

La piel como membrana funcional en el ámbito de la arquitectura

Ángela Monje Pascual ⁽¹⁾

Resumen: La naturaleza ha sido una fuente inagotable de inspiración. El estudio y la emulación de los modelos naturales ha influido profundamente en la arquitectura, el interiorismo y el arte. Los patrones de la naturaleza, visibles en formaciones cristalinas, redes venosas y estructuras óseas, han sido aplicados de diferente forma a lo largo de la historia. Los fractales, patrones geométricos repetitivos que se encuentran en la naturaleza, combinan la complejidad y la simplicidad de las formas vegetales, paneles de abejas, burbujas de jabón, el flujo del agua o la formación de las nubes.

La creación de diseños inspirados en patrones y estructuras naturales, tanto a nivel formal como funcional, puede conducir a soluciones sostenibles y eficientes en el ámbito de la arquitectura. El concepto de la piel o membrana funcional en la naturaleza, que actúa como una barrera protectora y un regulador del intercambio de energía, ha sido adaptado para desarrollar envolventes de edificios que mejoran la eficiencia energética y la calidad del ambiente interior. Las fachadas dinámicas, inspiradas en las escamas de los peces o la piel de los reptiles, y la integración de los jardines verticales pueden adquirir diferentes formas en respuesta a las condiciones climáticas.

Frei Otto, conocido por sus innovadoras estructuras tensadas que imitan las redes de araña y las membranas biológicas, ha sido una influencia significativa en este campo, como también lo han sido las bóvedas de Gaudí, los esqueletos de Calatrava o las formas sinuosas de Zaha Hadid.

La biomimética ha transformado el diseño arquitectónico y artístico, proporcionando soluciones innovadoras y sostenibles que reflejan la eficiencia y belleza de la naturaleza. El trabajo de la arquitecta Nery Osman ejemplifica este enfoque, demostrando cómo la naturaleza puede inspirar el diseño contemporáneo para crear un mundo construido en armonía con el entorno natural.

Palabras clave: Fractal - Biomimética - Sostenibilidad - Patrón natural - Membrana - Piel - Biobasado

[Resúmenes en inglés y en portugués en las páginas 158-159]

⁽¹⁾ **Ángela Monje** es Doctora en Arquitectura por la Universidad Politécnica de Madrid (2016) con la máxima calificación, Sobresaliente Cum Laude, con la defensa de la tesis doctoral: La Arquitectura del Trabajo. El entorno de la oficina en el siglo XX, hacia una organización informal. Arquitecta por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura

de Madrid (1994); Beca Erasmus en la Università IUAV di Venezia (curso 1991-92) y Erasmus+Teaching (curso 2024-25); Investigadora en el Creative Campus de la Universidad Europea dentro del grupo de investigación: Ecología material: biomaterialidades inter-especies en el marco de ciencia, arte y tecnología (Ecomat); Profesora de la Universidad Europea de Madrid, anteriormente en diversas entidades de la Universidad Politécnica de Madrid: Grado de Diseño de Interiores, Proyecto fin de carrera en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Máster en Diseño de Interiores; además de conferencias en la UPM, el COAM y en la Escuela Universitaria de Diseño, Innovación y Tecnología, ESNE. Su actividad profesional se dirige fundamentalmente a la organización laboral y los entornos del trabajo. Mantiene una estrecha relación de forma continuada con varias compañías del sector, con servicios de asesoría, implantación, diseño y branding del lugar de trabajo. Es autora de numerosos artículos publicados en libros de arquitectura y revistas universitarias y del libro *La Arquitectura del Trabajo*, publicado por Textos de Arquitectura y Diseño de la Editorial Diseño, con el patrocinio de C&W, 1ª edición en febrero 2020 y 2ª edición en junio 2020.

1. La arquitectura biomimética inspirada en la piel de los organismos

En la intersección entre la arquitectura, la biomimética y la sostenibilidad, surge un enfoque que aborda la envolvente de los edificios inspirándose en la piel de los organismos. La piel, como barrera protectora y reguladora de energía en los seres vivos, plantea interesantes reflexiones sobre cómo los edificios pueden mejorar su eficiencia y resiliencia mediante diseños que imitan patrones y procesos naturales. En este artículo, exploraremos esta tendencia que busca crear estructuras más sostenibles en armonía con su entorno, a través del uso de principios fractales y membranas inspiradas en la naturaleza.

