a Useful Tool for the Industrial Designer.	2012	<i>Sustainable Development</i> , 20(3), 189-199.
17	Lepora, N. F., Verschure, P., Prescott, T. J.	The state of the art in biomimetics.	2013	<i>Bioinspiration & Biomimetics</i> , 8(1), 013001.
18	Collado-Ruano, J.	Biomimicry: A necessary eco-ethical dimension for a future human sustainability.	2015	<i>Future Human Image</i> , (5), 23-57.
19	Kennedy, E., Fechey-Lippens, D., Hsiung, B. K., Niewiarowski, P. H., Kolodziej, M.	Biomimicry: A path to sustainable innovation.	2015	<i>Design Issues</i> , 31(3), 66-73.
20	Dicks, H.	The philosophy of biomimicry.	2016	<i>Philosophy & Technology</i> , 29, 223-243.
21	Favret, E. A.	Biomimética, tecnología inspirada en la naturaleza.	2016	<i>Museo</i> , 25-32.
22	Fayemi, P. E., Wanieck, K., Zollfrank, C., Maranzana, N., Aoussat, A	Biomimetics: Process, tools and practice	2017	<i>Bioinspiration & Biomimetics</i> , 12(1), 011002.
23	Speck, O., Speck, D., Horn, R., Gantner, J., Sedlbauer, K. P.	Biomimetic bio-inspired bio-morph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments.	2017	<i>Bioinspiration & Biomimetics</i> , 12(1), 011004.
24	Fiorentino, C., Hoyos, C. M.	Biomimicry.	2017	<i>The International Journal of Designed Objects</i> , 8(1), 1.
25	Kennedy, E. B.	Biomimicry: Design by analogy to biology.	2017	<i>Research-Technology Management</i> , 60(6), 51-56.
26	Urdinola Serna, D. C., Valencia Escobar, A. H., Patiño Mazo, E., Torreblanca Díaz, D. A., Zuleta Gil, A., Bustamante, A	Biomimética y diseño.	2018	Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia.
27	Grijalva, S. F.	La naturaleza del embalaje: la naturaleza como fuente de innovación para empaques.	2018	<i>Caligrama</i> .
28	Nkandu, M. I., Alibaba, H. Z.	Biomimicry as an alternative approach to sustainability.	2018	<i>Architecture Research</i> , 8(1), 1-11.
29	Fiorentino, C., Montana-Hoyos, C.	La disciplina emergente de la biomimesis como cambio de paradigma hacia el diseño para la resiliencia.	2019	<i>The International Journal of Designed Objects</i> . Champaign, Illinois, USA: Common Ground Publishing LLC 8 (1) 2-1

Fuente: Elaboración propia.

TABLA II (Cont.)
COMPENDIO DE PUBLICACIONES REVISADAS Y SELECCIONADAS

Autor(es)	Título	Año	Revista
30 Kanwal, N., Awan, U.	Role of design thinking and bio-mimicry in leveraging sustainable innovation.	2020	Leal Filho, W., Azul, A.M., Brandli, L., Lange Salvia, A., Wall, T. (eds) Industry, Innovation and Infrastructure. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals.
31 Perricone, V., Santulli, C., Rendina, F., Langella, C.	Organismal design and biomimetics: a problem of scale.	2021	<i>Biomimetics</i> , 6(4), 56.
32 Cabrero-Olmos, R., Sánchez, L. C., García, B. R., Lucio, V. S.	La espiral biomimética inspiradora de retos actuales de diseño y soluciones sostenibles innovadoras.	2021	<i>Proyecta56, an Industrial Design Journal</i> , (1), 57-67.
33 Porsani, R. N., Raposo, F. P., Ferro-Marques, L. R., Fernandes, N. M., De-maison, A. L.	La biomimética y su influencia en el diseño de productos Una breve cronología y el estado del arte.	2023	<i>Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación</i> , (178).

Fuente: Elaboración propia.

