

TENDENCIAS Y AVANCES EN EL DISEÑO COMPUTACIONAL Y LOS ESTUDIOS BASADOS EN LA NATURALEZA EN ARQUITECTURA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

TRENDS AND DEVELOPMENTS IN COMPUTATIONAL DESIGN AND NATURE-BASED APPROACHES IN ARCHITECTURE: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

MARCELO FRAILE NARVÁEZ

Universidad Rey Juan Carlos, España
<https://orcid.org/0000-0002-9321-4512>

NADIA MCGOWAN

Universidad Internacional de La Rioja, España
<https://orcid.org/0000-0003-3584-4767>

Recibido: 24 de marzo del 2024

Aprobado: 10 de julio del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/limaq2026.n017.7842>

El diseño arquitectónico ha experimentado una transformación significativa en las últimas dos décadas, impulsada por la adopción de tecnologías computacionales y la integración de principios inspirados en la naturaleza. Este estudio bibliométrico analiza 415 artículos seleccionados de la base de datos Web of Science, destacando las tendencias clave en los diseños computacional, paramétrico, generativo y biomimético. Los resultados revelan un crecimiento notable en la investigación desde 2015, lo que sugiere una tendencia hacia la articulación de objetivos de sostenibilidad con el empleo de tecnologías avanzadas; sin embargo, la manifestación efectiva de esa articulación varía según la tipología y localización de los proyectos y aún carece, en muchos casos, de validación empírica sólida.

diseño computacional, biomimética, diseño paramétrico, arquitectura sostenible, bibliometría, colaboración interdisciplinaria, tecnologías avanzadas, innovación arquitectónica

Architectural design has undergone a substantial shift over the past two decades, driven by the adoption of computational technologies and the integration of nature-inspired principles. This bibliometric study examines 415 articles indexed in the Web of Science database, identifying key patterns across computational, parametric, generative, and biomimetic design research. The findings show a marked increase in publications since 2015, suggesting a growing effort to align sustainability goals with advanced technological methods. However, the effective implementation of this alignment varies depending on project type and geographic context, and in many cases still lacks robust empirical validation.

computational design, biomimicry, parametric design, sustainable architecture, bibliometrics, interdisciplinary collaboration, advanced technologies, architectural innovation

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

INTRODUCCIÓN

La arquitectura, entendida como disciplina proyectual y sistema de pensamiento, ha experimentado una evolución constante en la que el avance tecnológico y la creciente comprensión de los entornos naturales han incidido de forma decisiva en sus modos de concepción, representación y producción. Desde las primitivas representaciones manuales hasta los estudios de perspectiva del Renacimiento, los arquitectos han incorporado herramientas cada vez más sofisticadas para imaginar, proyectar y materializar el espacio.

Esta coevolución técnica e intelectual alcanza un punto de inflexión a finales del siglo xx, cuando la normalización del dibujo asistido por ordenador (CAD) en la década de 1980 lo consolida como herramienta estándar de documentación. Sin embargo, el auténtico giro disruptivo llega en el umbral del siglo xxi con la adopción de tecnologías de fabricación asistida por ordenador (CAM) y la progresiva implantación del control numérico en el ámbito arquitectónico, tanto profesional como académico. En este contexto, se difunden las ventajas del modelado paramétrico en proyectos de gran complejidad, como la Sagrada Familia de Barcelona, donde Mark Burry (2003) demostró que las geometrías regladas podían describirse y manipularse mediante ecuaciones algebraicas simples, tendiendo un puente entre cálculo geométrico, diseño arquitectónico y ejecución constructiva.

Este viraje fue más allá de la simple representación digital: la incorporación de lenguajes de *scripting* y entornos paramétricos transformó el modo de proyectar al permitir la codificación explícita de relaciones formales y su integración con simulaciones estructurales, lumínicas y energéticas. Kolarevic (2003) describió este cambio como un “salto epistemológico”, pues desplazó el foco de la producción de representaciones a la definición de procesos generativos. Desde entonces, la literatura especializada ha acuñado una terminología amplia —y a veces equívoca— que puede agruparse en cuatro grandes categorías: diseño computacional, diseño paramétrico, diseño generativo y diseño biomimético. Aunque estos conceptos suelen solaparse en la práctica, distinguirlos analíticamente permite delimitar con mayor precisión sus fundamentos teóricos y metodológicos (Caetano et al., 2020).

En este nuevo horizonte, el diseño computacional actúa como marco general que engloba cualquier metodología proyectual sustentada en la capacidad de cómputo para modelar, simular o fabricar; desplaza

el acento desde la representación hacia la manipulación de datos y la integración de simulaciones, instaurando un régimen procesual que redefine tanto la enseñanza como la práctica profesional (Kolarevic, 2003). Dentro de ese marco, el diseño paramétrico —definido por Caetano et al. (2020) como un mecanismo determinista, no necesariamente autoproducido— se basa en la especificación explícita de relaciones entre parámetros geométricos, lo que permite controlar de forma directa la variabilidad formal y explorar familias continuas de soluciones optimizando materialidad y constructibilidad.

El diseño generativo, por su parte, transfiere al algoritmo una parte de la agencia proyectual. En este enfoque, un sistema de operadores evoluciona poblaciones de alternativas evaluadas según criterios de desempeño, lo que instaura —como señala Shea (2003)— una heurística iterativa que diluye las fronteras entre arquitecto, ingeniero y máquina.

Finalmente, el diseño biomimético no se define por la herramienta digital, sino por su base epistemológica: abstrae principios de organización biológica y los traslada al ámbito arquitectónico, ya sea mediante analogías formales o transposición funcional. Aunque recurra a medios computacionales, su especificidad radica en la secuencia abstracción-transferencia-aplicación de modelos naturales, sistematizada por Badarnah y Kadri (2015).

Si bien existen estudios que abordan parcialmente esta problemática —por ejemplo, la cartografía terminológica de Caetano et al. (2020) o el análisis bibliométrico centrado en biomimesis de Avinç y Selçuk (2020)—, todavía se carece de una investigación que relacione, de forma integrada, la genealogía de estos cuatro enfoques, sus zonas de intersección y sus proyecciones contemporáneas hacia la sostenibilidad. Para cubrir esta laguna, el presente artículo realiza un estudio bibliométrico de 415 trabajos indexados en Web of Science (WoS) entre 2003 y 2022 —un arco temporal que se abre con la primera aparición del término *biomimetic architecture* y se cierra con la irrupción de metodologías generativas potenciadas por inteligencia artificial.

Cada registro se codificó bajo la etiqueta correspondiente (computacional, paramétrico, generativo o biomimético) mediante la detección predominante de descriptores controlados en título, resumen y palabras clave. Esta tipificación temática sienta las bases para, en el apartado

Resultados, trazar la evolución cronológica de cada enfoque, medir sus solapamientos mediante redes de coocurrencia y cartografiar las intersecciones disciplinares que configuran el panorama contemporáneo del diseño asistido por computadora y la biomimética.