La biomimética, disciplina que se basa en imitar la naturaleza, ha encontrado en la arquitectura un campo fértil para la aplicación de sus principios. Al observar la forma en que la piel de los organismos regula la temperatura, controla la humedad y protege de agentes externos, los arquitectos han comenzado a diseñar envolventes de edificios que imitan estas funciones. La piel es el órgano más grande del cuerpo humano y desempeña una serie de funciones altamente sofisticadas, como proteger contra agentes externos, regular la temperatura interna e impermeabilizar el agua. En los animales, la piel adquiere múltiples formas que incluyen también pelo, escamas, plumas, conchas y exoesqueletos. De manera similar, la envolvente de un edificio cumple un papel clave para regular y controlar el agua, el aire, la temperatura y la luz, entre otros agentes externos, con el fin de mejorar el funcionamiento del edificio.

El propósito de la biomimética es crear estructuras que se comporten de manera similar a la piel de los organismos, adaptándose a las condiciones cambiantes del entorno y optimizando el uso de recursos. Al imitar la capacidad de autorregulación de la piel, se logra mejorar el confort de los ocupantes, se reduce el consumo energético y se aumenta la eficiencia de las estructuras.

2. La naturaleza en la historia de la arquitectura

La piel arquitectónica no se limita a una envoltura estética, sino que también desempeña un papel crucial en la sostenibilidad y eficiencia energética de los edificios. Esta tendencia ha evolucionado el campo de la arquitectura y el diseño de la mano de algunos arquitectos y sus obras más emblemáticas que han incorporado una piel como membrana, en un primer momento, con un interés formal. Poco a poco van incorporando otros aspectos con el fin de mejorar su funcionalidad y sostenibilidad, el aislamiento térmico y acústico, la protección del ruido, la regulación de la incidencia del sol y el control de la entrada de luz natural, entre otras funciones

La influencia de los patrones presentes en la naturaleza ha sido una fuente inagotable de inspiración para diversas disciplinas. La fachada externa, concebida como piel de la arquitectura, se ha inspirado en innumerables ocasiones en estructuras biológicas. Desde formaciones cristalinas hasta redes venosas y estructuras óseas, los patrones naturales han sido aplicados de diferentes formas en la arquitectura, dando lugar a obras maestras que reflejan la belleza y eficiencia de la naturaleza.

En el sentido más literal, en el periodo comprendido entre el siglo XIX y XX, el art Nouveau francés y todas sus variantes europeas, el *Modern style* inglés, el secesionismo de Viena, el *Jugendstil* alemán, el estilo *Liberty italiano* y el modernismo catalán, incorporan las formas de la naturaleza en todas las disciplinas del arte, desde el diseño gráfico de los carteles de la época, el diseño de los objetos y el mobiliario, hasta la arquitectura en su conjunto de forma integral, con autores como Victor Horta, Hector Guimard, Berlage, Otto Wagner y Olbrich. El arquitecto español más emblemático en la aplicación de elementos naturales en la arquitectura es Antoni Gaudí, que se inspiró en las formas orgánicas de la naturaleza para crear obras como la Sagrada Familia en Barcelona, donde los arcos en catenaria inversa imitan la forma de un bosque, y las columnas se asemejan a troncos de árboles que se ramifican hacia el techo.

En las primeras décadas del siglo XX en Estados Unidos, Frank Lloyd Wright, incorporó elementos de la naturaleza en sus construcciones con una visión menos literal. En primer lugar, con el uso de materiales naturales como la madera y la piedra que acercan al elemento construido la sensibilidad y la textura de la naturaleza. En segundo lugar, mediante la integración de las formas naturales en la propia estructura, siguiendo el diseño integral inculcado por su maestro Louis Sullivan, como resuelve en el patio central de la Johnson Wax (1939) con los pilares cónicos que se abren hacia arriba como los troncos de los árboles en un bosque. De forma más directa, en su obra *Fallingwater*, la Casa de la Cascada, del mismo año, integra la arquitectura en la misma naturaleza, un claro ejemplo de cómo la arquitectura puede fusionarse con el entorno natural, creando un espacio armonioso y equilibrado. Todas estas estrategias de proyecto (la imitación formal más o menos literal, el uso de materiales naturales y la integración en la naturaleza) son prácticas habituales y repetidas a lo largo de la historia de la arquitectura.

