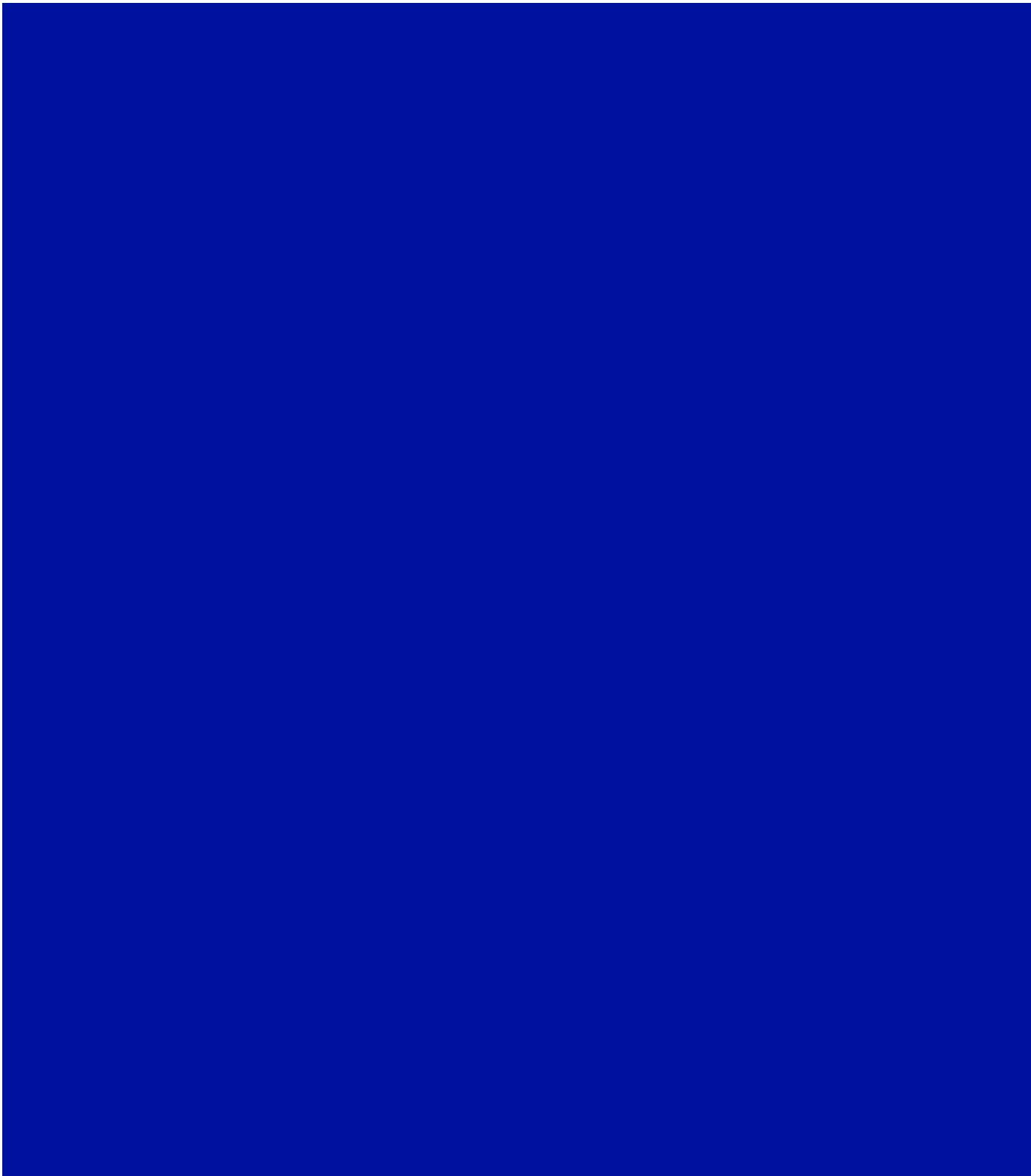


*relaciones entre diseño
arquitectónico bioinspirado,
algorítmico y fabricación digital*

JUAN PABLO PORTILLO*



- Juan Pablo Portillo es arquitecto y profesor de la FADU-Udelar y doctorando en la FADU-Udelar.

Este ensayo indaga en el proyecto arquitectónico desde su relación con tres ámbitos de conocimiento: el diseño arquitectónico bioinspirado o biomimético, el diseño algorítmico y la fabricación digital. Se pretende definir un nuevo campo epistémico construido a partir de la intersección de los tres temas.

En los últimos años el desarrollo tecnológico en varios campos disciplinares está revolucionando el diseño, y en particular el diseño arquitectónico, en el marco de la llamada *cuarta revolución industrial* (Schwab, 2016). El desarrollo de software con la aparición de entornos de programación visual pensada para diseñadores ha hecho que implementar aplicaciones informáticas ya no sea algo lejano al quehacer arquitectónico. Paralelamente a esto, las computadoras son cada vez más potentes y capaces de procesar volúmenes importantes de información: actualmente una computadora es capaz de evaluar millones de datos e inferir conclusiones a partir de ellos al tiempo que cada vez son más cotidianas las herramientas de la llamada *inteligencia artificial*.

Al mismo tiempo, la aparición y masificación de tecnologías de fabricación digital —que no es nueva, pero sí lo es su bajo coste— la ha introducido en la industria de la construcción provocando una verdadera revolución tanto en la mano de obra como en las posibilidades constructivas.

Finalmente, la crisis energética y de escasez de recursos y el calentamiento global han impulsado a muchos arquitectos a cambiar la mirada sobre estos problemas. Una de estas miradas se centra en el estudio de la naturaleza como fuente de inspiración para encontrar soluciones innovadoras o eficientes para muchos de los problemas que se presentan en la disciplina.