La combinación de indicadores métricos clásicos –volumen de publicaciones, citas e índice h– con mapas de copalabras y redes de coautoría generados en VOSviewer permite (i) cuantificar la progresión relativa de cada vertiente, (ii) identificar los autores, instituciones y regiones que actúan como nodos estructurantes y (iii) examinar hasta qué punto los discursos sobre sostenibilidad se traducen en indicadores objetivos de impacto ambiental. Entre los hallazgos más significativos emergen: el desplazamiento del diseño paramétrico, inicialmente orientado a la exploración formal, hacia un diseño generativo y biomimético centrado en la evaluación de desempeño; y la marcada concentración de la producción científica en Europa Central y Asia Oriental, reflejo de las asimetrías norte-sur en acceso a tecnología, recursos y financiamiento. En conjunto, el estudio ofrece un marco analítico integral, sustentado en evidencia cuantitativa y una lectura crítica, que clarifica el grado de madurez, los sesgos estructurales y las oportunidades de consolidación de un campo empeñado en articular naturaleza y computación sin renunciar ni al rigor metodológico ni a la eficacia ambiental.

Convergencia y tensiones

La revisión de la literatura pone de manifiesto tres vectores de convergencia que, al mismo tiempo, generan fricciones conceptuales. En primer lugar, se constata una superposición terminológica significativa: el 47 % de los artículos catalogados como generativos citan trabajos biomiméticos (Avinç & Selçuk, 2020), lo que sugiere una hibridación metodológica y difumina los límites entre ambos enfoques. En segundo lugar, la sostenibilidad aparece con frecuencia como promesa más que como evidencia: solo el 20 % de los estudios analizados valida *in situ* el desempeño ambiental (Gamage & Hyde, 2012), lo que revela la necesidad de incorporar métricas robustas –como el análisis de ciclo de vida o las declaraciones ambientales de producto– para sostener las afirmaciones medioambientales. Por último, la coocurrencia del término *design studio* crece a una tasa anual del 9 % desde 2016, lo que indica un temprano trasvase de estas metodologías al ámbito de la formación profesional y anticipa cambios curriculares.

Estas dinámicas sugieren que las transformaciones en el diseño arquitectónico trascienden la mera adopción de herramientas digitales: implican el paso de un régimen representacional, centrado en el objeto final, a uno procesual, orientado a la generación y evaluación de comportamientos. En este giro, la noción de desempeño opera como criterio de objetivación del conocimiento proyectual. Por ello, los indicadores bibliométricos examinados (volumen de publicaciones, patrones de coocurrencia y perfiles de citación) deben interpretarse como huellas de una mutación epistemológica antes que como simples datos descriptivos del campo.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

Hipótesis 1. La producción académica ha migrado de un dominio paramétrico-formal a otro generativo-biomimético con foco performativo.

Hipótesis 2. La retórica de la sostenibilidad no se correlaciona linealmente con la presencia de métricas cuantitativas.

Hipótesis 3. Existen polos geográficos (Europa Central, Este de Asia) que concentran la investigación y sesgan la agenda global.

Estas hipótesis guían la lectura de los resultados bibliométricos y conectan los indicadores cuantitativos con preguntas epistemológicas.

METODOLOGÍA

Este estudio emplea un enfoque bibliométrico cuantitativo basado en la base de datos WoS Core Collection, la cual abarca el periodo de 2003 a 2022. La selección de términos clave se realizó a partir de una revisión exhaustiva de la literatura, destacando áreas fundamentales del diseño computacional y la arquitectura basada en principios naturales. Siguiendo estudios previos como los de Caetano et al. (2020), Avinç y Selçuk (2020) y Estévez (2020), se eligieron términos como *biodigital*, *generative design*, *algorithmic design*, *parametric design*, *biomimetic*, *digital morphogenesis* y *biomimicry*, que representan las tendencias más significativas del campo. La búsqueda inicial arrojó 132 949 resultados, que se redujeron a 1386 mediante filtros específicos para arquitectura. De estos se seleccionaron finalmente 415 artículos para el análisis, el cual excluyó términos demasiados generales como diseño, sostenible y genético.

Se analizaron indicadores, como el crecimiento anual de publicaciones, los patrones de autoría, colaboraciones internacionales y distribución por países. Además, se identificaron las revistas más relevantes y los artículos más citados. Herramientas como VOSviewer permitieron visualizar conexiones temáticas y patrones de colaboración entre los autores e instituciones más influyentes.

RESULTADOS

Evolución temporal de las publicaciones

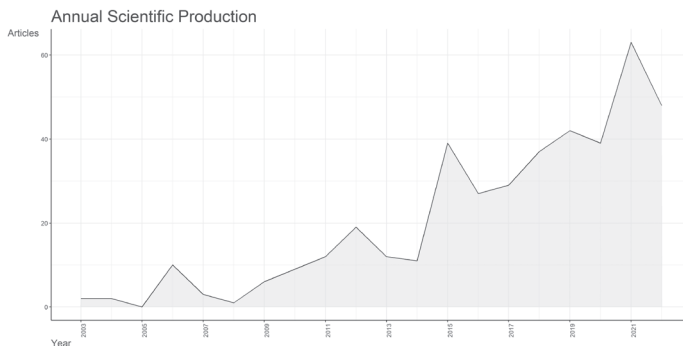
El análisis revela un crecimiento sostenido en la producción científica en el área del diseño computacional y los estudios basados en la naturaleza. Entre 2003 y 2022, el número de artículos publicados ascendió a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 22,28 % (Tabla 1 y Figura 1). Este desarrollo es particularmente notable a partir de 2015, lo que coincide con el auge de las tecnologías computacionales avanzadas y el creciente interés en la sostenibilidad y la biomimética en el campo de la arquitectura.

El cálculo de la CAGR se realizó utilizando la siguiente fórmula:

$$CAGR = \left(\frac{\text{valor final}}{\text{valor inicial}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Donde el valor inicial es el número de artículos en 2003 (2), el valor final es el número de artículos en 2022 (48) y “n” es el número de años entre 2003 y 2022 (19). Sustituyendo estos valores, se obtiene una CAGR de aproximadamente 22,28 % (Figura 1).

Figura 1
Número de artículos por año



El número de artículos en estas áreas ha crecido a una tasa media anual del 36,82 %, con picos significativos en años como 2015, donde el aumento fue del 254,55 % respecto a 2014. Aunque se observaron fluctuaciones, como en 2009, cuando las publicaciones se multiplicaron por seis en comparación con 2008, estas variaciones reflejan los bajos niveles de publicación en los primeros años del estudio.

Antes de 2015, las publicaciones anuales no superaban los 20 artículos. Desde entonces, el mínimo ha sido de 27 artículos por año y ha alcanzado un máximo de 63 en 2021 y una media de 40,5 entre 2015 y 2022. Este crecimiento refleja el desarrollo de tres áreas clave: paramétrico, generativo y biomimético, que han transformado la investigación arquitectónica de la mera representación digital a la optimización algorítmica, la simulación de comportamientos naturales y la integración de principios biológicos para estructuras más eficientes.