3. La naturaleza en la arquitectura contemporánea

La influencia de los patrones naturales sigue estando presente con el mismo vigor en la arquitectura contemporánea. Los exoesqueletos han dado una variada gama de soluciones, desde las vigas huecas de Ficac a las fachadas estructurales de Santiago Calatrava, uno de los arquitectos más productivo que ha llevado la imitación de los organismos de la naturaleza a un nuevo nivel. La piel externa de sus edificios está sometida a un orden geométrico que imita las estructuras óseas y los troncos de árboles, en consonancia con la arquitectura futurista y aerodinámica, siempre vinculado a algunas obras de ingeniería como las de Pier Luigi Nervi, Maillart o Torroja y Candela. En el Museo de las Ciencias en Valencia la estructura evoca la forma de un esqueleto animal que parece emerger del paisaje con elegancia y fluidez. La estructura orgánica de los edificios de Calatrava nos recuerda a huesos entrelazados y crea un efecto visual que evoca la idea de movimiento y fluidez, al tiempo que ofrece protección solar y ventilación natural. Este prolífico arquitecto, con esta manera de trabajar el acercamiento a la naturaleza dejando la estructura al descubierto, ha construido numerosos puentes, como el de Sevilla o Mérida, la emblemática torre de Barcelona en el anillo olímpico, la torre de comunicaciones en Valencia, varias estaciones de ferrocarril en Suiza, Francia e Italia, el aeropuerto en Bilbao, un auditorio en Tenerife, el Parlamento en Berlín, la catedral en Nueva York y numerosos pabellones y marquesinas. Algunos arquitectos visionarios como Frank Gehry, conocido por sus estructuras fluidas y esculturales, se decantan por ocultar la estructura con una piel externa y brillante que se asemeja a las escamas de un pez. El Museo Guggenheim en Bilbao es una de sus obras más famosas, donde la fachada revestida de titanio ondulado proporciona al edificio una apariencia dinámica y contemporánea a la vez que refleja la identidad marítima de la ciudad. La Casa Danzante en Praga, diseñada por Gehry en 1994, es un vivo ejemplo de cómo las formas dinámicas pueden manifestarse en la arquitectura contemporánea, desafiando las convenciones y creando espacios que evocan la belleza caótica de la naturaleza.

En la misma línea proyectual, la arquitecta Zaha Hadid, reconocida por sus diseños orgánicos y fluidos, ha incorporado fachadas sinuosas en sus obras. El *Heydar Aliyev Center* en Bakú, de 2012, es un ejemplo de esta orientación de la arquitectura basada en las formas orgánicas que ha dejado una huella imborrable en el paisaje urbano. La fachada curvilínea del centro cultural que engloba todo el conjunto sin diferenciar la cubierta de los parámetros verticales se asemeja a la piel de una serpiente en movimiento, creando una sensación de continuidad y fluidez que desafía las convenciones arquitectónicas tradicionales.

Las fachadas dinámicas inspiradas en la naturaleza han abierto nuevas posibilidades creativas en la arquitectura contemporánea. A través de ejemplos como las obras de Santiago Calatrava, Frank Gehry y Zaha Hadid, podemos apreciar cómo la influencia de las formas orgánicas en la naturaleza puede transformar no solo la apariencia de los edificios, sino también su funcionalidad y su relación con el entorno. No son solo expresiones artísticas, sino también soluciones transformadoras que demuestran la capacidad de la arquitectura para inspirarse en el mundo natural y crear espacios verdaderamente únicos y sorprendentes.

La integración de los patrones naturales en la arquitectura nos recuerda la conexión profunda que existe entre el ser humano y su entorno, y nos invita a reflexionar sobre la importancia de preservar y respetar la belleza y la armonía de la naturaleza en nuestras

creaciones arquitectónicas y artísticas. Otro ejemplo relevante es el Museo de Arte, Arquitectura y Tecnología (MAAT) en Lisboa, Portugal, diseñado por la arquitecta británica *Amanda Levete Architects* en 2016. En este caso, la fachada del museo está compuesta por cientos de azulejos cerámicos de un blanco brillante que reacciona según la posición del sol, generando patrones cambiantes de luz y sombra que dan vida al edificio y lo integran de manera armoniosa con su entorno ribereño. El techo en voladizo crea una sombra que refleja la luz vibrante del agua del río Tajo.

4. Los fractales: Naturaleza y Arquitectura

Las fachadas orgánicas en la arquitectura contemporánea han adoptado una estética inspirada en la naturaleza, un vasto y complejo lienzo donde la belleza se entrelaza con precisión matemática. Estos patrones geométricos repetitivos se encuentran en diversos elementos naturales que despiertan nuestra curiosidad sobre la conexión entre las estructuras aparentemente caóticas y el orden subyacente. Las ramificaciones de los árboles, las flores en espiral y los patrones de las hojas reflejan la intrincada simplicidad de los fractales. En el reino animal, la disposición de las escamas de un pez, los paneles de abejas, las manchas de un leopardo, la piel de los reptiles o las alas de los exhiben esta misma estructura matemática subyacente.

Este enfoque ha permitido a los arquitectos explorar nuevas posibilidades de diseño basándose en la biomimética, que puede ofrecer resultados más eficientes a nivel energético al permitir una mejor ventilación natural y una reducción de la acumulación de calor. Estas innovaciones no solo optimizan el consumo energético de los edificios, sino que también promueven un entorno más saludable, al integrar características naturales que mejoran la calidad del aire y reducir la contaminación urbana. A través de la colaboración entre disciplinas, como la biología y la arquitectura, podemos crear soluciones que aborden problemas ambientales reales y fomenten un desarrollo urbano sostenible (Fried *et al.*, 2020).

