

Claves de la biomimética y parametrisismo enfocados a la arquitectura

Keys of biomimetics and parametric on architecture

Diego Rodríguez de Ita¹
Sofía Alejandra Luna Rodríguez²

Resumen

Se considera que los beneficios de hacer una arquitectura que imite y simule las formas que existen en la naturaleza van de reducción de síntomas del estrés, disminución del ritmo cardiaco y aumento en la sensación de confort.

Para poder comprender de una forma más exacta como surgen las formas en la naturaleza hemos sido llevados a estudiar la biomimética. Ciencia que intrínsecamente revisa a detalle estos factores, pero además nos damos cuenta que la naturaleza es profundamente interesante; en su desarrollo los seres vivos se auto organizan para ahorrar todos sus recursos propios, así mismo para evolucionar lo mejor posible en su entorno y crear nuevas soluciones extraordinarias de adaptación.

Todo esto nos ha llevado a plantearnos desarrollar una arquitectura que simule lo mas pegado a la realidad las formas de los seres vivos, pero, además, que ahorren todos los recursos posibles (energéticos, hidráulicos, entre otros) así mismo que esté propiamente adaptada en su entorno.

Todo esto puede ser realizado en la arquitectura paramétrica, ya que es un estilo que permite utilizar basta información y conectarla para generar nuevas posibilidades arquitectónicas.

Así la investigación nos ha llevado a estudiar biomimética, crecimiento biológico, teorías de evolución, parametrisismo, entre otras.

Palabras Clave:

biomimética; diseño computacional; arquitectura paramétrica; arquitectura biomimética

Abstract

It is considered that the benefits of creating an architecture that imitates and simulates natural forms include a reduction in stress symptoms, a decrease in heart rate, and an increase in the feeling of comfort.

In order to more accurately understand how forms arise in nature, we have been led to study biomimetics. This science inherently examines these factors in detail. Additionally, we realize that nature is profoundly interesting; in its development, living beings self-organize to conserve all their own resources, as well as to evolve as effectively as possible in their environment and create extraordinary solutions for adaptation.

All of this has led us to consider developing architecture that closely simulates the forms of living beings while also conserving all possible resources (such as energy and water) and being properly adapted to its environment.

All of this can be achieved through parametric architecture, as it is a style that allows the use of abundant information and connections to generate new architectural possibilities.

Thus, our research has led us to study biomimetics, biological growth, evolutionary theories, parametricism, among other topics.

Keywords:

biomimetics; computational design; parametric architecture; architecture biomimetics

¹ Adscripción: Facultad de Arquitectura de la UANL. Correo electrónico: diegordzdeita@hotmail.com

² Adscripción: Docente e investigador de la Facultad de Arquitectura de la UANL. Correo electrónico: sofia.lunard@uanl.edu.mx

Biomimética

Los organismos vivos están completamente adaptados al medio ambiente en donde están, resulta favorable observar como ocurren estos fenómenos naturales los cuales pueden ser relacionados para favorecer a la arquitectura mediante diversas técnicas y métodos.

Para clasificar organismos de acuerdo a sus habilidades para adaptarse a cada condición de operación normalmente se lleva a cabo una taxonomía. En varios casos, los organismos tienen estrategias que respondían más de una de las condiciones de operación identificadas. Estos organismos son considerados "adaptadores campeones". La taxonomía también ayuda a percibir patrones profundos en las estrategias de diseño, lo que luego da más peso al potencial de usar con éxito esa estrategia para un desafío de diseño construido por humanos. (Cardenas R.C., Daniel A.M., de la Cruz C. 2022)

Naturaleza como: maestro

Una de las tres clasificaciones de estudio de la biomimética; la naturaleza toma el rol de maestro: *Inspirarse de la naturaleza, no tomar de la naturaleza*. (Ellison M.E., 2013). En (Cardenas R.C., Daniel A.M., de la Cruz C. 2022) se presentan ejemplos extraordinarios de adaptación biológica de distintas especies: se analizan más de 6 especies distintas nativas del Desierto de Atacama, los métodos de análisis son diversos pero en general se utiliza la taxonomía y anatomía tanto en zoología y botánica, de este modo se realizan ideas de cómo podría ser una aplicación muy positiva a ingeniería aeroespacial, tratando temas afines de la arquitectura como estructura, superficies, optimización, adaptación, aprovechamiento de recursos naturales, etc.

La llareta es capaz de almacenar energía térmica y desarrollar sistemas de amortiguamiento con capacidades contra temperaturas extremas. Desarrollando una muy específica estructura ramificada cerca del suelo, la llareta también está sujeta a turbulencia mínima por arrastre del viento. Estas cualidades excepcionales de organismos son utilizadas como inspiración para generar soluciones para las personas, en este ejemplo de la llareta se está inspirando para crear una película que se pueda colocar fácilmente para cubrir partes esenciales de las naves espaciales-

satélites que le puedan proporcionar mucho mayor apoyo para la turbulencia y las vibraciones en el espacio.

El siguiente es otro ejemplo de biomimética a partir del murciélago aéreo, el cual es un mamífero nocturno que forma parte de la familia Vespertilionidae y fue una fuente de inspiración para el desarrollo de un emocionante deporte extremo conocido como "vuelo en proximidad" o "proximity fly", que implica lanzarse al vacío mientras se utiliza un traje denominado "wingsuit", diseñado tomando como referencia la anatomía del murciélago aéreo. Este traje, al extender los brazos, crea una superficie que permite deslizarse en el aire de manera similar al murciélago mencionado.

Figura 1. Ardilla voladora y deporte extremo proximity fly



Fuente: Urdinola, Diana & Zuleta Gil, Alejandro & Valenci-Escobar, Andres & Torreblanca, David & Patino, Ever. (2018). *Biomimicry and Design*

Estos ejemplos nos demuestran la importancia del principio básico de la biomimética que nos enseña la importancia de observar la naturaleza para solucionar problemas técnicos en la sociedad humana.

Crecimiento biológico: clasificación

Todas las formas de vida experimentan un crecimiento en un grado apreciable y uno de los últimos desafíos de la biología moderna es comprender el papel del código genético en la transformación de las células en organismos completamente maduros y explicando cómo estos organismos logran regular la forma y la función a través del crecimiento y remodelación.

Los procesos de crecimiento también aparecen en algunos procesos físicos en los que se obtiene material nuevo añadido a un sistema en evolución. Por ejemplo, en el crecimiento

epitaxial, una fina capa de cristal se produce depositando la materia prima sobre un sustrato cristalino existente. El crecimiento también está asociado con fenómenos de transición de fase, donde una interfaz evoluciona en tiempo para producir nuevas estructuras tales como cristales. (Goriely A., 2017).

A continuación, se presenta una serie de ejemplos que nos permite entender cómo se da el fenómeno de crecimiento biológico, es estricto recalcar que la idea de estructurar esta información del siguiente capítulo: Crecimiento Biológico ha sido obtenido de: *The Mathematics and Mechanics of Biological*, Springer. Alain Goriely, 2018. Debido al respeto al autor, gran parte de las citas académicas obtenidas del texto original han sido referenciadas a él mismo y complementadas con otras que han sido estudiadas y agregadas a la presente variable por el autor de esta investigación.