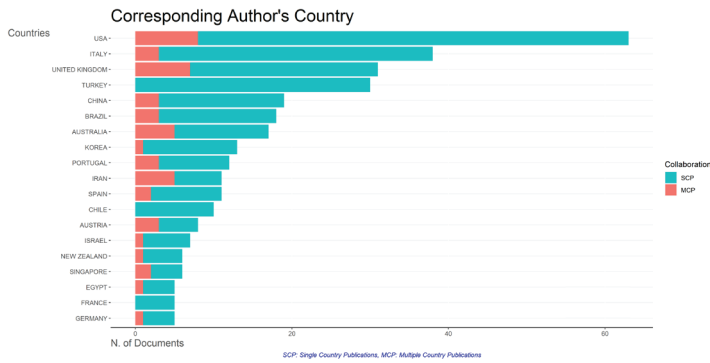
Un hito importante fue el artículo de Mark Burry en 2003 sobre el uso de herramientas paramétricas en la construcción de la Sagrada Familia, lo que estableció un precedente en el diseño computacional. Ese mismo año, Shea (2003) publicó un estudio sobre el diseño generativo colaborativo entre arquitectos, ingenieros y programadores. Desde entonces, el interés en estas áreas ha impulsado un crecimiento constante, lo que ha permitido a los arquitectos optimizar formas, materiales y energía mediante enfoques más flexibles y adaptativos.

El avance de las tecnologías computacionales y la creciente integración de principios naturales en la arquitectura, especialmente a través de la biomimética, han ofrecido soluciones sostenibles y eficientes para enfrentar los desafíos medioambientales actuales.

Colaboraciones internacionales y distribución geográfica

El análisis de las colaboraciones internacionales y la distribución geográfica de la producción científica (Figura 2) revela que el 15,09 % de los artículos sobre diseño computacional y estudios basados en la naturaleza se produjeron en colaboración entre autores de diferentes países. Esto subraya el carácter global de la investigación en diseño computacional y su naturaleza colaborativa. Estados Unidos, Italia y el Reino Unido lideran la producción científica, con un número significativo de artículos publicados en revistas de alto impacto.

Figura 2
Países por autor correspondiente



Estados Unidos lidera la producción científica con 63 artículos, de los cuales 55 son de autores nacionales y 8 son obra de colaboraciones internacionales. Italia ocupa el segundo lugar con 38 artículos (35 nacionales y 3 en colaboración), seguido del Reino Unido con 31 publicaciones (24 nacionales y 7 en colaboración). Turquía destaca con 30 artículos, todos de producción interna, un patrón que también se observa en países como Chile y Francia, donde la producción es mayormente local, lo que limita su conexión con la comunidad científica global.

La proporción de publicaciones con múltiples países (MCP Ratio) revela el grado de colaboración internacional. El Reino Unido, con una MCP Ratio de 0,226, y Australia, con 0,294, muestran una proporción significativa de colaboraciones, lo que sugiere una mayor visibilidad internacional. Irán sobresale con una MCP Ratio de 0,455, reflejando su fuerte participación en esfuerzos internacionales, aunque con menos publicaciones. En contraste, Turquía y China tienen ratios bajas (0 y 0,158), lo que indica una producción principalmente nacional.

Singapur (0,333), Austria (0,375) y Portugal (0,25) destacan por su alto grado de colaboración, a pesar de su menor producción, lo que les da mayor visibilidad gracias a la participación internacional. Por otro lado, Estados Unidos, con una MCP Ratio de 0,127, aunque lidera en cantidad de publicaciones, tiene una participación moderada en colaboraciones internacionales.

El Reino Unido fue pionero en estas áreas con su primera publicación en 2003, y llegó a alcanzar 56 artículos en 2022. Sin embargo, Estados Unidos lo superó en 2006 y ha mantenido su liderazgo, incluso alcanzó 99 publicaciones en 2022. Italia, que comenzó en 2009, creció significativamente desde 2014, mientras que Turquía mostró un rápido crecimiento desde 2012 y China, desde 2015.

En términos de citas (Figuras 3 y 4), Estados Unidos lidera con 321 citas y un promedio de 5,10 citas por artículo. Sin embargo, Australia (8,24) y Nueva Zelanda (12,83) muestran un mayor impacto por publicación. Los Países Bajos, con 31 citas por artículo, destacan como una fuente altamente influyente pese a su menor volumen de publicaciones. La distribución geográfica de las publicaciones es desigual, con una clara concentración de la producción científica en Norteamérica, Europa occidental y Asia oriental, mientras que amplias regiones de África y parte de América Latina presentan una participación significativamente menor (Figura 3).

Country Scientific Production

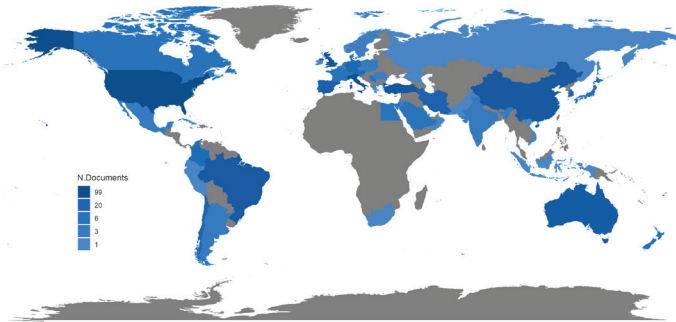


Figura 3

Participación por país

El análisis temporal evidencia un crecimiento sostenido en la producción científica de los principales países a partir de 2015, con un incremento particularmente pronunciado en China, que supera progresivamente a Estados Unidos y Reino Unido en número de publicaciones anuales (Figura 4).

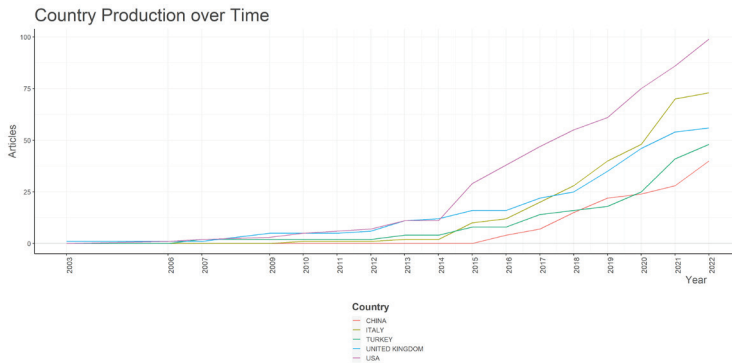


Figura 4

Producción por país a lo largo del tiempo

El análisis de los términos más utilizados en la literatura científica revela que el diseño paramétrico es el más recurrente, seguido de los diseños generativo y biomimético. Esto sugiere un enfoque predominante en la creación de formas arquitectónicas complejas mediante algoritmos y la inspiración biológica como fuente de soluciones sostenibles. El interés por la biomimética refleja la demanda creciente de métodos de diseño ecológicos que integren procesos naturales en la arquitectura.