TABLA III
FRECUENCIAS EN LOS NIVELES Y EN LAS DIMENSIONES BIOMIMÉTICAS

Nivel de Biomimesis	Fr	%	Dimensiones	Fr	%
Organismo	27	81,8	Formas	32	96,6
			Material	33	100
			Estructura / construcción	32	96,6
Comportamiento	21	63,6	Procesos / transformación	28	84,8
			Función / estrategia	32	96,6
			Geometría	28	84,8
Eco-sistema	24	72,7	Orden	29	87,9
			Organización	31	93,9

Fr: frecuencia. Fuente: Elaboración propia.

complementar los hallazgos ya referidos, en cuanto a niveles, dimensiones y factores y, o conceptos biomiméticos, corresponde a la representación visual en forma de nube de palabras (Figura 1). Esta herramienta gráfica permite agilizar el análisis de datos tipo texto más relevantes, pudiendo identificar e interpretar de manera rápida y sencilla las palabras con mayor frecuencia representadas en diferentes tamaños y tonos.

Discusión

Los hallazgos obtenidos proporcionan una base sólida para comprender y discutir la aplicación y relevancia de la biomimética en diversas disciplinas, identificar áreas de oportunidad y futuras direcciones de investigación. Los resultados reflejan consistencia y un uso generalizado en la aplicación de las dimensiones *Forma*, *Material*, *Estructura/Construcción/Proceso/Transformación* y *Función/Estrategia*, siendo elementos fundamentales para transferir los principios de la naturaleza al diseño de soluciones artificiales y la importancia de

considerarlos al aplicar la metodología biomimética. Un hallazgo importante fue la identificación de la dimensión *Geometría*, *Orden* y *Organización* como un factor relevante en la práctica de la biomimesis, demostrando su utilidad en la imitación de patrones y prototipos presentes en la naturaleza. Por ejemplo, la configuración de los esqueletos posee una geometría óptima para soportar fuerzas y resistir a la fractura, lo que puede inspirar soluciones innovadoras en la ingeniería. Su alta frecuencia de aparición en los textos revisados sugiere que es un aspecto importante a considerar en futuras investigaciones y transferencias desde lo natural. Los niveles *Organismo*, *Comportamiento* y *Eco-sistemas* desempeñaron un papel significativo en los estudios examinados, reflejando la comprensión de la biomimética como un enfoque holístico que considera no solo las características físicas y estructurales de los organismos, sino también su comportamiento y la interacción con su hábitat, como las reglas de comportamiento y la organización social de las hormigas, que han sido estudiadas para el diseño de sistemas de organización

y distribución de recursos más efectivos. La categorización de los factores y, o conceptos biomiméticos identificados, proporciona una valiosa referencia para futuros investigadores y diseñadores motivados en emular los arquetipos biológicos, pues representan ejemplos concretos de cómo la naturaleza puede inspirar soluciones en diferentes áreas. Al estudiar y comprender estos factores, estos se tornan apreciables herramientas e inéditas perspectivas biodegradables, fomentando la generación de ideas y la resolución de problemas óptima y ecológicamente. Es importante reconocer que la biomimesis es un dominio en creciente evolución y se requiere más investigación empírica y estudios interdisciplinarios para ampliar estos hallazgos y explorar nuevas áreas de desarrollo. La biomimética tiene un enorme potencial para impulsar la innovación sostenible y la resolución de problemas humanos complejos, y su aplicación continua puede contribuir significativamente al perfeccionamiento de soluciones competentes y diferentes con el entorno.

Conclusiones

Este estudio realizó una exhaustiva revisión de artículos y libros, con el objetivo de evidenciar el marco para comprender la aplicación de la biomimética e identificar y confirmar niveles, dimensiones, factores y atributos biomiméticos. A partir de los resultados obtenidos, destaca y evidencia a la naturaleza como referente de imitación, en la creación de soluciones artificiales inspiradas en la naturaleza. Los principios clave para imitar la naturaleza, se centraron principalmente en las dimensiones *Forma*, *Material*, *Estructura/Construcción/Proceso/Transformación* y *Función/Estrategia*, las cuales se observaron de