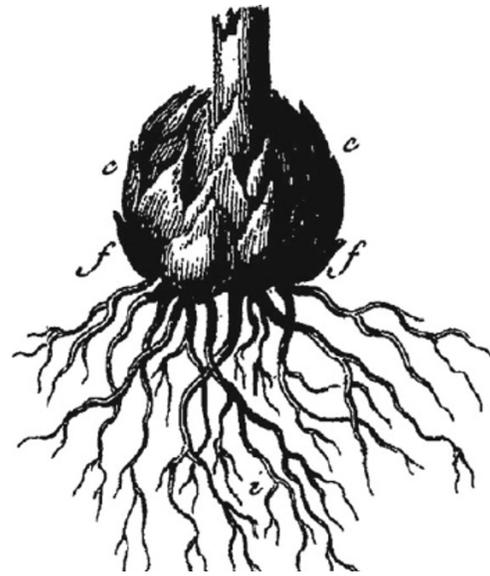
Crecimiento puntual

El crecimiento de la punta o apical describe los procesos de crecimiento que tienen lugar en una pequeña región en la punta de una estructura filamentososa. Como se muestra en Figura 2, es el principal mecanismo de crecimiento utilizado por muchos organismos microbianos y sistemas vegetales como hongos, bacterias filamentosas, tubos polínicos y pelo radícula. (Geitmann, A., Steer, M. 2006)

La evolución a menudo se describe modelando tejidos como fluidos o viscoelásticos en lugar de elástico, aunque estos dos puntos de vista son equivalentes.

En la teoría biológica de Immanuel Kant y Wolff, precisamente Wolff también habla de una facultad de "solidificación", que inhibe el crecimiento a través de una especie de coagulación y cohesión de la sustancia vegetal. "Wolff propuso un modelo para el desarrollo en plantas y animales en base a dos factores: la capacidad de los fluidos vegetales y animales solidificar, y una fuerza, a la que denominó *vis essentialis* (Goy, 2012). Estas afirmaciones no solo aplican al crecimiento puntual si no todo tipo de crecimiento en general que se seguirán detallando en el presente trabajo los cuáles muchos son extraídos del libro de Alain Goriely pero algunos otros han sido sustraídos de distintos artículos científicos el cuál su tema principal es la medicina y la biología.

Figura 2. Crecimiento puntual



Fuente: Tomado de *The Mathematics and Mechanics of Biological*. Alain Goriely, (2018). Springer. Pp. 14

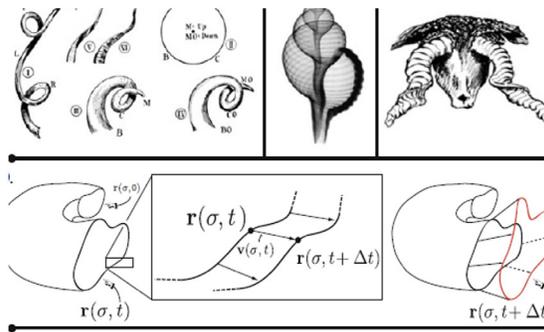
Crecimiento acumulativo

Matemáticamente, muchos problemas de crecimiento acumulativo se pueden modelar geoméricamente, estudiando la evolución del límite en función de la masa acumulada. Por ejemplo, el caparazón de la amonita en la Figura 3 (siguiente página) es el resultado de la acumulación de material con diferentes velocidades en diferentes puntos de la abertura. Este gradiente de velocidad es necesario para enrollar ya que la cresta exterior requiere más material que la interior cresta. En general, si se conoce el límite en el tiempo t , un vector de acreción, que da la velocidad local de acumulación de material, se puede definir en cada punto en el límite como se muestra en la Figura 3. El nuevo límite se obtiene luego de un pequeño incremento tiempo t . (Goriely A., Ben Amar M., 2008).

El crecimiento acumulativo se presenta en su mayoría a la espiral. Una espiral es una línea curva generada por un punto que se va alejando progresivamente del centro a la vez que gira alrededor de él. Las principales espirales son: logarítmica, hiperbólica y de Arquímedes. Esta curva como casi todas, la podíamos calificar como la curva de la vida o de forma más precisa, la curva del crecimiento. Tanto el reino vegetal como el reino animal nos presentan la espiral: cuernos, caracoles, fenómenos meteorológicos, galaxias, flores, semillas. (Mirón P. L., 2009).

Ante las innumerables manifestaciones naturales de las espirales, tanto de carácter orgánico como mecánico, estas curvas no podían dejar de llamar la atención de los matemáticos y ser objeto de su investigación. Sin embargo, como su propia forma sugiere son curvas esquivas. No son curvas geométricas estáticas como la circunferencia, las cónicas o las lúnulas. Para construirlas se necesitan recursos mecánicos, algo que crece o que se mueve (Mirón P. L., 2009).

Figura 3. Crecimiento acumulativo



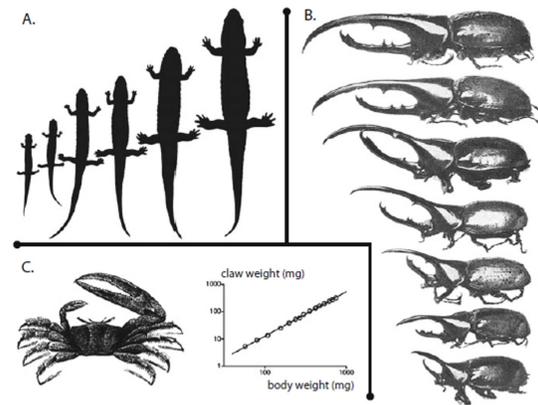
Fuente: Ejemplos de crecimiento acumulativo. Tomado de *The Mathematics and Mechanics of Biological*. Alain Goriely, (2018). Springer. Pp 21

Crecimiento relativo – alométrico

El crecimiento relativo en el crecimiento biológico se refiere al aumento en tamaño o masa de un organismo en relación con su tamaño o masa inicial. En otras palabras, el crecimiento relativo se refiere a cómo el tamaño o masa de un organismo cambia en relación con su tamaño o masa original. El crecimiento alométrico es un tipo de crecimiento biológico en el que diferentes partes o estructuras de un organismo crecen a diferentes ritmos o proporciones. En otras palabras, el crecimiento alométrico se refiere a cómo las diferentes partes de un organismo se desarrollan en relación con otras partes del mismo organismo.

Por ejemplo, el crecimiento alométrico en las extremidades de los animales puede influir en su capacidad para correr, saltar o trepar. También puede tener implicaciones evolutivas, ya que los cambios en la tasa de crecimiento alométrico pueden dar lugar a nuevas formas y funciones en los organismos. (Santamaría C., 2018).