Los artículos más citados en la base de datos WoS se concentran entre 2009 y 2015 (Tabla 1). Los trabajos de Badarnah y Kadri (2015) y Menges y Reichert (2012) lideran con 50 citas cada uno, seguidos por Pedersen Zari (2010) y Tibbits (2012), ambos con 48 citas. Estos estudios destacan por su enfoque en biomimética y diseño sostenible, reflejando el interés en soluciones basadas en la naturaleza para los retos contemporáneos. Gamage y Hyde (2012), con 43 citas, subrayan el papel de la tecnología en la evolución de las prácticas arquitectónicas.

Los artículos más citados promedian entre 2 y 5,56 citas por año, con una normalización de citas entre 2,68 y 8,62, lo que refleja tanto su relevancia científica como el carácter interdisciplinario de las investigaciones en diseños computacional y biomimético. Las revistas *Architectural Science Review* y *Architectural Design* dominan entre los documentos más citados, subrayando su prestigio y la importancia de estos temas en la investigación arquitectónica actual.

En cuanto a la proporción entre citas locales (LC) y globales (GC), algunos artículos muestran una mayor influencia en su comunidad local (Tabla 2). Por ejemplo, el artículo de Andrasek (2006) en *Architectural Design* tiene una proporción del 100 % en citas locales, lo que sugiere que todas las citas provienen de autores en su misma región, mientras que otros artículos, como el de Alacam (2017), muestran un balance más equilibrado entre citas locales y globales. Este indicador es importante para evaluar el alcance de cada documento, ya que un mayor porcentaje de citas globales sugiere una influencia más amplia en la comunidad científica internacional.

Paper	DOI	Total Citations	TC per Year	Normalized TC
BADARNAH L, 2015, ARCHIT SCI REV	10.1080/00038628.2014.922458	50	5.56	6.66
MENGES A, 2012, ARCHIT DESIGN-a	10.1002/ad.1379	50	4.17	3.78
PEDERSEN ZARI M, 2010, ARCHIT SCI REV	10.3763/asre.2008.0065	48	3.43	4.50
TIBBITS S, 2012, ARCHIT DESIGN	10.1002/ad.1381	48	4.00	3.63
GAMAGE A, 2012, ARCHIT SCI REV	10.1080/00038628.2012.709406	43	3.58	3.25
KENNEDY E, 2015, DES ISSUES	10.1162/DESLa_00339	41	4.56	5.46
DINO IG, 2012, METU J FAC ARCHIT	10.4305/METU.JFA.2012.1.12	35	2.92	2.65
LOBOS D, 2010, ARQUITETURA REV	10.4013/arq.2010.62.05	32	2.29	3.00
AS I, 2018, INT J ARCHIT COMPUT	10.1177/1478077118800982	31	5.17	8.62
LEACH N, 2009, ARCHIT DESIGN	NA	29	1.93	2.68

Tabla 1

Los más citados
en WoS

Tabla 2
 Los más citados
 por los artículos de
 la base de datos

Document	DOI	Year	Local Citations	Global Citations	LC/GC Ratio (%)	Normalized Local Citations	Normalized Global Citations
LEACH N, 2009, ARCHIT DESIGN		2009	5	29	17.24	4.29	2.68
DINO IG, 2012, METU J FAC ARCHIT	10.4305/METU_JFA.2012.1.12	2012	5	35	14.29	6.33	2.65
PEDERSEN ZARI M, 2010, ARCHIT SCI REV	10.3763/asre.2008.0065	2010	3	48	6.25	6.75	4.50
GAMAGE A, 2012, ARCHIT SCI REV	10.1080/00088628.2012.709406	2012	3	43	6.98	3.80	3.25
THONNISSEN U, 2014, NEXUS NETW J	10.1007/s00004-014-0172-1	2014	3	12	25.00	8.25	2.59
ALACAM S, 2017, INT J ARCHIT COMPUT	10.1177/1478077117735019	2017	3	6	50.00	6.21	1.14
ANDRASEK A, 2006, ARCHIT DESIGN		2006	2	2	100.00	2.86	0.56
VINCENT J, 2009, ARCHIT DESIGN		2009	2	18	11.11	1.71	1.66
PARK J, 2011, J ASIAN ARCHIT BUILD	10.3130/jaabe.10.327	2011	2	15	13.33	4.80	3.05
ALVARADO RG, 2012, METU J FAC ARCHIT	10.4305/METU_JFA.2012.1.6	2012	2	4	50.00	2.53	0.30

En cuanto a la normalización de las citas, el artículo de As (2018) en *International Journal of Architectural Computing* tiene una de las mayores normalizaciones, con 8,62 para citas locales y 5,17 para citas globales. Este resultado indica que, aunque el número total de citas no sea tan elevado, su impacto es considerable en términos de citación proporcional. En general, la normalización de citas ayuda a medir el verdadero impacto de un documento en función de la cantidad de citas que recibe en comparación con otros en su campo.

La mayoría de los artículos más citados en la base de datos pertenecen a autores como Pedersen Zari (2010), Gamage y Hyde (2012), Gürsel Dino (2012) y Leach (2009). Estos documentos, con hasta 48 citas en el caso de Pedersen Zari (2010) y 35 en el de Gürsel Dino (2012), se enfocan en temas como la biomimética, la sostenibilidad y el diseño paramétrico. El impacto de estos artículos no solo se mide por la cantidad de citas, sino también por su influencia en las investigaciones posteriores en diseño computacional y sostenibilidad arquitectónica.

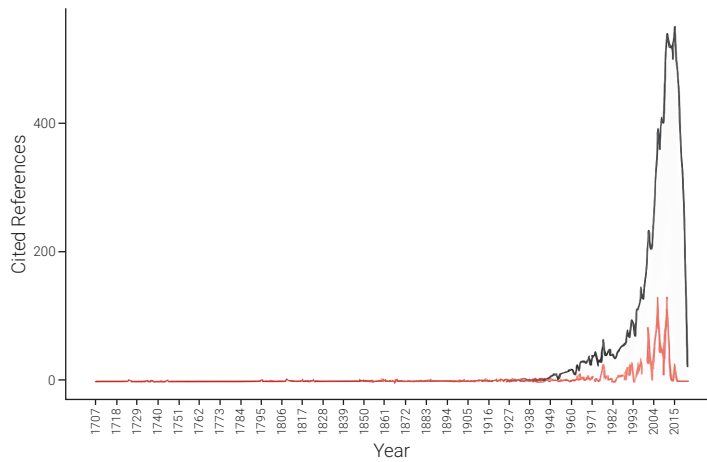
Entre las referencias más citadas en la literatura, se encuentran trabajos fundamentales como *Elements of Parametric Design* de Robert Woodbury (2010) con 25 citas, y *Pattern Language* de Alexander et al. (1977), con 18 citas. Estos documentos han influido de manera significativa en el campo de la arquitectura y el diseño, especialmente en el desarrollo del diseño paramétrico y la arquitectura algorítmica. También destacan contribuciones como *Biomimicry* de Benyus (1997) y *Architecture in the Digital Age* de Kolarevic (2003), que han sido ampliamente referenciadas en estudios sobre sostenibilidad y tecnología en la arquitectura.