Al observar la naturaleza, podemos identificar claramente la presencia de fractales, descubiertos por el matemático Benoît B. Mandelbrot en la década de 1970, y que han revolucionado nuestra comprensión de la geometría y su aplicación en diferentes disciplinas. Estos patrones se caracterizan por repetirse a diferentes escalas, manteniendo la misma estructura a pesar de la ampliación o reducción. Los fractales representan la fusión perfecta entre la complejidad y la simplicidad en la naturaleza. Su presencia omnipresente nos invita a reflexionar sobre la profundidad de la geometría y su papel en la creación de un mundo diverso y asombroso. Desde los pétalos de una flor hasta los rascacielos de una ciudad, los fractales nos recuerdan que, detrás de cada forma, yace un orden matemático que conecta todas las cosas en un intrincado tejido de belleza y armonía. Este concepto de autosimilitud ha sido fundamental en campos como la física, la biología, la economía e incluso la arquitectura.

En el ámbito arquitectónico, los fractales han inspirado a muchos diseñadores a crear edificaciones que fusionan la estética con la funcionalidad. El proyecto para el Centro de Ar-

tes Escénicas de Taipéi, del estudio NL Architects, se basa en un volumen a escala urbana. Un cubo perforado por caminos alternativos, como un queso de gruyere, permite a los peatones acceder a una plaza interior protegida de los agentes meteorológicos, que induce al encuentro y a la interacción social. Stevens Holls diseñó el Simmons Hall del Massachusetts Institute of Technology inspirándose en la estructura de una esponja natural. Se trata de un gran volumen en forma de paralelepípedo compuesto por una distribución fractal de agujeros basados en el cubo que se desarrolla en múltiples formas a partir del fractal. A estas dos obras las acompañan otras muchas con similares intenciones, como Cluster en el aire, ciudad metabólica (Arata Isozaki, 1962) y Habitat 67 (Safdie Rabines, 1967).

La influencia de los fractales en la arquitectura va más allá de la forma. La eficiencia energética, la optimización de los recursos y la sostenibilidad son aspectos que se ven beneficiados por la aplicación de estos principios matemáticos. El diseño de edificios que imitan la estructura de los bosques para maximizar la entrada de luz natural, o la planificación de ciudades que siguen patrones fractales para favorecer la interacción social y reducir la congestión son ejemplos tangibles de cómo los fractales pueden guiar la creación de entornos más armoniosos y habitables.

5. Las fachadas mecanizadas como piel funcional

En el mundo de la arquitectura contemporánea, la innovación y la funcionalidad se han convertido en aspectos fundamentales a la hora de diseñar edificios sostenibles y eficientes. Las fachadas móviles y mecanizadas han emergido como una solución versátil y dinámica que no solo actúa como una barrera protectora, sino que también regula el intercambio de materiales y energía, cumpliendo así un papel crucial en la definición de la identidad de un edificio.

Las fachadas que permiten el movimiento de algunos elementos arquitectónicos a modo de lamas o parasoles pueden cambiar su posición o configuración para adaptarse a las condiciones ambientales o a las necesidades específicas de los ocupantes. Estas estructuras, a menudo diseñadas como una especie de piel o membrana funcional, permiten controlar la entrada de luz, calor, frío, aire y sonido en el interior de un edificio, optimizando su eficiencia energética y creando espacios interiores confortables y saludables, con un papel relevante en la creación de edificios más eficientes, sostenibles y estéticamente atractivos. Los beneficios de una doble piel ya han sido explorados durante el siglo pasado con numerosos ejemplos. La arquitectura tradicional mediterránea utiliza entramados de madera y celosías cerámicas que aportan una permeabilidad visual con influencia del mundo árabe. Una piel añadida y protectora favorece la protección solar, mejora las condiciones aislantes frente al ruido y reduce la acción del viento en edificios altos. En el siglo XX, las grandes superficies de vidrio del movimiento moderno dieron lugar al estático y pesado parasol de hormigón que utilizó Le Corbusier en las zonas cálidas del mediterráneo para evitar el efecto invernadero. En la Unidad de Habitación de Marsella de los años cincuenta, la propia estructura del edificio da forma al parasol o *brise-soleil* más estético que funcional, ya que, aunque evita la radiación del sol, transmite el calor hacia el interior por convección,

como un radiador que transmite el recalentamiento del propio hormigón. Estas primeras soluciones han dado paso a otras estructuras metálicas más ligeras que, separadas de la estructura, no almacenan el calor. Egor Eisemann incorpora al edificio Olivetti de Frankfurt de los años setenta una envolvente externa de lonas tensadas a modo de una doble piel que permite el paso del aire y la ventilación y además proporciona un aislante acústico nada despreciable en zonas urbanas (Monje, 2016: 240-244).