Figura 4. Crecimiento alométrico



Fuente: Escalado isométrico y alométrico. A. Seis especies de salamandras del género *Desmognathus*, conservan sus proporciones a pesar de ser de diferentes tamaños (reproducido de). B. diferentes machos en los escarabajos *Dynastes* mostrando el aumento relativo de cuernos en función del tamaño (1924 ilustraciones de Champy, reproducidas de). C. Escala alométrica para la garra del cangrejo violinista del género *Uca*. Tomado de *The Mathematics and Mechanics of Biological*. Alain Goriely, (2018). Springer. Pp. 34

Teoría morfoelástica

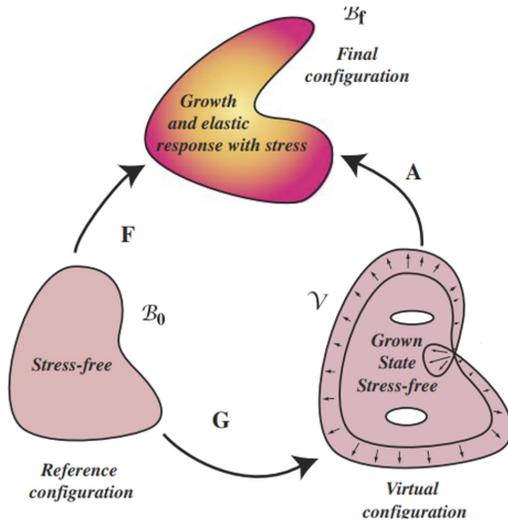
El estrés también influye en el crecimiento a través de las leyes de evolución, creando más retroalimentación dinámica en el desarrollo de tensiones y geometría. Comprender este acoplamiento, para materiales dados y leyes de evolución de crecimiento en una geometría dada, es el problema central de la teoría de la *morfoelasticidad*. El objetivo de tal enfoque no es solo obtener la nueva forma crecida y la tensión residual desarrollada en la estructura, sino también para comprender cómo evoluciona dinámicamente un nuevo cuerpo de este tipo, cómo responde a la carga, cómo se reorganiza mediante la remodelación y cómo cumple funciones estructurales y biológicas clave.

En la Figura 5 se muestra la descomposición de la *morfoelasticidad* finita. A partir una configuración de referencia $B_0(X, t)$, el gradiente de deformación $F(X, t)$ es el producto de un tensor de crecimiento G con un tensor de deformación elástica $A(X, t)$.

La tensión tisular se convirtió en un tema central de interés en fisiología vegetal: se observó en muchas plantas, incluidas las raíces de trigo, hinojo hojas, tallos de ruibarbo, liquidámbar e

hipocótilos de pepino, girasol, melón, y calabaza. Mecánicamente, estas tensiones se atribuyen a la extensión diferencial de las paredes celulares en las capas internas y externas, creando un cambio irreversible en las longitudes de reposo de ambos tejidos (Goriely & Ben Amar, 2020).

Figura 5. Diagrama básico de ejemplo por tensión



Fuente: Tomado de *The Mathematics and Mechanics of Biological*. Alain Goriely, (2018). Springer

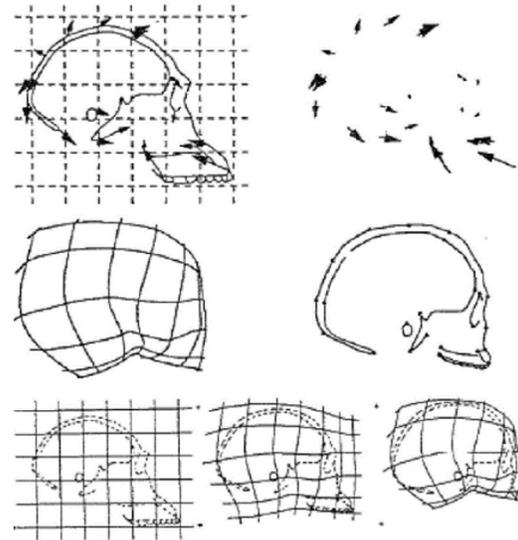
Crecimiento por transformación

“La forma de un organismo se puede entender mediante principios matemáticos y físicos” (D’Arcy Thompson .1917).

La obra de Thompson es importante porque es ampliamente considerado como un hito en la historia de la biología matemática y la teoría de la forma. En él, Thompson desarrolla su teoría de las transformaciones y proporciona numerosos ejemplos de cómo los principios matemáticos y físicos pueden aplicarse para entender la forma y la función de los organismos.

La teoría de las transformaciones se basa en la idea de que la forma de un organismo es el resultado de las fuerzas físicas y químicas que actúan en él, y que esta forma puede entenderse mediante la aplicación de principios matemáticos y físicos. Según Thompson, la forma de un organismo se puede describir mediante transformaciones matemáticas que explican cómo se modifican las dimensiones y proporciones de las partes del organismo durante su crecimiento.

Figura 6. Ejemplo de aplicación de la teoría de las transformaciones



Fuente: Tomado de *En crecimiento y forma*. D’Arcy Thompson (1967). *Teoría de las Transformaciones*. Cambridge University Press. Pp. 294

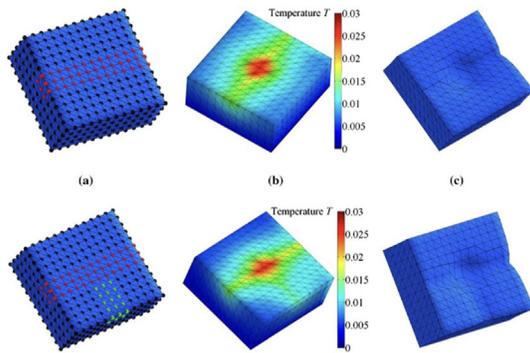
Padre de la teoría mecanicista. “Teoría de las transformaciones” en la que se puede demostrar que una especie dada se transforma en una especie relacionada a través de una transformación de la cuadrícula cartesiana estándar. Lo más famoso, las relaciones entre *Agryopelecus* y *Stenoptyx* y *Scaris* sp. Y *Pomocanthus* se puede demostrar ajustando las rejillas en las que están mapeado (Figura 6) haciéndose eco de las transformaciones mucho más tempranas de la cabeza humana explorada por Durer en su Tratado sobre la proporción. (D’Arcy Thompson .1917).

Crecimiento por calor

El crecimiento por transformación refiere a la deformación obtenida por la termodinámica en tejidos y volúmenes sintéticos y no sintéticos, es usado como método de estudio para el tamaño correcto de prótesis (Jinao Zhang, Jaehyun Shin, Yongmin Zhong, 2019).

Este tipo de crecimiento se va a tomar a profundidad en el siguiente capítulo (Figura 7 en la siguiente página).