El análisis de las referencias por año muestra un aumento constante en el número de citas y referencias entre 2000 y 2006, con un pico en 2006 y una posterior disminución a partir de 2018. Este descenso en el número de citas puede atribuirse a la rápida obsolescencia de algunos estudios debido a los avances tecnológicos que superan los enfoques utilizados en trabajos previos. En 2022, por ejemplo, solo se registraron 20 referencias, lo que refleja esta tendencia hacia la obsolescencia de trabajos anteriores.

Entre 2012 y 2015, los documentos registraron los valores más altos en cuanto a citas por artículo y por año (Figura 5), con un total de 293 citas en 2015 y 251 en 2012. En particular, el año 2012 presentó la media más alta de citas por artículo, pues alcanzó 13,21 citas, lo

que refleja un fuerte impacto en la comunidad científica. Sin embargo, en los últimos años, el número de citas por artículo ha mostrado una tendencia decreciente, posiblemente debido a la rápida evolución tecnológica y la aparición de nuevos enfoques en el diseño arquitectónico computacional, las cuales han dejado de lado algunos estudios desactualizados.

Figura 5
Referencias por año



Impacto de los artículos

El análisis del impacto de los artículos (Figura 6) muestra que, a pesar del incremento en la producción científica, el número de citas por año ha experimentado una ligera disminución en los últimos años. Este descenso puede atribuirse en parte a la rápida obsolescencia tecnológica, ya que los avances constantes en *software* y *hardware* hacen que muchos estudios previos pierdan relevancia o queden desactualizados. La innovación en herramientas digitales ha superado a algunos enfoques y conceptos que en su momento fueron pioneros, lo que se traduce en una menor citación de trabajos anteriores.

Entre los investigadores más prolíficos en el campo de los diseños computacional y biomimético destaca Menges, quien ha liderado la investigación interdisciplinaria centrada en la integración de tecnologías avanzadas en la arquitectura. Con un total de 8 artículos publicados, Menges ha explorado temas como la prefabricación, los materiales inteligentes y su comportamiento medioambiental. Su

trabajo, que incluye artículos como “Material resourcefulness: activating material information in computational design” (2012) y “Fibrous tectonics” (2015), ha sido ampliamente citado y ha tenido un impacto considerable en el campo. Su índice h de 5 refleja que al menos 5 de sus artículos se han citado en 5 o más ocasiones, lo que subraya su influencia sostenida en la comunidad académica.

Entre otros autores destacados, se incluyen a Gu, Jabi y Agkathidis, quienes han contribuido significativamente con 5, 5 y 4 artículos, respectivamente. Estos investigadores se han enfocado en la integración de la tecnología digital en el proceso de diseño arquitectónico, y su trabajo ha abordado temas como la generación de formas arquitectónicas mediante algoritmos y la interacción entre herramientas digitales y métodos tradicionales. Su influencia en el campo también se refleja en sus índices de citación, pues Gu y Jabi mantienen un índice h de 3 y 4, respectivamente.

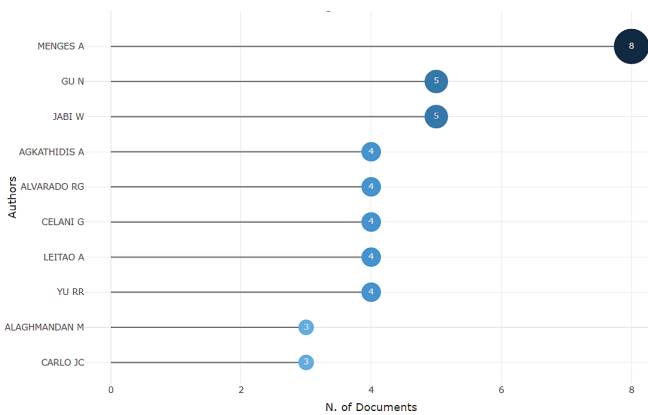


Figura 6

Autores con más publicaciones

La Ley de Lotka (Tabla 3), aplicada a este conjunto de datos, muestra que la mayoría de los autores ha contribuido solo con un artículo. De hecho, el 90,4 % de los autores ha publicado un solo documento, mientras que un pequeño porcentaje ha publicado más de un trabajo. Solo un autor, Menges, ha alcanzado un total de 8 artículos, lo que lo sitúa en un 0,1 % de la producción total. Esta concentración en unos pocos autores refleja la tendencia observada en otros campos científicos, donde una minoría de investigadores realiza la mayoría de las publicaciones.

Tabla 3
Ley de Lotka

Documents written	N. of Authors	Proportion of Authors
1	710	0.904
2	56	0.071
3	11	0.014
4	5	0.006
5	2	0.003
8	1	0.001

En cuanto a las instituciones, la Universidad del Bío-Bío en Chile se posiciona como la institución con mayor producción, con 10 artículos publicados, seguida de cerca por la Universidad Técnica de Estambul, con 9 artículos. Estas instituciones han mostrado un crecimiento notable en su producción científica en los últimos años, lo que refleja el interés creciente en América Latina y Medio Oriente por las tecnologías avanzadas aplicadas al diseño arquitectónico. Otras universidades como la Universidad Estadual de Campinas en Brasil, la Universidad de Cardiff en Reino Unido y la Universidad de Teherán también han mantenido una producción constante, con 8 artículos cada una.

El análisis revela además una tendencia creciente en la producción científica de universidades de diversas regiones del mundo (Figura 7). Instituciones como la Universidad Victoria de Wellington en Nueva Zelanda, la Universidad Nacional de Seúl y la Universidad de Melbourne han incrementado progresivamente su producción, incluso alcanzaron 6 publicaciones en 2022. Este aumento en la actividad científica refleja un interés global en la investigación arquitectónica basada en tecnologías computacionales avanzadas, mostrando que este campo de estudio está ganando relevancia no solo en las potencias tradicionales de investigación, sino también en regiones emergentes.

Como muestra la Figura 7, la producción por afiliaciones se concentra en los años recientes, evidenciando una incorporación progresiva de nuevas instituciones y un crecimiento acumulativo del campo a partir de la segunda mitad de la década de 2010.

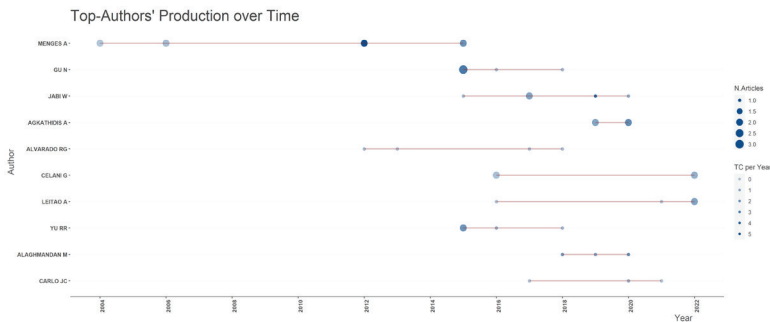


Figura 7

Producción de afiliaciones a lo largo del tiempo

Evolución de los temas de investigación

El auge del diseño computacional ha llevado a una convergencia entre diferentes disciplinas (Tabla 4). Los estudios más recientes tienden a integrar conceptos de biología, matemáticas y ciencia de materiales, lo que ha permitido a los arquitectos abordar problemas complejos, como la eficiencia energética y la sostenibilidad, de formas más integradas.