Estos tres paradigmas disciplinares, que han cobrado mayor relevancia en los últimos años, convergen y se potencian mutuamente dando lugar a nuevas arquitecturas y nuevas formas de pensar el proyecto.

Diseño bioinspirado El *diseño biomimético* o *bioinspirado* es un paradigma aplicado a la arquitectura y el diseño industrial con el que se busca inspiración en la naturaleza para desarrollar soluciones innovadoras. La búsqueda de inspiración en la naturaleza no es nueva, puede rastrearse hasta la Grecia clásica en el estudio de proporciones en el cuerpo humano: dicha relación entre las partes era entendida como la

máxima expresión de la naturaleza, que era, por lo tanto, aplicada en la arquitectura.

Sin embargo, es a partir de Darwin y su libro *El origen de las especies* que el estudio científico sobre la naturaleza cobra una nueva dimensión (Darwin *et al.*, 2010) y es a partir de la obra de Thompson D'Arcy que nace un interés por buscar soluciones en la naturaleza de manera consolidada. A mediados del siglo xx publica *On Growth and Form*, en el que estudia plantas y animales desde una perspectiva matemática (Thompson, 1942).

En 1997 Janine Benyus acuña el término *biomimicry* (Benyus, 1997) o biomimética y propone estrategias de diseño apoyándose en un estudio sistemático de la naturaleza, con una fuerte preocupación por encontrar soluciones más sustentables. En la misma línea, pero ya desde una mirada arquitectónica, en 2016 Michael Pawlyn publica *Biomimicry in Architecture*, libro que se convierte en un verdadero referente para los arquitectos y que se enfoca sobre todo en el concepto de que la *forma* es el camino. Plantea que en la naturaleza el material es costoso de obtenerse, en cambio la forma es más viable o económica y por ese motivo las formas naturales han sido diseñadas de manera de utilizar la menor cantidad de material posible (Pawlyn, 2016). Es importante tener presente que en formas vivas la estructura es dinámica y se adapta permanentemente a las condiciones del momento.

Diseño algorítmico Como segundo eje, el *diseño algorítmico* ha cobrado impulso en los últimos años gracias al uso creciente de las computadoras, que han permeado todas las actividades humanas de manera muy profunda. No obstante, el término *algoritmo* no necesariamente hace referencia a la informática, más bien es un concepto que refiere a una secuencia de pasos para realizar una tarea.

En este sentido, podemos tomar a autores como Wassim Jabi (2013), que postula que el pensamiento algorítmico produce modelos consistentes, coherentes, que se pueden construir. Dichos modelos permiten crear simulaciones sobre el comportamiento estructural, material, térmico, etcétera, y pueden ser fabricados digitalmente, en versiones diferentes o iteraciones. Jabi define también el concepto de *parámetro*: en un *software paramétrico*, este término refiere a una variable en una ecuación que define otros valores. Se opone a *constante* y tiene generalmente

un rango de posibles valores. Asimismo, define el diseño paramétrico como el proceso basado en un esquema algorítmico que permite expresar parámetros y reglas que definen, codifican y aclaran la relación entre los requerimientos del diseño y el diseño resultante.

A propósito de lo anterior, Brett Steel sostiene: «desde la época de los antiguos ideales geométricos de Vitruvio hasta las líneas reguladoras corbusianas modernas, la arquitectura ha estado ligada a un uso consciente de los números». Entonces podemos pensar el algoritmo como cualquier secuencia de instrucciones, desde una receta de cocina hasta un sofisticado programa informático.

Es por este motivo que el diseño algorítmico es cada vez más cotidiano en el campo de la arquitectura. Permite prefigurar cientos de soluciones diferentes al variar parámetros, y así proponer, de forma similar a como lo hace la naturaleza, una familia de formas con pequeños cambios y ser evaluadas todas para determinar la mejor opción.

Fabricación digital El tercer y último eje es la *fabricación digital* (Beaucé & Cache, 2003), que permite materializar formas no estándar a partir del pasaje de bits a átomos o de átomos a bits (García Amen, 2018). Bajo estos conceptos agrupamos un flujo de información desde el mundo digital hacia el mundo físico y viceversa, utilizando diversas tecnologías que podemos agrupar muy groseramente en sustractivas y aditivas junto con las tecnologías de registro como el escáner láser.

Las primeras son las que utilizan rúters CNC y consisten en máquinas de corte. Poseen un motor que, mediante una fresa (husillo), puede tallar un material siguiendo trayectorias vectoriales. Las segundas son las que utilizan la impresión 3D y son consideradas más sustentables porque no producen tanto material de residuo como en el tallado con husillo. Las aditivas agregan capa tras capa de un material fundido o fresco, llegando incluso a utilizar hormigón, vidrio o metales.

A propósito de la fabricación digital, uno de los primeros referentes en el tema, Branko Kolarevic (2001), expresa en *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing* Spon Press:

La integración del diseño asistido por computadora (CAD) y la manufactura asistida por computadora (CAM) ha redefinido la relación entre diseño y su

producción o materialización. La era de la información no solo ha revolucionado el diseño de edificios, también cómo se construyen.

Más aún, en la era posdigital, que caracteriza el momento actual, el desarrollo de las tecnologías de diseño y fabricación se apoyan en el BIM (*Building Information Modeling*) y acortan la brecha entre proyecto y construcción. Por este motivo el proceso se vuelve más transparente.