Además, una doble fachada ligera a modo de membrana exterior permite mejorar no solo el funcionamiento térmico y acústico de los edificios nuevos y, por lo tanto, facilita un ahorro energético, sino que es muy adecuado en intervenciones realizadas en edificios existentes desfasados que pueden ser recuperados y renovados con una doble piel que mejora su calidad estética exterior y protege de agentes climáticos externos como el soleamiento, el aire y el ruido.

La membrana funcional podría ser más eficaz si se le dota de movilidad para adaptarse a las condiciones variables de temperatura y luz. El Instituto del Mundo Árabe en París, construido por el renombrado arquitecto francés Jean Nouvel en 1987, lleva al extremo esta idea. Incorpora una fachada compuesta por miles de diafragmas metálicos que se abren o cierran automáticamente para regular la cantidad de luz solar que entra al interior del edificio, creando un juego de luces y sombras que evoca la tradición arquitectónica árabe y que le mereció el premio Pritzker en el 2008. La geometría fractal presente en la naturaleza se hace evidente en cada detalle de esta obra maestra arquitectónica.

A través de ejemplos como el Instituto del Mundo Árabe y el MAAT, podemos apreciar cómo la integración de tecnologías innovadoras y conceptos arquitectónicos avanzados puede transformar la forma en que concebimos y experimentamos el espacio construido. La movilidad y la tecnología pueden ser convenientes desde el punto de vista de la sostenibilidad si su uso es rentable en cuanto al derroche energético. Los edificios son los responsables del 40% del consumo total de energía lo que equivale a un gran porcentaje de las emisiones de dióxido de carbono (Rifkin, 2011). El consumo energético que conlleva el uso de la más alta tecnología tanto en la construcción de estos sofisticados edificios como en su mantenimiento nos hace pensar que quizá el mundo ya no esté alineado con estos proyectos que afectan negativamente la sostenibilidad del planeta y busque respuestas más integradas con el entorno, considerando el ciclo vital de los edificios con una concepción global del proyecto y con una nueva mirada hacia la naturaleza.

6. La integración de los jardines verticales como envolvente de edificios.

En la actualidad, la arquitectura sostenible ha cobrado una relevancia significativa en la industria de la construcción. Uno de los elementos arquitectónicos que ha ganado popularidad en los últimos años es la integración de jardines verticales como parte de la envolvente de edificios, combinando diseño innovador, sostenibilidad y bienestar humano. Esta práctica aporta una serie de beneficios, tanto en términos ambientales como en la calidad de vida de las personas que habitan estos espacios.

Los jardines no solo embellecen las estructuras urbanas, sino que también proporcionan una serie de beneficios tangibles que contribuyen a la creación de entornos más habitables y respetuosos con el medio ambiente. Los jardines verticales (Faezeh Bagheri Moghaddam *et al.*, 2021) actúan como aislantes naturales, lo que ayuda a regular la temperatura interior de los edificios, reducen la necesidad de sistemas de calefacción o aire acondicionado y contribuyen a la ventilación natural de los espacios, mejorando la calidad del aire y creando entornos más saludables para sus ocupantes. Otro beneficio importante de los jardines verticales es su capacidad para reducir la acumulación de calor en las estructuras, especialmente en entornos urbanos donde el efecto isla de calor es una preocupación creciente. Al absorber la radiación solar y evaporar agua a través de la transpiración de las plantas, estos jardines ayudan a mantener temperaturas más frescas alrededor de los edificios, disminuyendo la necesidad de utilizar sistemas de refrigeración que consumen grandes cantidades de energía.

Además de los aspectos ambientales, los jardines verticales también ofrecen beneficios en términos de bienestar y calidad de vida. Estos espacios verdes en altura proporcionan un contacto directo con la naturaleza, creando entornos más agradables y relajantes para quienes trabajan o viven en estos edificios. La presencia de vegetación también contribuye a la reducción del ruido proveniente del exterior, actuando como una barrera acústica que mejora el confort acústico de los espacios interiores.

En cuanto a ejemplos relevantes de obras arquitectónicas que han incorporado jardines verticales de manera exitosa, cabe mencionar el *Bosco Verticale* en Milán (Italia), diseñado por Stefano Boeri. Este innovador complejo residencial consta de dos torres cubiertas de plantas, creando un microclima que favorece la biodiversidad urbana y la calidad del aire. Otro ejemplo destacado es el Museo Acuario Inbursa en Ciudad de México, obra del arquitecto Fernando Romero, que cuenta con una fachada verde que no solo embellece el edificio, sino que también lo dota de propiedades térmicas y acústicas únicas.