TABLA IV
CATEGORIZACIÓN DE FACTORES BIOMIMÉTICOS Y SUS FRECUENCIAS

Dimensiones	Rasgos a identificar	Factores / Conceptos	Fr	%
Formas	¿Cómo se ve?	Hexagonal	31	93,9
		Esférico	31	93,9
		Espiral	30	90,9
		Remolino	30	90,9
		Helicoidal	29	87,9
		Sinuoso	28	84,8
		Zig-zag	27	81,8
		Tubular	25	75,7
		Cilíndrico	24	72,7
Material	¿De qué está hecho?	Globoso	20	60,6
		Permeabilidad /Impermeabilidad	28	84,8
		Porosidad	26	78,8
		Esponjoso	26	78,8
		Hidrofobicidad	25	75,7
		Flexibilidad	22	68,8
		Elasticidad	20	60,6
		Aislante	18	54,5
		Acolchado	18	54,5
		Transparencia	17	51,5
		Ligereza	16	48,5
Estructura / construcción	¿Cómo está hecho?	Gelatinoso	15	45,4
		Fibroso	15	45,4
		Modular	30	90,9
		Esqueletos / Exoesqueletos	29	87,9
		Membranas	26	78,8
		Burbujas	26	78,8
		Tejidos	24	72,7
		Nervada	24	72,7
		Plegada	24	72,7
		Mallas	23	71,9
		Redes	23	71,9
		Reticulado	23	71,9
		Celdas	22	66,6
		Nodo	22	66,6
		Articulado	22	66,6
Procesos / transformación	¿Cómo funciona?	Laminar	21	63,6
		Geodésico /Domo	19	59,4
		Estratificado /Capas	18	54,5
		Entramado	15	45,4
		Sostenible / Sustentable	33	100
		Reciclar	31	93,9
		Biodegradar	30	90,9
		Cooperación / Colaboración	29	87,9
		Circularidad	28	84,8
		Autorreparación	26	78,8
Autoensamblaje	23	71,9		
Reutilizar	21	63,6		
Ciclo de vida	21	63,6		
Resiliencia	18	54,5		
Empatía	18	54,5		
Regenerativo /Restaurativo	16	48,5		

Fr: frecuencia. Fuente: Elaboración propia.

manera consistente y reiterada en la mayoría de los textos revisados. Esto evidencia el potencial de la biomimesis, como un marco que puede permitir a los diseñadores utilizarla como una herramienta para mejorar y regenerar la sostenibilidad del actual entorno, mediante la examinación de fases a seguir: *observación y aprendizaje de la naturaleza* (cómo funcionan los sistemas naturales y los ecosistemas para resolver problemas de eficiencia energética, conservación de recursos y adaptación al cambio); *identificación de patrones, principios y estrategias* (estructuras eficientes, procesos de auto organización, ciclos de nutrientes cerrados, estrategias de adaptación al entorno, etc.); *aplicación en el diseño* (integrar características inspiradas en la naturaleza desde la forma, hasta la optimización de procesos de fabricación); *optimización y mejora continua* (retroalimentación constante a diseños que operen en armonía con la naturaleza). La biomimesis puede proporcionar enfoques para restaurar ecosistemas degradados imitando los procesos naturales de sucesión ecológica y desarrollo de estrategias para acelerar la recuperación de áreas dañadas, así como también, crear soluciones innovadoras y regenerativas en la restauración de ecosistemas, gestión de recursos hídricos, agricultura, energía y transporte, que promuevan la regeneración ambiental.

Por otro parte, se encontró evidencia significativa de la importancia de incluir la dimensión *Geometría, Orden y Organización*, pues la naturaleza ofrece una gran cantidad de patrones y principios aplicables en la solución de problemas humanos. Esta dimensión fue mencionada frecuentemente en los estudios examinados, lo que indica su relevancia como modelo biológico. Además, se observó que los niveles *Organismo, Comportamiento y Ecosistemas* fueron mencionados en numerosas ocasiones, reafirmando su importancia, puesto que al observar prácticas y comportamientos que los organismos utilizan para adaptarse y sobrevivir en su eco-sistema, junto a la colaboración interdisciplinaria, éstos pueden resolver problemas y diseñar tecnologías interesantes.