Asimismo, para Lisa Iwamoto, una de las grandes arquitectas referentes de la fabricación digital, esta implica cerrar o acortar la brecha entre el diseño y el edificio materializado (Iwamoto, 2010).

En consecuencia, la tradicional división entre trabajo intelectual y trabajo manual se vuelve obsoleta a partir de las tecnologías de fabricación digital y eso se pone de manifiesto en el trabajo de Kohler & Gramazio (2014), que introducen en el diseño y fabricación la idea de las relaciones entre robótica y arquitectura.

Hipótesis principal Se entiende que en la naturaleza las formas están optimizadas de manera de utilizar la menor cantidad de material posible, resultado de millones de años de evolución. Si pretendemos crear geometrías eficientes como las biológicas, debemos aplicar algoritmos complejos que nos permitan analizar la forma y evolucionar hacia estructuras también complejas. Finalmente, la tecnología capaz de fabricar dichas formas de manera adecuada es la impresión 3D. La hipótesis es que solo cuando estos tres campos convergen realmente podemos generar formas eficientes como lo hace la naturaleza.

Si uno de estos tres ejes no participa en el proceso, el resultado es meramente una imitación de la naturaleza. Se propone la idea de que detrás de cada forma natural existe un algoritmo que ha de ser descifrado y que no puede ser verdaderamente estudiado sin el uso de medios informáticos, dada la complejidad que ello implica; por el contrario, el análisis analógico conllevaría tiempos y recursos hoy escasos. Para trabajar con entornos complejos, ya sea por el volumen de información o por la cantidad de ensayos o simulaciones necesarias, no es suficiente nuestra capacidad humana y debemos extenderla mediante el uso de computadoras.

Cuando trabajamos analógicamente solo somos capaces de simplificar los problemas y producir objetos de cierta

regularidad; por ejemplo, de sección constante, macizos y en general ineficientes.

Estado del arte, su caracterización problemática. Diseño bioinspirado

La búsqueda de soluciones en la naturaleza se fundamenta en la posibilidad de aprender de ella y de cómo ser más eficientes frente a los distintos desafíos de diseño. En este paradigma debemos entender que la naturaleza no se repite nunca: por ejemplo, no existen dos hojas iguales (Deleuze, 2006) y, por lo tanto, dicha variabilidad solo es posible a partir del diseño algorítmico y paramétrico. Si la primera revolución industrial es el paradigma de la estandarización, la cuarta es el paradigma de la variabilidad, de acuerdo con el agudo análisis de Mario Carpo en su libro *The Second Digital Turn*, en el que desarrolla el concepto de *segundo giro digital* a partir de las tecnologías de fabricación digital, siendo el primero el que se dio a partir de la inclusión del modelado tridimensional digital con obras como el Guggenheim de Bilbao, de Frank Gehry (Carpo, 2017).

Las herramientas digitales comenzaron a potenciarse a partir de la aparición de la fabricación digital en lo que Fernando García Amen (2019) identifica como la convergencia físico-digital. En este nuevo paradigma se conecta el modelo digital arquitectónico con máquinas que producen físicamente dicho modelo, en un flujo que podemos llamar *File to Factory*. La arquitectura entró así en una nueva etapa bautizada por Carpo como el segundo giro digital, como mencionamos más arriba.

En ese notable ensayo Carpo sostiene, entre otras cosas, que la característica principal de este paradigma consiste en que la producción mediante máquinas de objetos únicos tiene el mismo costo que la producción de objetos en masa. Es decir que una impresora 3D puede producir objetos todos iguales o todos distintos al mismo costo, abriendo el camino a que las geometrías no necesariamente sean regulares.