Figura 7. Detección de calor en tejidos para diseño de prótesis

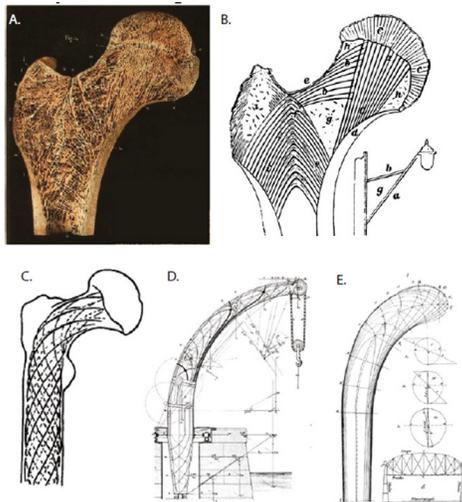


Fuente: Tomado de Jinao Zhang, Jaehyun Shin, Yongmin Zhong, Denny Oetomo (2019). *Heat conduction-based methodology for nonlinear soft tissue deformation* Springer Edition. 29

Crecimiento por fuerza mecánica “Ley de Wolff”

La conexión entre la mecánica y la estructura ósea se notó ya en 1832. Cuando Bourgerie comentó por primera vez sobre la sorprendente analogía entre trabecular orientación ósea y carga mecánica como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. La ley de Wolff para los huesos



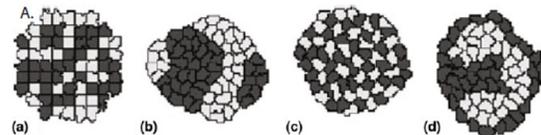
Fuente: A. Dibujo de un fémur de Bourgerie en 1832. B. Dibujo de "Outlines of Human Osteology" de Ward. C. Un modelo en espiral del hueso de Dixon. D. Ilustración de una grúa Fairbairn por Carl Culmann. E. Estudio estructural de un hueso de Wolff. Tomado de *The Mathematics and Mechanics of Biological*. Alain Goriely, (2018). Springer. Pp. 48

La ley de Wolff para la remodelación ósea no se entiende como una ley científica en sentido estricto, pero se utiliza en su lugar para describir los procesos por los cuales los huesos se adaptan mediante la remodelación activa para resistir mejor la carga aplicada. Este principio de adaptación funcional fue propuesto por primera vez por Wilhelm Roux en 1881. Roux propuso que la adaptación ósea es el resultado de un “mecanismo de autorregulación cuantitativa” a nivel celular.

Crecimiento celular

Los primeros intentos de desarrollar modelos computacionales de crecimiento se basaron en autómatas celulares. Estos modelos fueron introducidos por primera vez por Von Neumann y Burks, y popularizado por el Juego de la vida de Conway, este encontró su camino en la mecánica estadística y biología. La idea básica de autómatas celulares para sistemas biológicos es que el dominio de interés se divide en una serie de sitios reticulares ocupados por células. En cada paso discreto en el tiempo, la red se actualiza en función de las reglas de interacción entre diferentes celdas.

Figura 9. Modelos Potts celulares



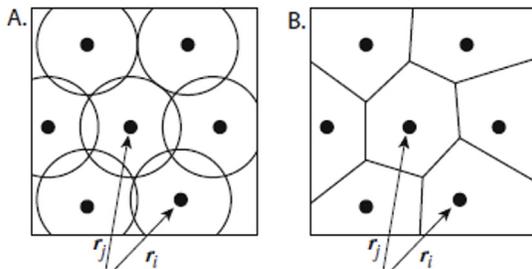
Fuente: A. Se pueden obtener diferentes tipos de patrones celulares cambiando energía de unión célula-célula o energía de unión célula-matriz. (a) Condiciones iniciales, (b) clasificación de celdas, (c) ordenación de celdas de mosaico, (d) inmersión. Tomado de *On the definition and modeling of incremental, cumulative, and continuous growth laws in morphoelasticity*. Goriely A., Ben Amar M., (2006). Springer-Verlag 2006, 2

Los autómatas celulares son un tipo de crecimiento, donde se asignan reglas sencillas a una trama, desarrollando un crecimiento generacional que puede ser finito o infinito.

Restringiendo nuestra discusión al caso plano, las posiciones de los centros de las celdas, caracterizan completamente todo el sistema. Los centros celulares pueden ser visto como el centro de círculos superpuestos o, de manera equivalente,

como los centros de Voronoi polígonos en una teselación del sistema como se muestra en la Figura 10. Un bidimensional. La teselación de Voronoi es una partición de un plano en regiones poligonales basadas en distancia a los puntos de un conjunto dado. Cada borde de un polígono se define como el conjunto de puntos más cerca de un punto en particular que de cualquier otro (Figuras 10 y 11 - abajo).

Figura 10. Centros de las células como ejes principales del tejido



Fuente: Los epitelios son láminas de células columnares. Conectados a través de la adhesión célula-célula. Tomado de On the definition and modeling of incremental, cumulative, and continuous growth laws in morphoelasticity. Goriely A., Ben Amar M., (2006). Springer-Verlag 2006, 2

Cualidades intrínsecas de los seres vivos: auto organización y auto curación

La capacidad de regular el comportamiento y adaptarse a las demandas de una situación siempre se ha asociado con organismos vivos.

Immanuel Kant abordó brevemente el tema de la organización de los seres vivos en su obra "Crítica

del Juicio", donde sostiene que la naturaleza es un sistema de fines. Según Kant, los seres vivos son organismos que poseen una organización interna que les permite cumplir ciertos fines o propósitos (Goy I., Watkins E. 2013).

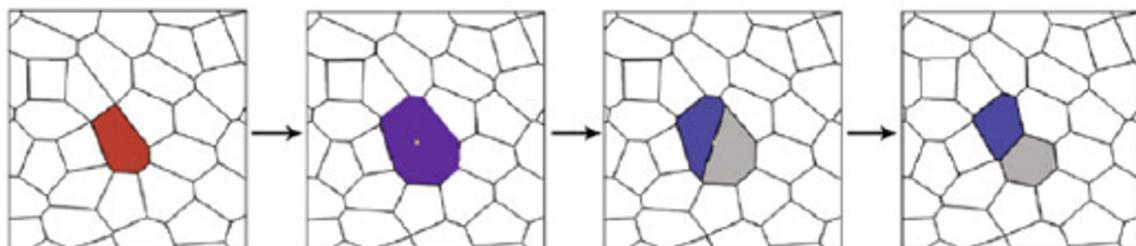
Auto organización

Los conceptos de auto organización a menudo se explican observando las estructuras emergentes. Una estructura emergente está gobernada por una combinación de reglas y principios en la escala microscópica con la interacción de la estructura macroscópica y su entorno.

Las propiedades emergentes son patrones complejos o procesos derivados de interacciones simples entre múltiples agentes. Hay muchos ejemplos de propiedades emergentes en sistemas biológicos, que van desde la construcción de hormigas y nidos de termitas a partir de comportamientos individuales, simples reglas, a los movimientos y patrones coordinados de grandes bandadas de aves.

Las parvadas de aves son ejemplos de auto organización en los seres vivos: Cada ave interactúa típicamente con hasta siete de sus vecinos más cercanos (la distancia de interacción). El grado en que las aves que no interactúan correlacionar su comportamiento depende de qué tan bien la información se transmite a través de interacciones individuales. En la mayoría de los sistemas biológicos y físicos, la distancia de correlación es significativamente más larga que la distancia de interacción, pero más corta que el tamaño del sistema (Lenau, Torben 2019) (Figuras 12 y 13 en la siguiente página).