Como aporte significativo de este estudio, se recopiló y categorizaron una variedad de factores, atributos y, o conceptos biomiméticos mencionados por los autores e identificados con alta frecuencia en los textos revisados. Se organizaron en orden y en coherencia a las dimensiones *Forma, Material, Estructura/Construcción/, Proceso/Transformación y Función/Estrategia*, de modo que sean accesibles con mayor rapidez y puedan servir como modelos biológicos mentores para guiar el diseño, por medio de aspectos

TABLA IV (Cont.)
CATEGORIZACIÓN DE FACTORES BIOMIMÉTICOS Y SUS FRECUENCIAS

Dimensiones	Rasgos a identificar	Factores / Conceptos	Fr	%
Función / estrategia	¿Qué es capaz de hacer?	Proteger	33	100
		Contener	31	93,9
		Almacenar	31	93,9
		Economizar	31	93,9
		Adaptabilidad	30	90,9
		Adherencia	30	90,9
		Camuflar	24	72,7
		Interfaz/	24	72,7
		Multifuncional	22	66,6
		Multisensorial	22	66,6
		Texturizar	21	63,6
		Coloración	20	60,6
		Minimalismo	20	60,6
		Comunicar	18	54,5
		Conectar	18	54,5
		Envolver	17	51,5
		Ensamblar	17	51,5
		Encapsular/ /	16	48,5
		Embalar	16	48,5
		Encajar	15	45,4
Conservar	15	45,4		
Desplegar	15	45,4		
Geometría / Orden / Organización	¿Cómo se relacionan y disponen sus elementos?	Patrones	30	90,9
		Simetrías / Equilibrio	27	81,8
		Ramificación	25	75,7
		Apilamiento	24	72,7
		Ritmos	23	71,9
		Escalas	23	71,9
		Imbricación	20	60,6
		Jerarquía	19	59,4
		Racimos	19	59,4
		Fractales /Fragmentación	17	51,5
		Teselación	16	48,5

Fr: frecuencia. Fuente: Elaboración propia.

específicos a imitar, para futuras prácticas y como lecciones biológicas en la creación y desarrollo de nuevos materiales, sistemas, procesos y productos más sostenibles. Futuras aplicaciones de los factores biomiméticos, pueden dar origen a una serie de beneficios y valor significativo, tales como soluciones innovadoras eficientes y efectivas; sistemas y tecnologías sostenibles que contribuyan a la conservación de recursos, la restauración de ecosistemas y la mitigación del cambio climático; resiliencia y adaptación a los desafíos cambiantes; eficiencia y optimización en el diseño de procesos y tecnologías que minimicen el desperdicio y maximicen la utilización de recursos para ahorros significativos y un impacto ambiental reducido; inspiración creativa y

mentalidad holística, al explorar cómo la naturaleza aborda problemas complejos de manera interconectada; impacto positivo en la sociedad al influir en la forma en que las personas viven, trabajan y se relacionan con el mundo; en resumen, un nuevo paradigma de resolución de problemas y diseño, que también promueve un futuro más equilibrado y armonioso entre la humanidad y la naturaleza.

Los resultados demuestran la relevancia y aplicabilidad de la biomimética en diversos campos, especialmente en la innovación. Los conceptos, dimensiones y factores biomiméticos identificados, como cumplimiento del objetivo inicial del estudio, conforman una base sólida para el desarrollo de nuevas investigaciones y proyectos basados en la

naturaleza, pues la comprensión y aplicación de estos principios pueden impulsar la creación de soluciones inspiradas en los patrones y procesos naturales. Es importante destacar que este estudio es un inicio, ya que la biomimesis continúa siendo un campo desconocido y en constante evolución y su potencial para generar innovación y resolver desafíos complejos es prometedor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto Código: I+D INESGEN 22-90/ de la Universidad del Bio-Bío, Chile.