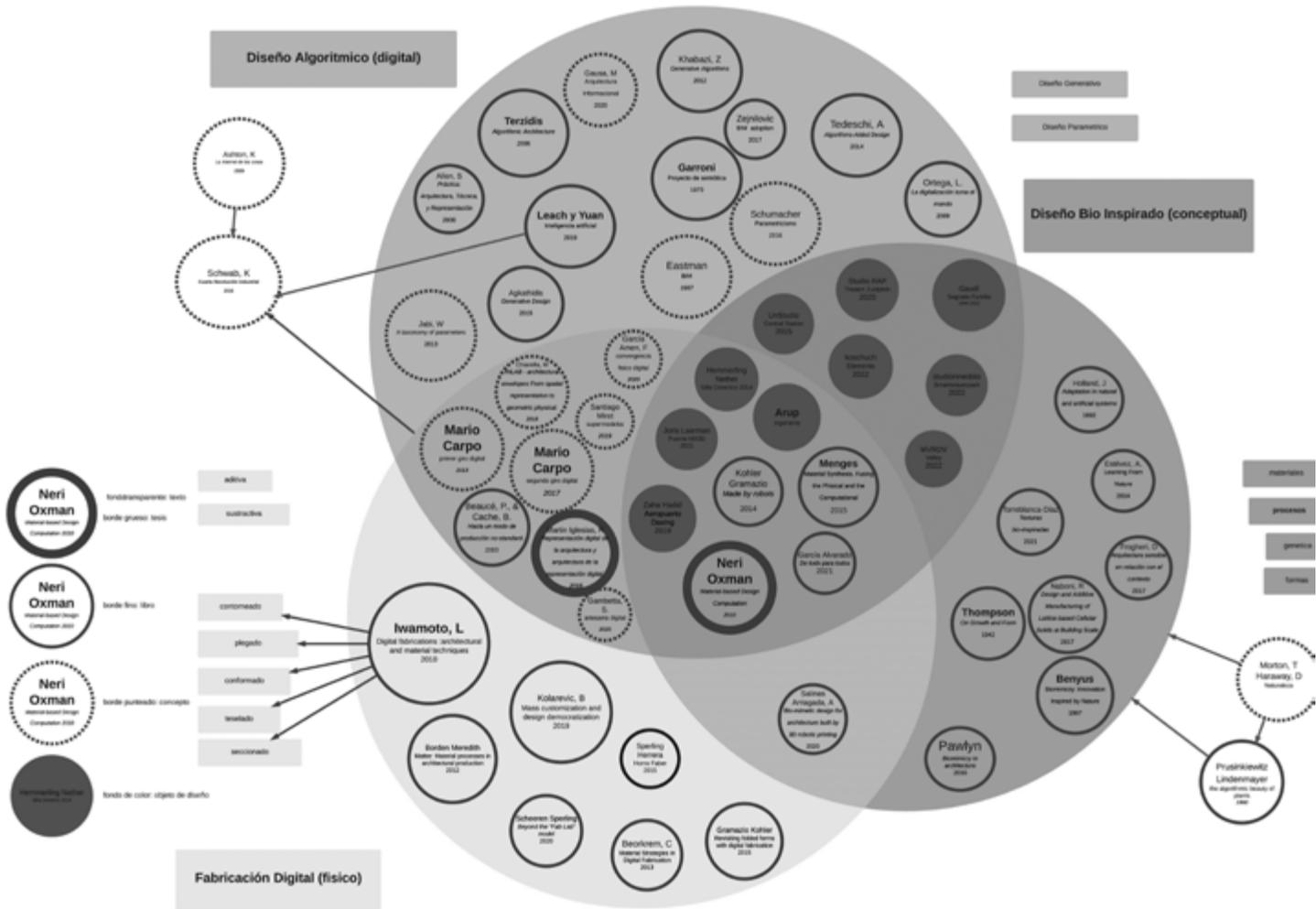
La imagen 1 ilustra el mapa conceptual de intersecciones a partir de los tres campos propuestos. En él se destacan trabajos de investigación, así como proyectos arquitectónicos. Dicho mapa permite observar como en los últimos años se ha incrementado el estudio y desarrollo de proyectos inspirados en diversos aspectos de la naturaleza. Si bien lo bioinspirado no es una idea nueva, cobra cada vez más impulso la idea de hacer más eficientes los edificios

en el consumo de energía tanto durante la construcción como luego, cuando entran en servicio. En este contexto de búsqueda de un mayor equilibrio en el uso de recursos materiales escasos y apoyándose en un mayor conocimiento del comportamiento del mundo animal y vegetal es que se han multiplicado los proyectos que, de un modo u otro, se apoyan en aspectos de la naturaleza para su concreción.

En este sentido, algunos arquitectos proponen la generación de geometrías basándose en las *leyes* vegetales. Gracias a la geometría fractal, que en el siglo xx alcanza un desarrollo profundo de la mano de grandes matemáticos (Prusinkiewicz & Lindenmayer, 1990), se comprende más cabalmente la morfología de estos y otros elementos *naturales*. Otros autores analizan las estructuras óseas de animales y sus principios buscando crear estructuras arquitectónicas que, como sucede en los huesos, utilicen la menor cantidad de material posible, tanto a nivel macro como micro. Como ejemplo de lo anterior existen dos diseños paradigmáticos que ilustran con claridad lo expuesto. La *Generico Chair* es una silla diseñada por Marco Hemmerling y Ulrich Nether que se asemeja a huesos. El diseño se basa en un algoritmo que mediante sucesivas aproximaciones determina la cantidad exacta que en cada punto de la estructura debemos tener para soportar el peso; el resultado es un conjunto de secciones variables que solo pueden materializarse mediante impresión 3D, que ilustra claramente el diseño a nivel macro (Hemmerling & Nether, 2014). El otro ejemplo más a escala arquitectónica es el *Trabeculae Pavilion* de Naboni, que utiliza la idea de que los huesos poseen diferentes densidades internas según el peso que soportan. El pabellón es impreso en 3D siguiendo estos lineamientos a un nivel micro, para no fabricarlo de manera sólida sino con pequeñas cavidades que permiten un ahorro considerable de material (Naboni & Kunic, 2017). Existen líneas de investigación transversales a diversas disciplinas que buscan integrar lo vivo en la construcción o incluso el desarrollo de biomateriales: en *De forma et vita*, Carlos Tapia Martín da cuenta de diversos proyectos que exploran el uso de materiales vivos en la construcción con este objetivo (Tapia Martín, 2020).

Por otro lado, existe una línea de investigación formal en el diseño que invierte la ecuación forma-materialidad tradicional, en la que primero se define la forma y luego se le otorgan cualidades materiales. Por el contrario, en este nuevo enfoque la forma es el resultado de las cualidades del material. Este nuevo (o no tanto) enfoque pretende llegar a la forma a partir de las propiedades materiales,

IMAGEN 1
Mapa conceptual de aportes en diseño bioinspirado, diseño algorítmico y fabricación digital. Fuente: elaboración propia.



es decir, parte de la premisa de que cada material induce a determinadas formas. En esta línea se enmarca el trabajo de la diseñadora y arquitecta Neri Oxman —con su tesis de doctorado *Material-based Design Computation*, de 2010, en la que desarrolla el estudio de biomateriales para la construcción—, que lidera el grupo *Mediated Matter Group*, un equipo de investigación del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) en el que Oxman explora el mundo natural y la fabricación digital para diseñar desde prótesis hasta pabellones.