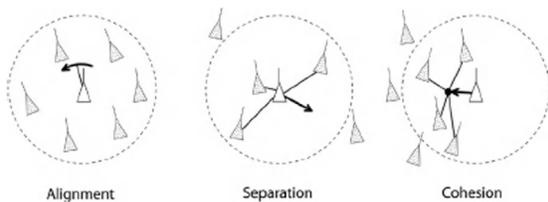
Figura 11. Ejemplos de patrones generados de una red estacionaria por división celular



Fuente: Tomado de The Mathematics and Mechanics of Biological. Alain Goriely, (2018). Springer

Figura 12. Parvada de aves, ejemplo de auto organización

Fuente: Tomado de *Biomimicry for aerospace. Technologies and Applications*. Torben Lenau and Thomas Hesenberg (2019). Vikram Shyam, Marjan Eggermont, Aloysius F. He. pp. 333-355

Figura 13. Lenguaje en las abejas y otros seres vivos

Fuente: Tomado de *Biomimicry for aerospace. Technologies and Applications*. Torben Lenau and Thomas Hesenberg (2019). Vikram Shyam, Marjan Eggermont, Aloysius F. He. pp. 333-355

Auto curación

Tanto los animales como las plantas tienen mecanismos que curan las heridas rápidamente para que sólo cantidades limitadas se pierdan de líquido. Primero el cuerpo se asegura de cerrar y sellar la herida, y luego se produce la curación. La reparación de daños en los vasos sanguíneos

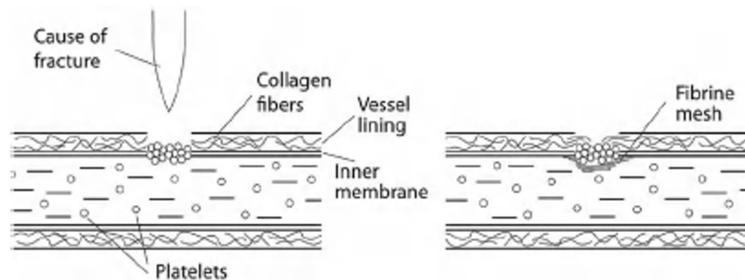
involucra tres pasos: (1) formar un tapón en el orificio (llamado hemostasia primaria), (2) sellar el daño (llamado hemostasia secundaria) para que el tapón dure hasta que la herida esté sanada, y (3) sanar la herida. Células especializadas cubren el daño en un vaso sanguíneo a través de una cascada de eventos (Figura 14).

Como ejemplo de una aplicación de los conceptos de auto organización junto a los conceptos de clasificación de crecimiento biológico celular se destaca el estudio de "Hyper-Morphology" de (Nimish Biloría, Jia-Rey Chang .2013).

El estudio se considera importante porque a diferencia de los llamados diseños arquitectónicos orgánicos, que imitan literalmente las formas orgánicas naturales con la ayuda de sofisticadas técnicas computacionales. La investigación "Hyper-Morphology" se dedica a descifrar y traducir las lógicas de la morfogénesis natural en el ámbito digital y aplica esto a un caso arquitectónico relacionado con la adaptación en tiempo real, la reutilización del espacio. HyperCell como arquitectura celular, el componente puede operar como una entidad autónoma con su propio mecanismo de detección y accionamiento, aunque cada adaptación autónoma tendrá un impacto asociativo en la morfología general de la forma construida.

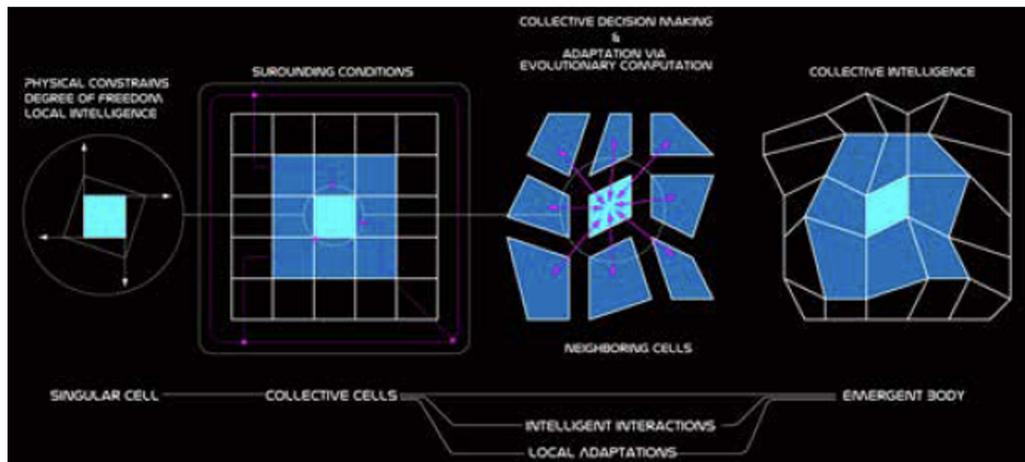
La investigación enfatiza la inteligencia de enjambre como una estrategia de computación auto-organizativa bajo el paraguas de la Computación Evolutiva.

Numerosos componentes autónomos (HyperCell) con limitación material impulsa grados locales de libertad similares a las células en un organismo, crean así el base de escenarios colectivos de toma de decisiones en esta investigación (Figura 15 en la siguiente página).

Figura 14. El proceso de formación y sellado del tapón en coagulación sanguínea

Fuente: Izquierda: Plaquetas en contacto con fibras de colágeno para el enchufe. Derecha: Se sella un orificio con un coágulo de fibras de fibrina. Tomado de *Biomimicry for aerospace. Technologies and Applications*. Torben Lenau and Thomas Hesenberg (2019). Vikram Shyam, Marjan Eggermont, Aloysius F. He. pp. 333-355

Figura 15. Célula central y comportamiento de las vecinas



Fuente: Tomada de *Hyper-Morphology* Nimish Bioria, Jia-Rey Chang (2013). *HyperBody Lab*, TU Delft

La idea de datos la transmisión en esta investigación implica incrustar cada componente individual con un procesador de bajo nivel, que calcula las rutinas de adaptación local y genera protocolos para comunicarse con sus vecinos sobre la marcha en un sistema distribuido de bajo consumo de arquitectura de procesamiento de información. En esta distribución el proceso es similar a la inducción de señales en la naturaleza, procesos de crecimiento, que se refiere a cascadas de señalización de eventos para provocar que las células envíen señales a sus celdas vecinas en un intento de lograr información de diferenciación celular.

Con lo anterior podemos darnos cuenta que existen métodos de análisis, modelos que vienen a reforzar lo relacionado al biomimetismo y sus aplicaciones tanto conceptuales como reales, que nos ayudarán a fortalecer el conocimiento biofilico para aplicarlo con mayor fundamentación a la arquitectura.

Crecimiento biológico: crecimiento molecular

El trabajo más importante que existía como una teoría de crecimiento era la teoría de las transformaciones de D'Arcy Thompson, pero el crecimiento biológico es ahora estudiado de otra forma debido a la biología molecular, el punto de vista actual es las interacciones moleculares en el crecimiento biológico.

Los efectos más importantes del crecimiento son los que inducen un cambio en la forma directamente, esto es que los crecimientos sobre masa y volumen se producen por los sistemas abiertos de la termodinámica. Como se puede traducir el aumento

de volumen o materia es una pregunta dentro de la física, un rumbo aceptado es comprender el gradiente local que se está trabajando poder tener variaciones distintas en sus concentraciones. *"Las soluciones de cambios de masa son balances de momentums"* (D. Ambrosi, 2014).

La morfogénesis, otro proceso de desarrollo de la biología propone que existe un cambio microscópico de la forma constantemente accionado de algún modo por el crecimiento y la remodelación. La morfogénesis es el cambio más dramático en muchos sistemas orgánicos. Los tres procesos operativos durante el desarrollo son los siguientes: crecimiento, remodelación y morfogénesis.