REFERENCIAS

- Alexandridis G, Tzetzis D, Kyratsis P (2016) Biomimicry in Product Design through Materials Selection and Computer Aided Engineering. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 161, No. 1, p. 012046. IOP Publishing, Bristol RU.
- Bar-Cohen Y (2005) *Biomimetics-Biologically Inspired Technologies*. CRC Press. Boca Raton, Florida, EE.UU. 578 pp.
- Bar-Cohen Y (2006) Biomimetics—using nature to inspire human innovation. *Bioinspiration & biomimetics* 1: 1-12
- Barthlott W, Neinhuis C (1997) Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202: 1-8.
- Benyus JM (1997) *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. William Morrow & Co. Publishers. Nueva York, EE.UU. 308 pp.
- Benyus JM (2002) Biomimicry: Creativity and sustainability. *Natural Learning Initiative Symposium*. College of Design, North Carolina State University, EE.UU.
- Biomimicry Toolbox (2015) Manual de Biomimesis. Biomimicry Institute. Montana, EE.UU. <https://toolbox.biomimicry.org/es/>
- Chiras DD (1992) *Lessons from Nature: Learning to Live Sustainably on the Earth*. Island Press. Washington DC, EE.UU. 303 pp.
- Collado Ruano J (2016) *Coevolución en la Gran Historia: una introducción transdisciplinar y Biomimética a los objetivos de desarrollo sostenible*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca. España. 630 pp. <https://gredos.usal.es/handle/10366/132939>
- Collado Ruano J (2017) Educación y desarrollo sostenible: la creatividad de la naturaleza para innovar en la formación humana. *Educación y Educadores* 20: 229-248.
- Di Bartolo C (1994) Un diálogo entre materials i ambient. *Temes de Disseny* 10: 225-236.
- Di Bartolo C (2000) Naturaleza como modelo, naturaleza como sistema. *Experimenta Revista de Diseño y Comunicación para la Empresa* (31): 39-45.
- Gagliano M (2013) Green symphonies: a call for studies on acoustic communication in plants. *Behavioral Ecology* 24: 789-796.
- Goss J (2009) *Biomimicry: Looking to nature for design solutions*. Thesis for the Degree of Master of Art, Corcoran College of Art+ Design, Washington, DC. EE.UU. 53 pp.

CATEGORIZAÇÃO DE FATORES BIOMIMÉTICOS: ABORDAGENS PARA UMA BASE CONCEITUAL EM DESIGN SUSTENTÁVEL, REVISÃO DA LITERATURA

Andrea Llorens Vargas e Bernabé Hernandis Ortuño

RESUMO

Estudar e imitar a natureza é um componente diferenciado que promove o desenvolvimento de soluções inovadoras e ecologicamente corretas. A biomimética é a disciplina que busca, por meio de uma abordagem metodológica, aprender, imitar e se inspirar nas lições biológicas inerentes aos organismos vivos, com o objetivo de resolver problemas humanos e desenvolver tecnologias e soluções mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo identificar, por meio de uma revisão abrangente da literatura, a aplicação dessas dimensões biomiméticas, já estabelecidas por outros autores anteriormente: Forma, Material, Estrutura/Construção, Processo/Transformação e Função/Estratégia. Além disso, examinar a inclusão da dimensão de Geometria, Ordem, Organização, como parte da metodologia biomimética. Além disso, identificar e categorizar os fatores ou conceitos associados a cada dimensão,

criando assim um mapa conceitual biomimético. O método utilizado envolveu uma análise qualitativa de artigos de pesquisa relevantes, aplicando previamente critérios de inclusão e exclusão. Como resultado, 33 estudos foram selecionados e organizados em uma matriz numerada para facilitar a compreensão e a referência. Outras descobertas revelaram que a maioria dos autores aplicou, como metodologia, as dimensões mencionadas acima e a dimensão Geometria, Ordem, Organização com uma frequência significativa na imitação da natureza. Além disso, uma ampla gama de fatores e conceitos biomiméticos foi identificada e categorizada de acordo com sua frequência e relevância para cada dimensão analisada. O estudo conclui que a biomimética oferece percepções e modelos valiosos para práticas de design sustentável, destacando seu potencial para impulsionar a inovação e enfrentar desafios complexos.