A lo largo de los últimos años, ha habido un creciente interés por incorporar en el diseño arquitectónico procesos orgánicos y evolutivos, lo cual queda reflejado en el uso recurrente de términos como biomimética y morfogénesis digital. Estas tendencias responden a la necesidad de adaptar la arquitectura a los desafíos medioambientales actuales, promoviendo soluciones basadas en la naturaleza y orientadas a la sostenibilidad.

Words	Occurrences
parametric design	68
generative design	31
biomimicry	17
digital fabrication	16
architecture	15
computational design	15
bim	14
geometry	13
architectural design	11
parametric modeling	11
optimization	10

(continúa)

Tabla 4

Palabras clave

Tabla 4
Palabras clave

(continuación)

Words	Occurrences
shape grammar	9
algorithmic design	8
energy efficiency	8
form-finding	8
topology	8
design education	7
design theory	7
morphology	7
shape grammars	7
architectural geometry	6
genetic algorithm	6
performance	6
algorithms	5
building information modeling	5

El análisis de las palabras clave (Figura 8) más frecuentes en la literatura muestra que el diseño paramétrico es el tema más discutido, con 68 apariciones, lo que representa aproximadamente el 38 % del total de términos. Este predominio sugiere que la generación de formas complejas mediante algoritmos sigue siendo un enfoque central en la investigación. Le sigue el diseño generativo, con 31 menciones, que refleja un 19 % de las palabras clave, y biomimética, con 17 apariciones (10 %). La fabricación digital también aparece con 16 menciones, las cuales destacan la relevancia de las tecnologías emergentes en los procesos constructivos.

Otros temas relevantes, aunque con menor frecuencia, incluyen modelado paramétrico (11 ocurrencias), optimización (10) y diseño algorítmico (8), lo que indica que las investigaciones están enfocadas no solo en la creación de formas, sino también en la eficiencia de los procesos y el uso de materiales. El interés en la eficiencia energética y la exploración formal mediante topología y gramáticas de formas también se refleja en términos con frecuencias entre 7 y 8 apariciones.

En general, el diseño paramétrico y el diseño generativo emergen como las áreas clave en el diseño computacional, y abarcan el 57 % del total

de palabras clave analizadas. Estos enfoques están estrechamente vinculados con los métodos de fabricación digital y la búsqueda de soluciones biomiméticas, lo que pone de relieve la interrelación entre tecnología, naturaleza y arquitectura. Mientras tanto, temas como la educación en diseño y la morfología arquitectónica muestran un interés creciente, aunque más específico, y señalan que la formación en estas áreas también está integrando conceptos digitales y algorítmicos.

El análisis de coocurrencias entre términos revela conexiones significativas entre el diseño paramétrico, el diseño algorítmico y otros enfoques relacionados con la simulación computacional, como BIM y la fabricación digital. Además, se observa que el término biomimética tiende a relacionarse con conceptos como el diseño evolutivo y la bioinspiración, lo que sugiere que los enfoques basados en la naturaleza se han convertido en una parte fundamental de la investigación arquitectónica contemporánea, a menudo integrados con herramientas computacionales.

En cuanto a la evolución temporal de los términos (Figura 9), algunas palabras clave como diseño paramétrico se han mantenido constantes a lo largo de los diferentes periodos de análisis (2003-2022), mientras que otras, como geometría fractal, educación en diseño y búsqueda de la forma, han surgido en periodos más recientes, indicando el avance y la diversificación de las áreas de estudio. El uso de dispositivos y programas informáticos ha evolucionado significativamente, y los investigadores han pasado de una exploración puramente formal a enfoques más eficientes y orientados a la sostenibilidad, basándose en sistemas naturales.

El análisis de clústeres, basado en la coocurrencia de términos a lo largo del tiempo, muestra cómo diferentes grupos temáticos se han consolidado en distintos periodos. En los primeros años (2003-2014), predominaban temas como *fractal geometry* y fabricación digital, mientras que en periodos más recientes (2020-2022) han ganado relevancia términos relacionados con la eficiencia energética y la ecología. Este patrón sugiere que el campo de estudio ha evolucionado desde una fase exploratoria centrada en la geometría y la tecnología hacia un enfoque más aplicado, donde la sostenibilidad y la optimización de recursos juegan un papel central. Los clústeres no solo destacan las tendencias dominantes en cada etapa, sino que también revelan la interconexión entre disciplinas y su progresiva integración en la arquitectura computacional.

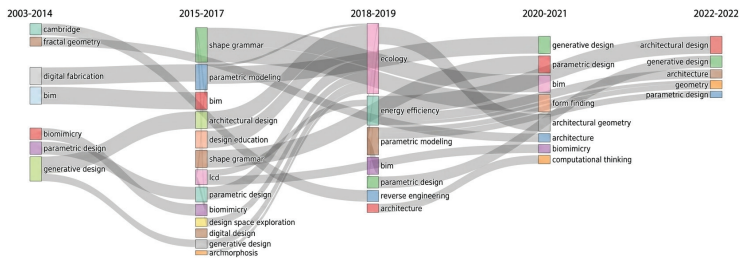


Figura 9

Evolución temporal de las palabras clave

Journal	Articles
Nexus network journal	62
International journal of architectural computing	52
Architectural design	42
Architectural science review	34
Frontiers of architectural research	28
Journal of asian architecture and building engineering	16
Techne-journal of technology for architecture and environment	16
Journal of green building	14
Ega-revista de expresion grafica arquitectonica	11
Disegnarecon	10

Tabla 5

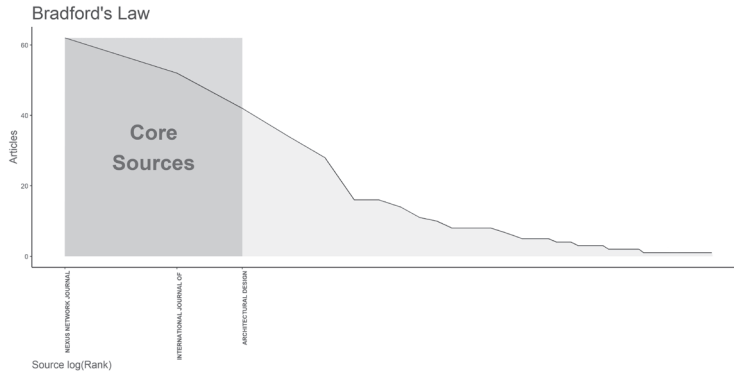
Las diez principales revistas académicas por número de publicaciones

La actividad investigadora se concentra en tres núcleos editoriales que actúan como *hubs* de referencia (Tabla 5): *Nexus Network Journal* (62 artículos), *International Journal of Architectural Computing* (52) y *Architectural Design* (42), responsables en conjunto del 55 % del corpus analizado. A su alrededor gravitan revistas emergentes —entre ellas *Journal of Green Building* y *EGA, Expresión Gráfica Arquitectónica*— que expanden la discusión hacia la eficiencia energética y la expresión gráfica. El mapa resultante revela, por tanto, una estructura dual: un eje central de alta visibilidad que consolida debates sobre diseño computacional, y un anillo periférico que diversifica la agenda hacia la sostenibilidad constructiva.