Crecimiento y remodelación juegan un rol importante durante el desarrollo, pero los cambios en la forma resultan primariamente por las deformaciones bioelásticas de las células y tejidos en respuesta para ambos: cargas internas y externas. Las cargas internas incluyen las generadas por polimerización, la actividad del cito esqueleto, micritúbulos, adhesión, crecimiento diferenciado, las células también migran y se remplazan entre ellas.

Es necesario mencionar que, así como la teoría de la evolución natural aplica completamente para todas las especies animales en el planeta, así mismo afecta a las células y los tejidos, pues estos cumplen con factores que deben cumplir como transportar otras células, almacenar, entre otras.

Uno no puede pensar que el crecimiento biológico es únicamente sobre leyes de física, basados en argumentos de termodinámica, no ha sido generalmente fructivo. Otro modo de

buscar consiste en el estudio de la fenomenología basado en leyes, experimentos y observación. Por ejemplo: La idea de la teoría morfoelástica, como el crecimiento y desarrollo tiene base en reducir constantemente el estrés. (D. Ambrosi, 2014).

El gran mundo inexplorado de la termodinámica en crecimiento, cuestiona la escala a la cual que teorías del crecimiento puede ser empleado, la robusta experimentación y la actividad en el crecimiento de las plantas liga hacia la teoría de la optimización estructural, identificando problemas reales en el diseño computacional.

Remodelación y optimización estructural en la biología

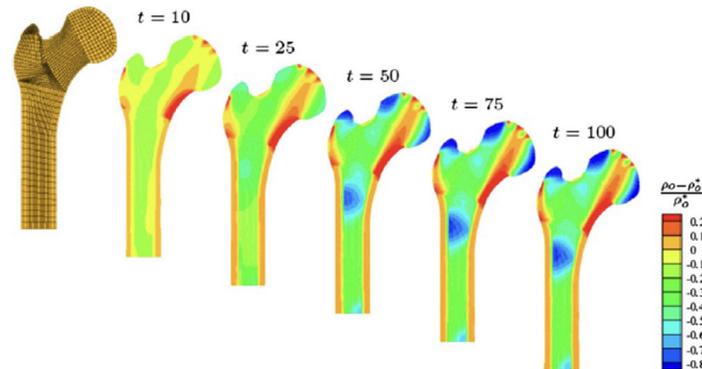
Existe una conexión muy cercana entre los objetivos computacionales de remodelación ósea o de huesos y el campo de la optimización estructural. Optimización estructural es un término usado para cubrir un número de técnicas de optimización

asociadas a mecanismos estructurales, incluye la forma, tamaño, optimización topológica, también incluye optimización del material la cual se juxtapone a diseño de materiales.

Optimización de forma es un término usado para encontrar la dimensión óptima de la forma de una estructura, por decir el grosor de una placa. La optimización topológica es un método que aplica a la igualdad en la conexión entre dominio estructural u optimización de material (diseño). En la Figura 16 se ve el caso típico del fémur. Un algoritmo basado en una topología suave para optimización ósea puede usarse para predecir la densidad fisiológica visualizando las características de densidad de compresión trabecular sobre las cargas superficiales superiores y la región calcar, una segunda carga trabecular en el inferior-media unión superficial.

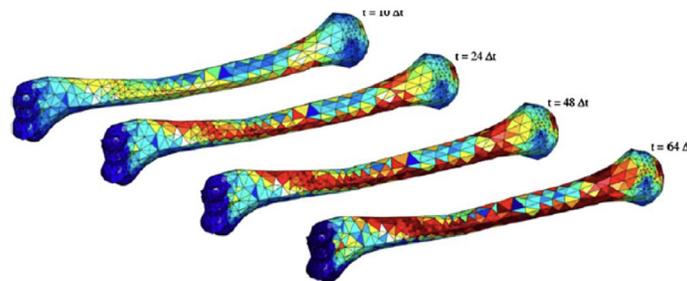
En la Figura 17 se ve una adaptación funcional de la densidad del hueso húmero en un deportista de alto rendimiento de tenis.

Figura 16. Ejemplo de la optimización estructural de la remodelación de un hueso



Fuente: Tomada de Perspectives on biological Growth and Remodeling. D. Ambrosi, G.A. Ateshian, E.M. Arruda, S.C. Cowin, J. Dumais, A.Goriely, G.A. Holzapfel, J.D. Humphrey, R. Kemkemer, E. Kuhl (2013). ELSEVIER

Figura 17. Ejemplo de la optimización estructural de la remodelación de un hueso



Fuente: Ejemplo de la optimización estructural de la remodelación de un hueso: Tomada de Perspectives on biological Growth and Remodeling. D. Ambrosi, G.A. Ateshian, E.M. Arruda, S.C. Cowin, J. Dumais, A.Goriely, G.A. Holzapfel, J.D. Humphrey, R. Kemkemer, E. Kuhl (2013). ELSEVIER

El crecimiento tiene tres grandes puntos de estudio: crecimiento, remodelación y morfógenesis, esto quiere decir que los cuerpos naturales son remodelados a cada milímetro de su crecimiento, esto es una de las claves de su eficiencia. Así vemos claramente como comparte filosofía de diseño como el famoso “form finding” por su definición oficial: “La búsqueda de formas en la arquitectura es un proceso en el que la forma o la forma del edificio se determina a través de un proceso lógico inspirado en los procesos de la naturaleza. El objetivo es lograr la forma óptima que ofrezca estabilidad dinámica, adaptabilidad y sostenibilidad.” Frei Otto, 2008.

Parametricismo

El diseño paramétrico puede describirse como un reflejo de los desarrollos tecnológicos digitales en la arquitectura. Cambia la arquitectura en el contexto del proceso de diseño y las herramientas, los métodos de fabricación y las relaciones formales-espaciales-estructurales. Este período de transformación lleva a nuevas teorías. Algunas de las teorías que forman parte del diseño paramétrico: diseño computacional, diseño evolutivo, teoría de la selección natural, matematización, crecimiento biológico, teorías de sistemas, campos vectoriales, termodinámica, por mencionar algunas.

En el libro titulado "Autopoiesis de la Arquitectura" (Schumacher, 2011), los dogmas se definen como: todas las formas deben ser maleables de manera paramétrica, todos los sistemas deben ser diferenciados de manera legal y todos los sistemas deben estar correlacionados entre sí.

Diseño computacional: Diseño Evolutivo

Algoritmos evolutivos o computación evolutiva es un área de la informática que se aplica a principios de búsqueda heurística inspirados en la naturaleza de la evolución a una variedad de dominios diferentes, en particular a la optimización de parámetros u otros tipos de resolución de problemas considerados tradicionalmente en inteligencia artificial.