En el mismo sentido, Christopher Beorkrem (2013) estudia la cuestión del diseño no desde la óptica abstracta de la forma *a priori* sino a partir del material: la forma es condicionada por las cualidades de cada material, estableciendo un hilo conductor entre Neri Oxman, Achim Menges y Michael Meredith.

La fabricación digital vinculada a la bioinspiración es estudiada en el ámbito universitario desde hace algunos años en Europa. El panorama en Países Bajos, Suiza y Alemania es elocuente en este sentido; Ove Arup, entre otros, aplica estos principios en sus trabajos. Tanto a nivel teórico como en la práctica, Achim Menges y su socio Jan Knippers exploran el diseño desde una óptica morfogénica y la fabricación digital aplicando a su vez el diseño algorítmico. Ambos profesores de la Universidad de Stuttgart son también de los teóricos más importantes en el tema. En la última década han desarrollado un conjunto de pabellones que exploran diversos temas relacionados con el diseño bioinspirado y la fabricación digital, convirtiéndose en referentes en el tema.

Asimismo, hoy se dispone de herramientas informáticas de diseño conocidas como diseño algorítmico o *diseño*

generativo (Khabazi, 2012), que permiten producir familias de diseños personalizados a partir de parámetros que introducen el concepto de variabilidad.

En esta misma línea de pensamiento, Neil Leach define dos términos, *computerization* y *computation* (Leach & Yuan, 2018; Terzidis, 2006). A propósito de la manera en que nos apropiamos de las herramientas informáticas, suele decirse respecto de estas que son tan solo una herramienta al mismo nivel que un lápiz y un papel, y, por lo tanto, una herramienta de *representación mejorada*. Leach define *computerization* como realizar de manera automatizada las tareas que antes se hacían a mano y como representar y cuantificar elementos. En cambio, *computation* nos permite ir más allá al posibilitar nuevas formas de concebir el espacio aprovechando al máximo las capacidades informáticas.

El potencial de estas herramientas tiene dos vertientes, una formal y otra técnica, de acuerdo con Picon en su prefacio a *Algorithmic Architecture*, de Kostas Terzidis (2006). La formal es bien conocida a partir de los proyectos de Ghery y Hadid, entre otros; sin embargo, es la vertiente técnica la que más interesa en este trabajo. Allen afirma:

valdría la pena extender las capacidades instrumentales de la computadora hacia el mundo de las cosas reales... En la arquitectura, la computadora se vuelve muchísimo más interesante en el momento que es conectada a cualquier herramienta que le permita producir algo más que una imagen (Allen, 2000).

Diseño algorítmico Arturo Tedeschi pone en evidencia un cambio de paradigma que hereda un pensamiento y prácticas evidentes ya en los primeros días del diseño computacional, con el Guggenheim de Bilbao como uno de los exponentes más icónicos. Se trata del diseño potenciado por las herramientas digitales 3D y el concepto *File to Factory*, que implica el pasaje directo de la computadora a la fabricación (Tedeschi, 2014).

Del mismo modo, la inteligencia artificial irrumpe en varios ámbitos de conocimiento y la arquitectura no es una excepción. La aplicación de esta herramienta, si bien es aún incipiente, ya permite augurar un cambio profundo en la disciplina (Yuan et al., 2019).

El panorama latinoamericano Es sobre todo a partir de 2016 que en diferentes ámbitos de América Latina se intensifican las búsquedas e investigaciones en proyectos que involucran herramientas de

diseño algorítmico. Un ejemplo es la serie de *workshops Adaptation*, llevados a cabo por el arquitecto uruguayo Federico Lagomarsino. Conceptualmente se trabaja con la idea de parásito como metáfora de objeto construido mediante tecnologías de punta para acortar la brecha entre proyecto y materialización (García Amen et al., 2016).

Gramazio & Kohler, en su artículo *Revisiting folded forms with digital fabrication*, abordan cómo producir con fabricación robótica estructuras de hormigón plegado eficientes en el uso del material. La robótica es uno de los pilares de trabajo para estos arquitectos que han desarrollado varios trabajos de investigación con el ladrillo y el desarrollo de formas a partir del diseño computacional en una serie de experimentaciones que se pueden vincular con las formas curvas de Eladio Dieste (Szabo et al., 2020).

Fabricación digital en América Latina El arquitecto brasileño David Sperling organizó en 2014 la muestra *Homo Faber: Digital Fabrication in Latin America*, que se convirtió en un catalizador de las experiencias de

fabricación digital a la vez que permitió hacer un mapeo de la situación latinoamericana en la materia (Sperling & Herrera, 2015).

Es a partir de este impulso latinoamericano, sumado a la integración de redes internacionales, que en la segunda mitad de la década de 2010 en nuestro país se instala definitivamente en arquitectura la temática de la fabricación digital desde el establecimiento de vínculos académicos de la FADU —a través del entonces DepInfo (actual CID)— hasta que nace el FabLabMVD como parte de una franquicia del MIT.

En este marco de crecimiento del laboratorio de la FADU es que el arquitecto español Andrés Martín-Pastor, que diseña pabellones a partir del corte de placas con fabricación digital, llevó a cabo un *workshop* en Montevideo, con el *Dieste Pavilion*, fabricado en Montevideo en 2017 en la FADU. Su trabajo con *grasshopper* explora las superficies desarrollables de manera de obtener superficies curvas a partir de placas planas cortadas con CNC. El caso del *Dieste*

Pavilion permite explorar la convoluta para aproximarse a las geometrías regladas de Dieste. La convoluta es una superficie desarrollable apta para generar estas geometrías.