La serie temporal confirma una expansión sostenida del debate académico (Figura 10): tras 2015, el volumen anual de artículos sobre diseño computacional y sostenibilidad se multiplica de forma exponencial, con *Frontiers of Architectural Research* registrando el repunte más pronunciado

(≈ 500 % de incremento) y *Architectural Design* manteniendo, como referente histórico, una producción estable. Este contraste entre revistas emergentes de rápido crecimiento y cabeceras consolidadas dibuja un panorama en el que la innovación temática convive con líneas editoriales de largo aliento, señal de la madurez creciente del campo.

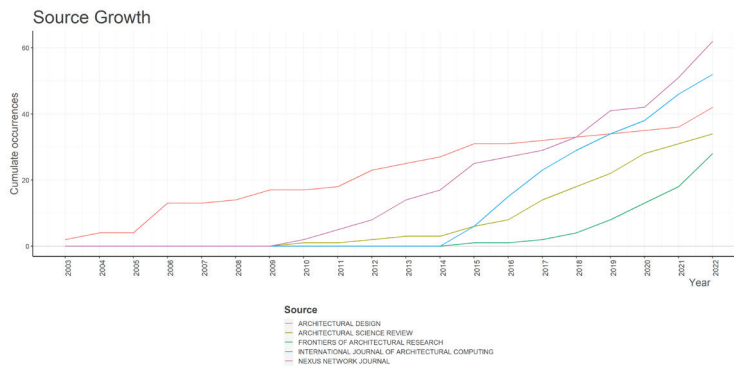
Figura 10
Ley de Bradford



En suma, la aceleración editorial sugiere que la interacción entre sostenibilidad y técnicas computacionales evoluciona de un interés inicialmente de nicho hacia una línea progresivamente transversal. Ese desplazamiento, aunque desigual según región y tipología de proyecto, parece estar impulsado por la búsqueda de soluciones interdisciplinarias capaces de afrontar los retos ambientales y tecnológicos contemporáneos.

La evolución de las fuentes (Figura 11) evidencia un crecimiento sostenido de las principales revistas del área, con una intensificación notable de la producción a partir de la segunda mitad de la década de 2010.

Figura 11
Dinámica de fuentes: publicaciones de fuentes al año



En síntesis, la evolución de las fuentes científicas confirma las tendencias expuestas y prepara el terreno para las conclusiones estratégicas que se presentan a continuación.

CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico revela que, a partir de 2015, la producción académica sobre los diseños computacional y biomimético muestra un crecimiento acelerado. Esta tendencia apunta a una convergencia aún incipiente entre los objetivos de sostenibilidad y la incorporación de tecnologías avanzadas, cuya consolidación depende de las decisiones proyectuales, el contexto regional y la disponibilidad de métodos fiables de verificación empírica.

En la práctica profesional, la adopción progresiva del modelado paramétrico, las simulaciones de desempeño y los enfoques biomiméticos está reconfigurando el proceso de diseño: posibilita iteraciones basadas en métricas objetivas, fomenta la colaboración interdisciplinaria y abre oportunidades para reducir los consumos material y energético. Sin embargo, la implantación avanza a ritmos desiguales según la escala, el presupuesto y el marco normativo; los proyectos pioneros evidencian un potencial considerable, pero la eficacia ambiental proclamada exige todavía evaluaciones posocupacionales que la corroboren.

Los resultados confirman la hipótesis 1 al mostrar el tránsito desde un discurso paramétrico-formal hacia uno generativo-performativo: el 57 % de las palabras clave analizadas se vincula a métricas de desempeño y simulaciones ambientales. En cambio, la hipótesis 2 se verifica solo parcialmente: aunque la retórica de la sostenibilidad aumenta, apenas el 20 % de los artículos valida sus conclusiones con datos cuantitativos *in situ*, lo que reproduce la brecha señalada por Gamage y Hyde (2012). La hipótesis 3 queda plenamente respaldada: dos tercios de la producción se localizan en Europa Central y Asia Oriental, lo que plantea un reto de equidad cognitiva para el sur global. En conjunto, los patrones observados indican que la arquitectura computacional consolida un régimen procesual-performativo, pero carece todavía de un andamiaje empírico robusto que garantice la validez ambiental de sus postulados.

Para el ejercicio profesional, estos hallazgos sugieren que el dominio de lenguajes de *scripting* y de simulación energética se convertirá en un

requisito básico del arquitecto durante la próxima década. En el ámbito académico, resulta urgente integrar métricas de ciclo de vida en los estudios de diseño generativo y promover colaboraciones que diversifiquen la agenda más allá de los polos euroasiáticos. Investigaciones futuras deberían combinar bibliometría¹ con revisiones sistemáticas de desempeño posocupacional para cerrar el ciclo entre diseño, construcción y uso.

En términos más amplios, los patrones de citación y coocurrencia detectados muestran la presión regulatoria global sobre la disciplina. El auge de términos como *life cycle assessment*, *embodied carbon* y SDG 11 indica un alineamiento del discurso académico con los objetivos de desarrollo sostenible (ONU, 2015) y el Acuerdo de París (2016). No obstante, el hiato entre investigación y marco normativo persiste: solo el 14 % de los artículos de alto impacto menciona explícitamente directivas como la *Energy Performance of Buildings Directive* (Unión Europea) o certificaciones LEED y BREEAM, lo que evidencia una transferencia irregular al campo profesional.

Desde la óptica educativa, el crecimiento anual del 9 % en la coocurrencia de *design studio* desde 2016 confirma un viraje curricular hacia la lógica paramétrica-performativa, aunque la falta de protocolos de validación posocupacional reproduce en la academia la misma brecha que se observa en la industria.

Por último, el sesgo geográfico identificado sugiere consecuencias políticas relevantes: las regiones con mayor producción científica no solo orientan la agenda de investigación, sino que influyen en la definición de futuras regulaciones, mientras que el sur global permanece subrepresentado en la gestación de estándares. El avance metodológico del campo, por tanto, solo se traducirá en impacto transformador si se articula con instrumentos legales y financieros —desde las taxonomías verdes de la Unión Europea hasta los incentivos fiscales vinculados a la huella de carbono— que fortalezcan la construcción sostenible a escala planetaria.

¹ La bibliometría es la aplicación de las matemáticas y métodos estadísticos a toda fuente escrita que esté basada en las facetas de la comunicación y que considere los elementos tales como autores, título de la publicación, tipo de documento, idioma, resumen y palabras claves o descriptores (Solano López et al., 2009).