7. Las telas de araña y las espumas como membranas

En los tiempos líquidos en los que nos encontramos (Bauman, 2007), la vida se desarrolla desde un punto de vista multifocal, con múltiples perspectivas, en escenarios simultáneos e interconectados. La sociedad se mueve en una estructura menos sólida, más impredecible, como una matriz de conexiones y desconexiones aleatorias. La forma arquitectónica estática reduce su valor cuando se confronta con la movilidad, que se adecúa mejor a las nuevas situaciones, una flexibilidad que adquiere un importante valor gracias a su presencia efímera.

Adquieren ahora mayor relevancia otras formaciones naturales más inestables, como: las telas de las arañas, las burbujas de jabón, el flujo del agua, la formación de las nubes o los copos de nieve, que han inspirado a toda una línea proyectual. Como dice Friedrich Nietzsche en *“Así habló Zaratustra”*, quienes más saben de la felicidad son las mariposas y las burbujas de jabón. Sloterdijk se refiere a esto con “la festiva imagen de la espuma”, “donde se lamentaban pérdidas de forma, aparecen ganancias en movilidad” (Sloterdijk,

2004). Para tratar esta línea de trabajo nos vamos a centrar en los proyectos de Frei Otto y Buckminster Fuller.

Frei Otto (1925-2015) es célebre por sus innovadoras estructuras ligeras. Su experiencia en tensiones y estructuras de membrana le convirtieron en un arquitecto innovador para su época que continúa siendo extraordinariamente contemporánea. La carrera de Otto dio un giro significativo en la Exposición Universal de Montreal en 1967, donde presentó su innovador pabellón para Alemania, inspirado en las tiendas de campaña o carpas, uno de los primeros refugios ideados por el ser humano. A partir de este arquetipo arquitectónico, Otto desarrolla las estructuras tensadas, que presentan una serie de ventajas en comparación con otros tipos de construcciones. El término tenso-estructura se utiliza comúnmente para describir aquellas estructuras que combinan membranas y cables de acero con el fin de crear amplias cubiertas. Sus características más destacadas incluyen la resistencia a la tracción, la prefabricación y la flexibilidad en el diseño. Este tipo de construcción requiere de un material mínimo, ya que utiliza lonas delgadas que, al ser tensadas, generan superficies capaces de resistir las fuerzas que actúan sobre ellas, una arquitectura económica y versátil, fácil de montar y desmontar, por lo tanto, reciclable. Otra de sus obras más destacadas es el Multihalle, desarrollado en colaboración con los arquitectos Carlfried Mutschler + Partner en 1975, que sigue siendo la mayor estructura independiente de retícula de madera a nivel mundial.

El pabellón de Otto, junto a la Biofera de Buckminster Fuller y Hábitat 67 de Moshe Safdie formaron parte de la arquitectura moderna en la Expo de Montreal, cuyo tema central era "el hombre y su mundo". Fuller ya había experimentado formas geodésicas experimentales durante veinte años con la obsesión de reducir la cantidad de material utilizado. La estructura reticular y repetitiva, inicialmente cubierta por una membrana de acrílico, cubría un impresionante volumen que albergaba el conjunto de la exposición.

8. Los materiales biobasados como membranas

La experimentación con nuevos materiales abre un campo a la investigación de la piel arquitectónica más allá de los materiales habituales como la madera de los entramados, las arcillas de las celosías, las lonas de las tenso-estructuras o la vegetación de los jardines verticales. Los materiales biobasados proceden de materias primas renovables, por lo que son materiales biodegradables que no generan residuos. Algunas universidades llevan a cabo investigaciones en este campo con excelentes resultados en el diseño de moda y la arquitectura. Estos materiales pueden englobarse en dos grandes grupos, los procesados o *craft materials* y los cultivados vivos o *growing materials*. Dentro de los procesados se pueden producir bioplásticos, de base vegetal o animal, bioespumas, biohilos, biocueros y biocomposites, estos últimos tan resistentes que pueden aplicarse en mobiliario y construcción. El segundo grupo, los biocompuestos cultivados, pueden ser de dos tipos, de celulosa bacteriana o de micelio. El micelio es la parte oculta del hongo, las hifas con forma de filamentos, que constituyen una red debajo de la tierra. Esta red de rápido crecimiento crece con la forma deseada y se convierte en un material que puede llegar a ser más resistente que el hormi-

gón, pero mucho más ligero, duradero y compostable, similar al poliestireno expandido, actuando como aislante térmico y acústico y con buen comportamiento ante el fuego y, además, biodegradable. Cuando el hongo se implanta, el micelio cementa el sustrato de serrín, madera molida, paja o residuos agrícolas, a modo de pegamento, y se convierte en un bloque sólido. Actualmente se aplica en la moda, en el diseño de muebles y como elemento arquitectónico en pavimentos exteriores, paneles acústicos, mobiliario y ladrillos.