Observamos que el desarrollo más importante, tanto teórico como en la praxis, se focaliza en países del primer mundo con investigaciones de alto coste y publicaciones sobre el tema. El panorama latinoamericano se centra sobre todo en cómo las sociedades con menos recursos, sobre todo a nivel universitario, han adoptado y adaptado estas tecnologías.

Las tecnologías de fabricación digital ya permiten dar el salto hacia escalas arquitectónicas desde los trabajos con brazos robóticos que se mencionan más arriba a las impresoras 3D de gran porte. TECLA es una impresora 3D diseñada por *Mario Cucinella Architects* en colaboración con WASP en Bolonia, Italia, en 2021, con la que se pueden imprimir casas.

Como vimos más arriba, el mapa conceptual de la imagen 1 ilustra los tres campos epistemológicos abordados. Se utiliza el diagrama de Venn como herramienta gráfica ya que resulta muy adecuada a la idea de convergencia de tres disciplinas cuyo punto de contacto se propone como un ámbito en el que las tres áreas se complementan entre sí. En él se han incluido todas las referencias estudiadas, codificándolas según cuatro categorías: tesis doctorales, libros publicados, conceptos propuestos y objetos de diseño tanto arquitectónicos como de escala doméstica o mobiliario. Asimismo, se utiliza otra codificación dimensional en la que el tamaño refiere a la relevancia relativa que tiene cada referencia. Podemos observar que existen algunos textos que abordan los tres ejes, y sobre todo hay un conjunto de proyectos que podemos ubicar en dicha convergencia.

Formulación metodológica básica La metodología de este estudio

en curso desarrollará una serie de etapas que pretenden definir o

acotar el tema a partir del análisis y la revisión sistemática de bibliografía. De esta forma se selecciona un conjunto de conceptos que nos permitirán organizar un marco

IMAGEN 2
MX3D Bridge.

teórico. Se cuenta con un número de ejemplos o casos de estudio recientes lo suficientemente numeroso como para seleccionar un grupo de cinco a ser analizados en profundidad y que cumplan con los tres ámbitos temáticos.

Los casos de estudio seleccionados en una primera instancia consisten en un conjunto de obras recientes fundamentalmente de los últimos cinco años. También se busca que los casos sean variados en programa, ubicación y tecnologías de fabricación digital y escala.

El *MX3D Bridge* (imagen 2) es un puente construido en Ámsterdam, Países Bajos, en 2021, por el estudio Joris Laarman conjuntamente con Ove Arup. Se trata de una pieza impresa en metal mediante un brazo robótico (impresión 3D) y cuyo diseño involucra el uso de algoritmos computacionales. Uno de los puntos interesantes es que el diseño algorítmico se va paulatinamente refinando, tomando el resultado y volviendo a modificarlo hasta alcanzar una solución óptima, es decir, se va iterando sucesivas veces hasta alcanzar una solución eficiente según requerimientos en relación con vientos, cargas, etcétera.



IMAGEN 3
Theatre Zuidplein.
Fuente: <https://www.arup.com/projects/theater-zuidplein-acoustic-wall>.



Tal como expresa el autor, se trata del diseño de un proceso más que de un objeto. El puente es fabricado en un taller y posteriormente transportado por agua hasta el lugar definitivo. Es un caso paradigmático de la convergencia de los tres ejes planteados, dado que además aborda una escala de objeto a nivel edilicio a partir de tecnologías de impresión de gran tamaño.

Otro ejemplo es el *Theatre Zuidplein*, de Studio RAP (imagen 3), ubicado en Róterdam y construido en 2020. Utilizando herramientas de diseño digital paramétrico, los ingenieros de Arup optimizan la forma del armazón del teatro para lograr un rendimiento acústico deseado dentro de un entorno de diseño complejo. Mediante este proceso paramétrico de *conformación de sonido* se estudia una serie de escenarios para evaluar el impacto del diseño de la pared del auditorio en la acústica, optimizando la forma final de la pared, así como el patrón y la ubicación de los triángulos, en diferentes ángulos. Finalmente, los paneles son cortados con CNC o router de corte.

El proyecto de vivienda *Canal House* (imagen 4), de 2018, de la empresa de Países Bajos Dus Architects ([https://](https://www.aectual.com/systems)

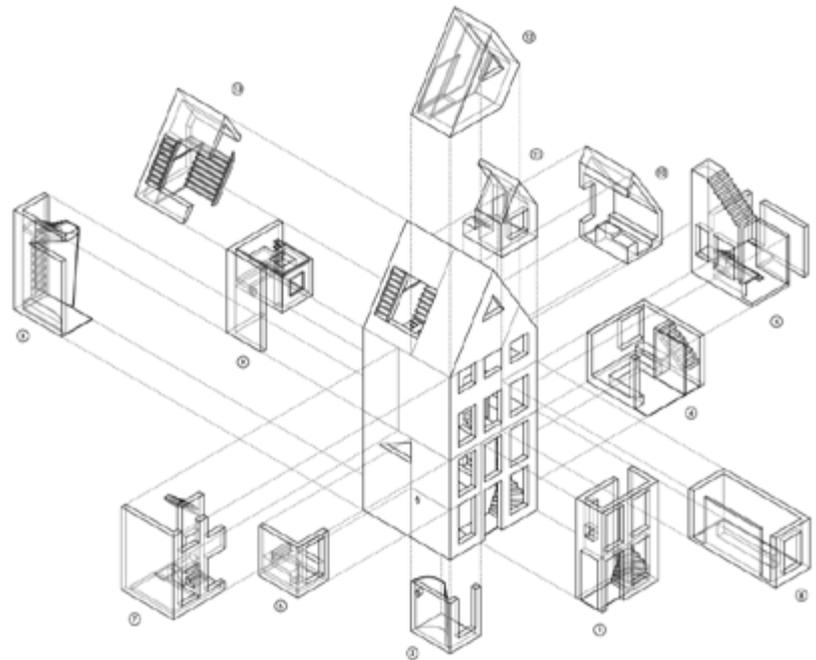


IMAGEN 4
Canal House, Dus
Architects.
Fuente: <https://houseofdus.com/project/3d-print-canal-house/>.