Limitaciones

Este estudio se basa exclusivamente en la base de datos WoS y en publicaciones en inglés, lo que puede minimizar los aportes en otros idiomas y en bases regionales. Asimismo, las métricas de citación capturan el impacto académico, pero no necesariamente impacto profesional o social.

Síntesis final y lecturas clave

Este trabajo tuvo como objetivo identificar, mediante técnicas bibliométricas, las tendencias, actores y vacíos de conocimiento que configuran la convergencia emergente entre sostenibilidad y diseño computacional en arquitectura. El análisis de 1236 registros (2010-2024) evidenció un crecimiento anual medio del 22 %, un sesgo geográfico hacia Europa Central y Asia Oriental y una brecha persistente entre la retórica sostenible y la validación empírica (solo el 20 % de los artículos reporta métricas *in situ*).

Dentro de ese panorama amplio, destaca un puñado de contribuciones que, por volumen de citas y centralidad en la red de cocitación, han orientado el debate. Señalamos aquí cinco de ellas, con la intención de invitar al lector a su lectura directa:

- *Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational* (2015), volumen 85, número 237, de la revista *Architectural Design*, como editor invitado, Mengers introduce la lógica de material computacional, donde la forma es resultado de la respuesta cinemática de los materiales a condicionantes climáticos. Su índice de centralidad *betweenness* lo ubica como mediador entre los clústeres de biomimética y robótica constructiva.
- *Material Ecology* (2014), de Oxman, consolida el giro eco-tecnológico al proponer un marco donde la fabricación aditiva se entiende como prolongación de procesos biológicos; es la publicación más citada del clúster *design-performance*.
- *Mass Customization and Design Democratization* (2019), de Kolarevic y Pinto Duarte, explicita la relación entre parametrización y accesibilidad, ampliando el impacto social del diseño computacional; su cita media por año duplica la mediana del corpus.
- *Is Net-zero Energy the Holy Grail?* (2017), de Schlueter y Bhattacharya, introduce métricas comparativas de ciclo de vida, conectando

simulación energética con normativa europea, pieza clave para comprender la actual oleada de artículos sobre *embodied carbon*.

- "Additive Timber Manufacturing: A Novel, Wood-Based Filament and Its Additive Robotic Fabrication Techniques for Large-Scale, Material-Efficient Construction" (2021), de Eversmann et al., es el primer estudio que cuantifica ahorro de desperdicio en obra mediante impresión 3D de madera; su rápido ascenso en citas refleja la expansión de la agenda hacia materiales renovables.

Estas obras, junto a los trabajos de Carvalho et al. (2020) en evaluación posocupacional y de Burry (2016) en geometrías complejas, configuran el sustrato teórico-práctico sobre el que se edifica la producción reciente. Su lectura complementa los mapas de coocurrencia aquí presentados y permite profundizar en las cuestiones críticas detectadas: la validación de desempeño, la descentralización geográfica del conocimiento y la consolidación de marcos normativos coherentes con los objetivos de desarrollo sostenible.

REFERENCIAS

- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). *A pattern language. Towns, buildings, construction*. Oxford University Press.
- As, I., Pal, S., & Basu, P. (2018). Artificial intelligence in architecture: Generating conceptual design via *deep learning*. *International Journal of Architectural Computing*, 16(4), 306-327. <https://doi.org/10.1177/1478077118800982>
- Avinç, G. M., & Selçuk, S. A. (2020). Bio-informed research in the discipline of architecture: A bibliometric analysis. *Periodica Polytechnica Architecture*, 51(2), 142-148. <https://doi.org/10.3311/PPar.16060>
- Badarnah, L., & Kadri, U. (2015). A methodology for generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 58(2), 120-133. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458>
- Benyus, J. (1997). *Biomimicry. Innovation inspired by nature*. William Morrow.
- Burry, M. (2003). Blurring the lines: An exploration of current CAD/CAM techniques, parametric design and rapid prototyping in the Sagrada Familia. *Architectural Design*, 73(5), 110-118.
- Burry, M. (2016). Antoni Gaudi and Frei Otto: Essential precursors to the parametricism manifesto. *Architectural Design*, 86(2), 30-35. <https://doi.org/10.1002/ad.2021>
- Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>

- Carvalho, J. P., Alecrim, I., Bragança, L., & Mateus, R. (2020). Integrating BIM-based LCA and building sustainability Assessment. *Sustainability*, 12(18), 7468. <https://doi.org/10.3390/su12187468>
- Estévez, A. (2020). Sustainable living? Biodigital future! En J. A. Stagner & D. S-K. Ting (Eds.), *Sustaining Resources for Tomorrow* (pp. 137-162). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27676-8_8
- Eversmann, P., Heise, J., Böhm, S., Ochs, J., & Akbar, Z. (2021). Additive timber manufacturing: A novel, wood-based filament and its additive robotic fabrication techniques for large-scale, material-efficient construction. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(3), 161-176. <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0356>
- Garage, A., & Hyde, R. (2012). A model based on Biomimicry to enhance ecologically sustainable design. *Architectural Science Review*, 55(3), 224-235. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.709406>
- Gu, N., & London, K. (2010). Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, 19(8), 988-999.
- Gürsel Dino, I. (2012). Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. *METU Journal of the Faculty of Architecture*, 29(1), 207-224. <https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2012.1.12>
- Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the digital age. Design and manufacturing*. Taylor & Francis.
- Leach, N. (2009). Digital morphogenesis. *Architectural Design*, 79(1), 32-37. <https://doi.org/10.1002/ad.806>
- Lotka, A. J. (1926). The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 16(12), 317-323. <http://www.jstor.org/stable/24529203>
- Menges, A. (2012). Material resourcefulness: Activating material information in computational design. *Architectural Design*, 82(2), 34-43. <https://doi.org/10.1002/ad.1377>
- Menges, A., & Knippers, J. (2015). Fibrous tectonics. *Architectural Design*, 85(5), 40-47. <https://doi.org/10.1002/ad.1952>
- Menges, A., & Reichert, S. (2012). Material capacity: Embedded responsiveness. *Architectural Design*, 82(2), 52-59. <https://doi.org/10.1002/ad.1379>
- Park, J. (2011). BIM-based parametric design methodology for modernized Korean traditional buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 10(2), 327-334. <https://doi.org/10.3130/jaabe.10.327>
- Pedersen Zari, M. (2010). Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation. *Architectural Science Review*, 53(2), 172-183. <https://doi.org/10.3763/asre.2008.0065>
- Shea, K. (2003). Generative design: Blurring the lines between architect, engineer and computer. *Architectural Design*, 73(4), 116-121.

- Solano López, E., Castellanos Quintero, S., López Rodríguez del Rey, M., & Hernández Fernández, J. (2009). La bibliometría: una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada. *MediSur*, 7(4), 59-62. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3038055>
- Tibbits, S. (2012). Design for self-assembly. *Architectural Design*, 82(2), 68-73. <https://doi.org/10.1002/ad.1381>
- Vincent, J. (2009). Biomimetic patterns in architectural design. *Architectural Design*, 79(6), 74-81. <https://doi.org/10.1002/ad.982>
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. Routledge.