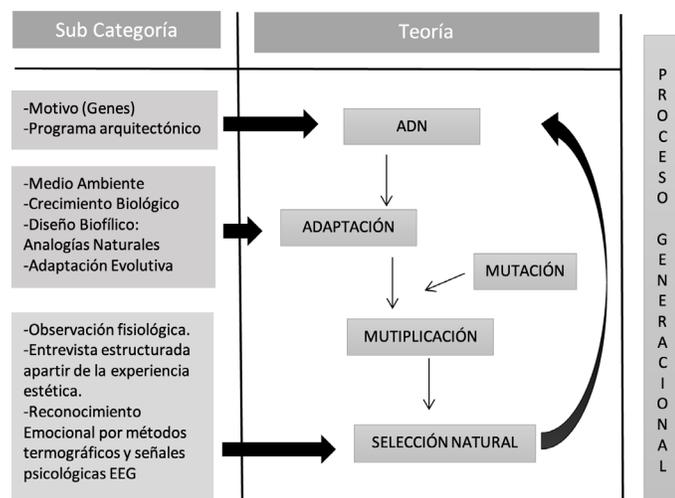
El término programación genética o (GP) o programación evolutiva describe un área de investigación dentro del campo de la evolución, cálculo que se ocupa de la evolución de código informático. Sus algoritmos tienen como objetivo para aproximar soluciones a problemas en máquina aprendizaje (machine learning) o para inducir soluciones precisas en la forma de estructuras gramaticalmente correctas (del lenguaje) para la programación automática de ordenadores. (Banzhaf, Wolfgang, 2006)

Los temas que componen los conceptos de teoría: Figura 1, se describen a continuación. La columna “Teoría” son los conceptos que forman la teoría de la Selección Natural. Encontrados en: Guía Evolutiva, Princeton, Michael E. Hellberg. (Larson, Allan, 2018). La columna “Sub Categoría” engloba conceptos para poder ligar conceptos biológicos al área de la arquitectura.

Se considera importante el diseño computacional como método porque tiene una gran importancia en el diseño arquitectónico. Así mismo el diseño computacional permite el desarrollo de los procesos específicos de biomimética en la arquitectura, y como es que estos procesos de diseño son distintos a los de ingeniería.

Figura 18. Mapa de proceso general de algoritmos evolutivos en conceptos básicos de selección natural y su aprovechamiento para la arquitectura

Fuente: Elaboración propia. Ver notas de la figura en la siguiente página



1. ADN: Es el conjunto de genes que conforman las bases del organismo, los genes contienen la información individual que forman al conjunto. Los genes pueden ser manipulables en cualquier generación y alterar a todo el organismo dando posibilidad a nuevos surgimientos. Los genes pueden formar grupos y al mismo tiempo funcionar individualmente. Los genes evolucionan conforme al organismo.

2. Adaptación: Abarca las modificaciones tanto a nivel fenotípico como molecular que los organismos experimentan con el paso del tiempo en respuesta a las presiones selectivas de su entorno. Estos cambios les confieren una ventaja de supervivencia en un entorno en constante cambio. De forma general, la importancia de la adaptación biológica para un individuo es la de poder “sobrevivir mejor que otros” de la misma especie a su entorno, reproduciéndose más y pasando esta adaptación a las siguientes generaciones, produciendo una evolución. (Luo, L., & Zhang, W. 2014).

3. La multiplicación de especies denota la dimensión especialización de la evolución en la teoría darwiniana, procesos geográficos por los cuales los linajes de población se ramifican forman dos o más linajes descendientes. Un linaje es una serie no ramificada de poblaciones antepasados-descendientes a través del tiempo.

4. Gradualismo, tradicionalmente llamada **saltación**, es que surgen caracteres fuertemente contrastantes como tal dentro de una generación. La saltación es compatible con, pero no idéntico al equilibrio puntuado, que postula que el cambio morfológico ocurre geológicamente en eventos breves (menos de 1 millón de años) de ramificación de especiación, seguido por la evolución morfológica dentro de especies mantenidas durante un intervalo mucho más largo del tiempo evolutivo.

5. La selección natural es en sí misma un compuesto de muchas subteorías. Una de ellas “Fitness”. La selección natural es el mecanismo que permite perfeccionar al organismo con cada generación que ocurra dirigiendo en la ruta que sea a criterio.

Los temas que componen los conceptos de subcategoría: Figura 1, se describen a continuación.

1. Motivo: contiene las funciones que lo forman, se comportan como variables y conforman el código (Neal M. 2022). Así mismo de las funciones que puede llegar a ser

o que pueden modificarse constantemente para facilitar la exploración, el cual está estrechamente relacionado con la información genética en la Evolución Biológica. El control genético es indispensable para poder generar diseños generativos verdaderamente controlables (Frazer, J. 1995). Cualquier algoritmo evolutivo que no sea simplista y divergente debe de contener gran cantidad de funciones o información genérica (Lang, Ngyuen. 2000).

2. El programa arquitectónico constituye las bases conceptuales que el arquitecto establece desde la disciplina, de modo que funcionen como un tamiz para dar sentido y orientación al programa “funcional” o conjunto de requerimientos y demandas externas. Estas solicitudes o demandas deben ser reconsideradas desde el programa arquitectónico, y de este modo, podrán ingresar a la dinámica proyectual. El programa arquitectónico establece condiciones específicas que conformarán el posicionamiento del arquitecto frente a la propuesta, posicionamiento que, al trazar el acceso a su trabajo en el proyecto, le permitirá plantear, construir y perfeccionar la estrategia proyectual. (Boix F.y Montelpare A. 2012).

3. Medio Ambiente: En Biología el Medio Ambiente cumple la función de activar la interacción mediante comunicación y relación del código genético ADN al medio ambiente (Biloria and Chang, 2000). Cualquier organismo obtiene del medioambiente el sustento necesario para garantizar su supervivencia, no solo alimento, sino, también, refugio, aire o energía. Por eso, mantener su equilibrio resulta fundamental para asegurar la vida tal y como se conoce hoy en día.

En el enfoque de diseño biomimético, las restricciones físicas y propiedades de los materiales, junto con las limitaciones de producción, fabricación y construcción puede codificarse en procesos computacionales generativos o evolutivos. En consecuencia, cualquier forma o estructura específica derivada a través de procesos morfogenéticos y evolutivos posteriores sigue siendo plenamente coherente con la lógica y los límites de materialización. Además, el desarrollo computacional, el proceso se informa a través de retroalimentación constante con simulación digital, que permite dar respuesta a la heterogeneidad de fuerzas externas, influencias ambientales y requisitos funcionales. Como resultado de la creación de espacios multifacéticos, requisitos de carga, regulación del clima y calidades de la arquitectura, y en base a lo descrito con

coherencia de forma, materiales, estructura y función. (Menges, A. 2011)

La siguiente imagen ha sido elaborada por el distinguido arquitecto Achim Menges. Es el primero conocido por utilizar algoritmos evolutivos como evidencia de que distintas morfologías arquitectónicas tienen mayor utilidad en la realidad. En este caso se percibe claramente que la forma que se obtuvo de la losa a través de algoritmos evolutivos recibe mucho menor incidencia solar que una losa plana o inclinada. El método de estudio principal es el uso de Fitness (criterio de evolución) como eje principal del desarrollo del modelo. En esta investigación los siguientes criterios de aptitud fueron particularmente relevantes. Ellos pueden dividirse en dos categorías: (A) criterios morfológicos tales como superficie de suelo, alturas de envolvente, pendiente de envolvente, etc. y (B) criterios ambientales como incidente de radiación solar y carga térmica interior.