www.aectual.com/systems), propone un prototipo de casa que fundamentalmente se imprime en 3D (imagen 5) con un material inspirado en lo biológico y que, por lo tanto, puede ser reutilizado cuando se desea trasladar la vivienda a otro lugar. Diseñada a partir de patrones algorítmicos, este material de características biológicas es entonces apto para impresión 3D y su *desmontaje* y reutilización posterior atendiendo a uno de los problemas de la construcción, el de los residuos. Esta empresa viene trabajando en esta tecnología y actualmente produce diversos tipos de muebles impresos en 3D.

En el ámbito local cabe destacar la cúpula digital o *simbionte* de Federico Lagomarsino en 2016. Instalada temporalmente en un edificio de la Ciudad Viaje de Montevideo (imagen 6) del arquitecto alemán Karl Trambauer en 2016 y posteriormente sustituida por una definitiva, también por Lagomarsino, es un claro ejemplo local de la convergencia de los tres ejes estudiados y ejecutados conforme a los recursos disponibles en nuestro medio. El diseño parte de conceptos biológicos de parásito o simbionte, considerando la cúpula como un parásito en un edificio patrimonial.

IMAGEN 5
Canal House.
Fuente: <https://houseofduis.com/project/3d-print-canal-house/>.



Este perdió su cúpula original dando lugar a la intervención en clave contemporánea. El objeto se realiza a partir de diseño paramétrico y generativo para luego materializarlo mediante corte con CNC de placas de madera que reciben una pintura de protección. El proyecto se enmarca en un *workshop* con estudiantes de la FADU de Montevideo.

El BUGA Wood Pavilion, de 2019, del arquitecto Achim Menges (imágenes 7 y 8) implica un cambio en la concepción de la construcción digital en madera. Se trata de una caparazón de madera segmentada, inspirada en las bases biológicas que podemos

encontrar en los esqueletos de erizos de mar estudiados por el Instituto de Diseño y Construcción Computacional (ICD) y el Instituto de Estructuras de Construcción y Diseño Estructural (ITKE) de la Universidad de Stuttgart. El proyecto se materializa mediante fabricación robótica con un fresado automatizado CNC. Gracias a eso, todos los elementos encajan de manera exacta, convirtiéndose en un rompecabezas tridimensional. La cubierta cubre treinta metros con un mínimo de material. Menges realiza cada año un pabellón, dando forma a una serie de objetos en los que explora diversos elementos de la naturaleza —la tela de araña, las estructuras tensadas, las formas vegetales—, así como diversas tecnologías, como la impresión 3D o el corte mediante CNC.

Perspectivas futuras Siempre que hemos mirado a la naturaleza para inspirarnos, y más aún cuando la hemos analizado desde las herramientas más rigurosas y científicas, hemos podido crear obras maestras de arquitectura. En la historia abundan ejemplos en este sentido.

El desarrollo de métodos de cálculo cada vez más afinados que, aprovechando las capacidades computacionales, permiten diseños de vanguardia es un camino estimulante a seguir.

Por otro lado, la fabricación digital aún tiene mucho para mejorar y desarrollar, sobre todo a escala arquitectónica; no obstante, el perfeccionamiento de las diversas tecnologías de materialización llegará antes de lo pensado, transformando para siempre los modos de producir y fabricar objetos. La convergencia de lo bioinspirado, el diseño algorítmico y la fabricación digital propone un campo del que aún hemos explorado solo la punta del iceberg. Los adelantos interdisciplinarios que permiten conocer cada vez mejor los secretos que guarda la naturaleza, decodificados de manera adecuada y traducidos a algoritmos, ofrecen posibilidades enormes de diseño que aún no comprendemos en su totalidad; materializar esas formas es también algo cada vez más cercano a lo cotidiano. Esta convergencia fortalece cada uno de los ejes de diferentes maneras que podemos resumir en los siguientes puntos:

1. **Biomimética.** El diseño algorítmico permite simular sistemas y procesos naturales que luego pueden usarse como base para desarrollar proyectos arquitectónicos. Por ejemplo, un algoritmo informático podría simular el crecimiento de un árbol y luego usar la estructura resultante como base para diseñar un edificio.
2. **Optimización.** El diseño algorítmico permite optimizar el rendimiento de un edificio basándose en criterios específicos como la energía o el campo estructural. Esto se puede lograr mediante el uso de algoritmos para analizar y optimizar varios parámetros de diseño, como la selección de materiales o la geometría.
3. **Diseño generativo.** El diseño algorítmico se puede utilizar para generar múltiples alternativas de diseño que luego se pueden evaluar según criterios específicos. Esto puede ayudar a los arquitectos y diseñadores a explorar una variedad de opciones de diseño e identificar las soluciones más prometedoras.
4. **Complejidad.** El diseño algorítmico se puede utilizar para crear geometrías y estructuras complejas que serían difíciles o imposibles de crear con los métodos de diseño tradicionales. Esto puede ser particularmente útil en el diseño biomimético, donde las estructuras y patrones naturales a menudo implican una geometría compleja.

IMAGEN 6
F. Lagomarsino, cúpula
simbionte.
Fuente: <https://www.federicolagomarsino.com/un-nuevo-visitante>.