La arquitecta Germano-Israelí Yasmine Mahmoudieh realizó en la *Scoletta dei Tiraoro e Battioro* del Gran Canal, con el motivo de la Bienal de Arquitectura en Venecia de 2023, una instalación a la que denominó “Metamorphosis”. Desarrollada en tres espacios, estaba conformada con piezas onduladas impresas en 3D de plástico reciclado procedente de los océanos y micelio. Se trata de una investigación sobre el potencial de los biomateriales y la sostenibilidad, con el micelio como material del futuro para la construcción.

En 2014, The Living realizó en el patio del MoMA PS1, en Nueva York, un pabellón temporal Hy-Fi, de doce metros de altura, junto a ARUP, que calculó la estructura. Estaba formado por ladrillos de micelio, desarrollados por *Ecovative Design*, que fueron desmontados después de la exposición y se llevaron a compostadores, sin producir desperdicios. Los ladrillos estaban armados de desechos agrícolas, crecieron en menos de una semana en moldes prismáticos a partir de residuos de tallos de maíz picados.

Una de las experimentaciones que mejor representan este enfoque de la piel como membrana son las llevadas a cabo por la arquitecta Nery Oxman, profesora en el MIT Media Lab, que utiliza texturas biológicas con elementos vivos en los procesos de fabricación, como el uso de gusanos de seda en el *Silk Pavilion*. El grupo de investigación que dirige, *Mediated Matter*, explora las posibilidades del diseño computacional y la fabricación digital inspiradas en la biología. En 2014, el *Ocean Pavilion* se construyó con estructuras de quitosano, formado por cáscara de los crustáceos y soluble en agua, combinando estructura duras y suaves del mismo material. Nery Osman ha realizado importantes contribuciones teóricas que han enriquecido el debate en torno a la piel como membrana en la arquitectura. A través de publicaciones académicas y conferencias internacionales, ha compartido su visión audaz y provocativa, desafiando a otros profesionales del campo a repensar sus enfoques y a explorar nuevas posibilidades creativas. Su influencia se extiende más allá de sus proyectos individuales, inspirando a toda una generación de arquitectos a considerar la piel no solo como un elemento estético, sino como una parte integral e indispensable de la experiencia arquitectónica.

Conclusiones

Las formas orgánicas de la naturaleza han sido una fuente inagotable de inspiración para la arquitectura a lo largo de la historia, desde el organicismo vegetal de Antonio Gaudí a los exoesqueletos de Miguel Fisac o Santiago Calatrava, por centrarnos en ejemplos españoles. Los arquitectos han sabido capturar la esencia y la belleza de la naturaleza en sus obras basándose en la biomimética para crear espacios innovadores. La influencia de los fractales y los patrones naturales sigue estando presente con el mismo vigor.

La arquitectura ha encontrado en la piel de los organismos una inspiración para encontrar el modo de regular la temperatura, controlar la humedad y proteger de los agentes externos. Una doble piel arquitectónica, no solo optimizan el consumo energético de los edificios, sino que también promueven un entorno más saludable, que mejora la calidad del aire y reduce la contaminación urbana. Las celosías de cerámica, los fraileros de madera, el *brise-soleil* de hormigón, las telas tensadas, los diafragmas mecanizados o las fachadas verdes protegen la fachada del soleamiento, permiten la ventilación, proporcionan aislamiento acústico y pueden ofrecer una nueva fachada a los edificios que se hayan quedado obsoletos. La sostenibilidad y la experimentación con materiales biobasados abre un nuevo campo a la investigación de la piel arquitectónica, más allá de los materiales habituales. Tanto si son procesados como cultivados vivos, estos materiales pueden aplicarse en el mobiliario y en la construcción, y por lo tanto, tienen las características adecuadas para que conformen una membrana externa que constituya una parte integral de la arquitectura contemporánea móvil y efímera, como la piel en los organismos vivos.