IMAGEN 7
BUCA Pavilion.
Fuente: <https://parametric-architecture.com/buga-wood-pavilion-by-icd-itke/>.



IMAGEN 8
BUCA Pavilion, detalle.
Fuente: https://parametric-architecture.com/wp-content/uploads/2019/05/BUCA_Wood-Pavilion_c_ICD_ITKE_pa_027.jpg.



Utilizando técnicas de fabricación digital, los diseñadores pueden crear objetos con mayor precisión, eficiencia y personalización que los métodos de fabricación tradicionales. La convergencia del diseño bioinspirado, el diseño algorítmico y la fabricación digital permite la creación de estructuras, edificios y sistemas inspirados en la naturaleza, optimizados mediante algoritmos computacionales y producidos utilizando técnicas avanzadas de fabricación digital. Esto puede conducir a la creación de productos y sistemas más sostenibles y eficientes que también sean estéticamente agradables y biológicamente inspirados.

Es difícil decir cuáles son los límites de este campo. Resulta más estimulante pensar que no existen y que la

arquitectura puede alcanzar niveles de diseño y fabricación insospechados.

En este sentido, si tomamos el dato de que en el mundo de la programación es donde más fácil encontramos foros de ayuda en línea que permiten el desarrollo de códigos, más aún con el desarrollo de plataformas de diseño pensadas para arquitectos, podemos imaginar que a partir de las plataformas de inteligencia artificial el desarrollo de algoritmos tiene por delante un futuro prometedor y con él la generación de arquitecturas fuertemente vinculadas a lo bioinspirado.

- BEAUCÉ, P., & CACHE, B. (2003). *Hacia un modo de producción no-standard*.
- BENYUS, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. *New York Times Book Review*. <http://scholar.google.com/scholar:Biomimicry:+Innovation+Inspired+by+Nature+by+Janine+Benyus>
- BEORKREM, C. (2013). Material Strategies in Digital Fabrication. *Material Strategies in Digital Fabrication*. <https://doi.org/10.4324/9780203100677>
- CARPO, M. (2017). *The second digital turn*. Massachusetts Institute of Technology. <https://lccn.loc.gov/2016054313>
- DARWIN, C., JOSA I LLORCA, J., & ZULUETA, A. DE. (2010). *El origen de las especies* (1.ª ed. en esta presentación en Austral). España.
- DELEUZE, G. (2006). *Diferencia y repetición*. Amorrortu.
- GAMBETTA ROSSI, S. (2020). *Codificar sentidos. Los procesos artesanales como insumo para la fabricación digital en arquitectura*. Universidad de la República.
- GARCÍA AMEN, F. (2018). Átomos y bits. *Arquisur*.
- GARCÍA AMEN, F. (2019). Físico y digital. *Arquisur*.
- GARCÍA AMEN, F., Martín Iglesias, R., Schieda, A., Lagomarsino, F., & Miret, S. (2016). *Digital domes that become urban symbionts* (892-896). <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-809>
- HEMMERLING, M., & NETHER, U. (2014). Generico. A case study on performance-based design. *SIGRADI 2014, Design in freedom*, 126-129.
- IWAMOTO, L. (2010). Digital fabrications: architectural and material techniques. *Architecture Briefs*. <http://www.papress.com/html/book.details.page.tpl?cart=125777262860796&>
- JABI, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. Laurence King Publishing Ltd.
- KHABAZI, Z. (2012). *Generative Algorithms*. Morphogenesisism. <http://morphogenesisism.com/>
- KOHLER, M., & GRAMAZIO, F. (2014). *Made by robots. Challenging architecture at a larger scale*, 229.
- KOLAREVIC, B. (2001). *Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age* (268-277).
- LEACH, N., & YUAN, P. F. (2018). *Computational Design* (Crisie Yuan, Ed.). Tongji University Press.
- NABONI, R., & KUNIC, A. (2017). *Design and Additive Manufacturing of Lattice-based Cellular Solids at Building Scale* (369-375). <https://doi.org/10.5151/sigradi2017-058>
- OXMAN, N. (2007). Digital Craft Fabrication-Based Design in the Age of Digital Production. *Workshop Proceedings for Ubicomp 2007: International Conference on Ubiquitous Computing*, 534-538.
- OXMAN, N. (2010). *Material-based Design Computation*. MIT.
- PAWLYN, M. (2016). *Biomimicry in architecture* (Vol. 1). RIBA Publishing. www.ribaenterprises.com
- PRUSINKIEWICZ, P., & LINDENMAYER, A. (1990). *The algorithmic beauty of plants*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co.K.
- SCHWAB, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.
- SPEHLING, D. M., & HERRERA, P. (2015). *Homo faber* (Instituto de arquitectura e urbanismo, Ed.).
- SZABO, A., LLORET-FRITSCHI, E., REITER, L., GRAMAZIO, F., KOHLER, M., & FLATT, R. J. (2020). *Revisiting Folded Forms with Digital Fabrication*. 2, 191-200. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_126
- TAPIA MARTÍN, C. (Ed.). (2020). *De forma et vita: La arquitectura en la relación de lo vivo con lo no vivo* (1.ª ed.). Athenaica Ediciones.
- TEDESCHI, A. (2014). AAD Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper en *Le penseur publisher*.
- TERZIDIS, K. (2006). *Algorithmic Architecture*. Elsevier.
- THOMPSON, D. W. (1942). *On Growth and Form*. Cambridge University Press.
- YUAN, P. F., XIE, M., & LEACH, N. (2019). *Architectural Intelligence* (Número Cdrf). Springer us.