Referencias bibliográficas

- Ábalos, I., & Herreros, J. (2000). *Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea 1950-2000*. Ediciones Nerea.
- Agrest, D. (1991). *Architecture from Without. Theoretical Framing for a Critic*. MIT Press.
- Baldwin R., Yates A., Howard N., Rao S., (1998). *BREEAM 98 for office*. Watford. BRE.
- Bagheri Moghaddam, F., Navarro Delgado, I., Redondo Domínguez, E., Fort Mir, J. M. & Giménez Mateu, L. (2021). Understanding the performance of vertical gardens by using building simulation and its influences on urban landscape. *ACE: Architecture, City and Environment*, 16(47). <https://doi.org/10.5821/ace.16.47.10321>.
- Bauman, Z. (2007). *Tiempos líquidos: Vivir en una época de incertidumbre*. Tusquets editors.
- Frampton, K. (1968, julio). A house of Ivy Leagues values. *Architectural Design*.
- Hascher, R (2005). Sostenibilidad aplicada a los edificios de oficinas. En *Atlas de edificios de oficinas*. Gustavo Gili.
- Le Corbusier (1930). *Précisions sur un état present de l'architecture et de l'urbanisme*. G. Grés.
- Le Corbusier (1935). *La ville Radieuse*. L'Architecture d'Aujourd'hui.
- Lutz, M. (2005). La envolvente cambiante. En *Atlas de edificios de oficinas* (pp. 75-90). Gustavo Gili.
- Moneo, R. (1985, diciembre). Sobre el John Hancock de I.M.Pei & Partners. *Arquitecturas bis*, (52), 12-19.
- Monje Pascual, Á. (2016). *El ahorro energético de una doble piel*. En *The power of skin. New materiality in contemporary Architectural Design*. (pp. 35-52). Arcadia mediática.
- Pogrebin, Robin. (2015, 10 de marzo). Pritzker Prize for Frei Otto, German Architect, Is Announced After His Death. *New York Times*. http://www.nytimes.com/2015/03/11/arts/design/frei-otto-german-architect-wins-pritzker-prize-posthumously.html?_r=0.

- Rifkin, J. (2012). *La tercera Revolución Industrial. Cómo el poder lateral está transformando la energía, la economía y el mundo*. Paidós.
- Sloterdijk, P. (2006). *Esferas III*. Ediciones Siruela.

Abstract: Nature has been an inexhaustible source of inspiration. The study and emulation of natural patterns has profoundly influenced architecture, interior design and art. Nature's patterns, visible in crystalline formations, vein networks and bone structures, have been applied in different ways throughout history. Fractals, repetitive geometric patterns found in nature, combine the complexity and simplicity of plant forms, bee panels, soap bubbles, the flow of water or the formation of clouds.

Creating designs inspired by natural patterns and structures, both formally and functionally, can lead to sustainable and efficient architectural solutions. The concept of the functional skin or membrane in nature, which acts as a protective barrier and a regulator of energy exchange, has been adapted to develop building envelopes that improve energy efficiency and the quality of the indoor environment. Dynamic façades, inspired by fish scales or reptile skin, and the integration of vertical gardens can take on different forms in response to climatic conditions.

Frei Otto, known for his innovative tensile structures that mimic spider webs and biological membranes, has been a significant influence in this field, as have Gaudí's vaults, Calatrava's skeletons or Zaha Hadid's sinuous forms.

Biomimetics has transformed architectural and artistic design, providing innovative and sustainable solutions that reflect the efficiency and beauty of nature. Architect Nery Osman's work exemplifies this approach, demonstrating how nature can inspire contemporary design to create a built world in harmony with the natural environment.

Keywords: Fractal - Biomimetics - Sustainability - Natural Pattern - Membrane - Skin - Bio-based

Resumo: A natureza tem sido uma fonte inesgotável de inspiração. O estudo e a emulação de padrões naturais influenciaram profundamente a arquitetura, o design de interiores e a arte. Os padrões da natureza, visíveis em formações cristalinas, redes de veias e estruturas ósseas, foram aplicados de diferentes maneiras ao longo da história. Os fractais, padrões geométricos repetitivos encontrados na natureza, combinam a complexidade e a simplicidade das formas das plantas, painéis de abelhas, bolhas de sabão, o fluxo da água ou a formação de nuvens.

A criação de projetos inspirados em padrões e estruturas naturais, tanto em termos formais quanto funcionais, pode levar a soluções arquitetônicas sustentáveis e eficientes. O conceito de pele ou membrana funcional na natureza, que atua como uma barreira protetora e um regulador da troca de energia, foi adaptado para desenvolver envelopes de edifícios que melhoram a eficiência energética e a qualidade do ambiente interno. Fachadas

dinâmicas, inspiradas em escamas de peixe ou pele de répteis, e a integração de jardins verticais podem assumir diferentes formas em resposta às condições climáticas.

Frei Otto, conhecido por suas inovadoras estruturas de tração que imitam teias de aranha e membranas biológicas, tem sido uma influência significativa nesse campo, assim como as abóbadas de Gaudí, os esqueletos de Calatrava ou as formas sinuosas de Zaha Hadid.

A biomimética transformou o design arquitetônico e artístico, oferecendo soluções inovadoras e sustentáveis que refletem a eficiência e a beleza da natureza. O trabalho do arquiteto Nery Osman exemplifica essa abordagem, demonstrando como a natureza pode inspirar o design contemporâneo para criar um mundo construído em harmonia com o ambiente natural.

Palavras-chave: Fractal - Biomimética - Sustentabilidade - Padrão natural - Membrana - Pele - Base biológica