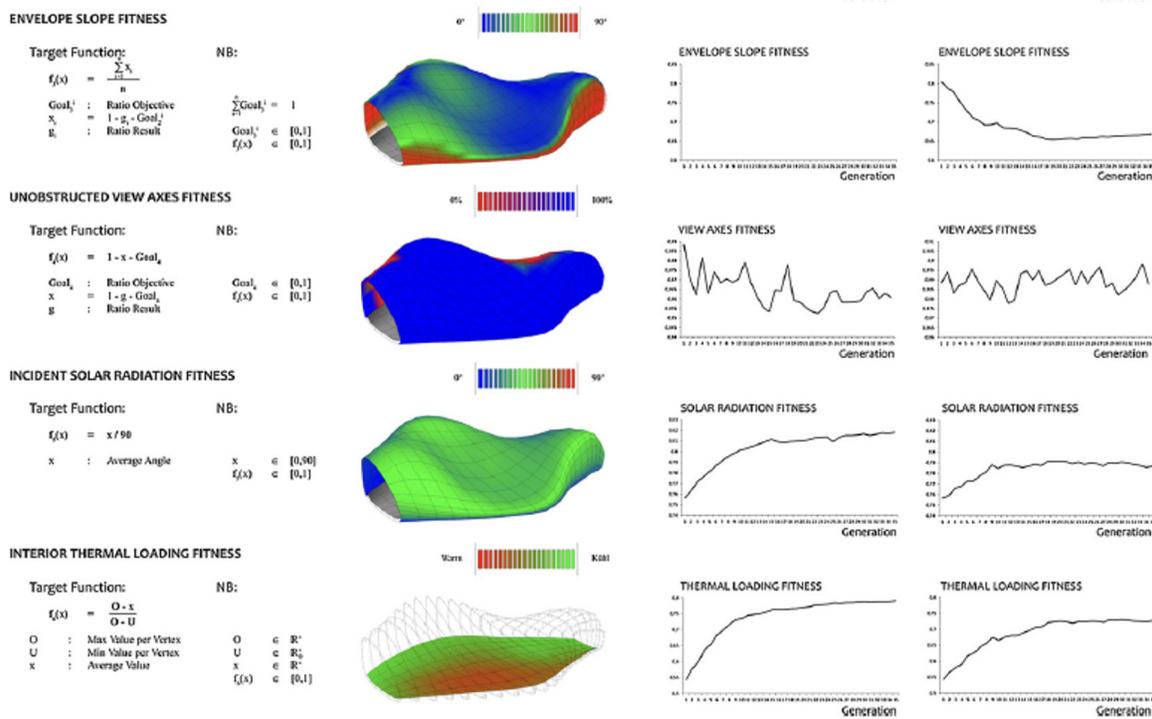
Termodinámica

La forma básica de generar forma arquitectónica es la captura y guía de energía. El proceso de prototipo a paradigma puede verse como una traducción integral basada en sistemas. Por lo tanto, la forma resultante puede llamarse "materialización de energía". (Linxue L. and Simin T. 2022).

La termodinámica en arquitectura se refiere a enfocarse en la utilización y transformación de las fuentes naturales de energía en un entorno específico, una nueva epistemología se plantea de la arquitectura termodinámica y la investigación sistemática sobre el diseño que se lleva a cabo.

Al introducir la termodinámica en arquitectura, se enfatiza dos tareas urgentes: una es saber qué tipo de forma arquitectónica puede ser utilizada como un sistema para organizar eficazmente la relación entre la arquitectura y el medio ambiente, la otra es aprender a canalizar el flujo de energía entre los subsistemas de un edificio.

Figura 19. Desarrollo del criterio Fitness

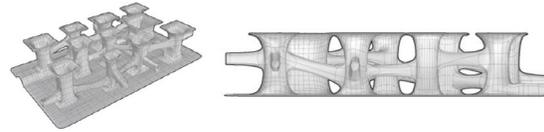


Fuente: Biomimetic design processes in architecture: morphogenetic and evolutionary computational design. Achim Menges. (2011)

El desarrollo de la tecnología moderna del entorno artificial ha hecho que los edificios pierdan su característica causada por el clima regional. La forma arquitectónica, así como la interpretación del clima y el medio ambiente, puede retroalimentar el rendimiento termodinámico del sitio mediante forma especial, material y organización espacial. Cómo utilizar continuamente la energía renovable en el sitio y volver a conectar el vínculo entre el clima y el diseño es un tema crítico en este estudio.

Para explicar con más detalle se verá a continuación el proyecto “Nido de termitas”. Se observa la aplicación de abstraer conceptos de la naturaleza a través de la biomimética, aplicada al paramétrismo, este proyecto está inspirado en el nido de las termitas. A través de métodos abstractos o figurativos como estudio monográfico, establecimiento de prototipos y simulación de software, se procedió el diseño arquitectónico (un edificio público a gran escala, como un comercial complejo o un museo) para explorar la relación entre formas y energía. Al enfocarse en la utilización y transformación de las fuentes naturales de energía en un entorno específico, una nueva metodología de diseño se plantea la epistemología de la arquitectura termodinámica y la investigación sistemática sobre el diseño.

Figura 20. Inspiración de un nido de termitas

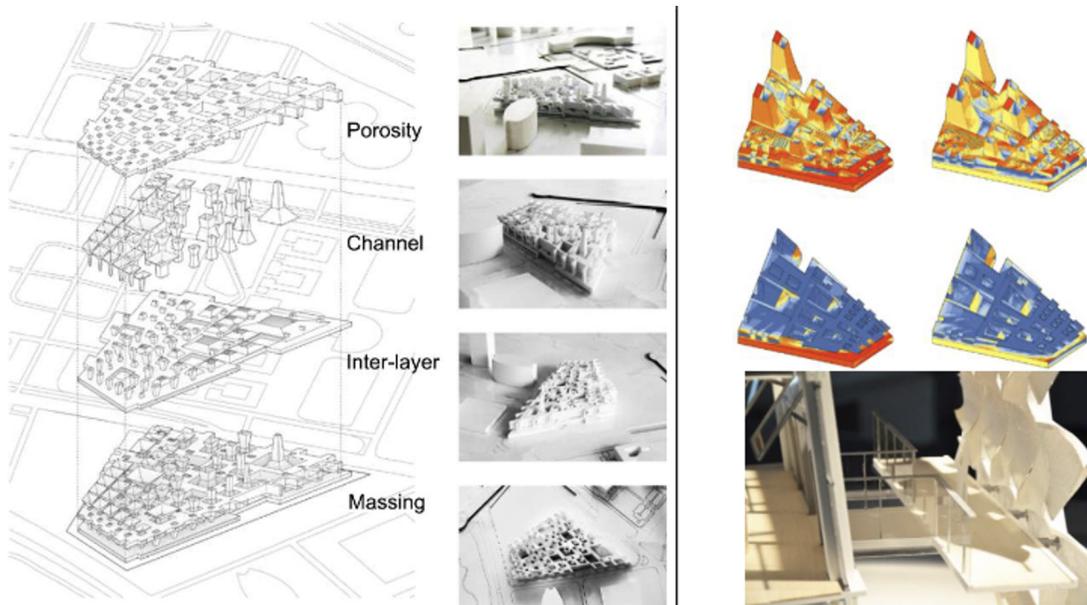


Fuente: Tomado de: Optimization of Landscape Spatial Configuration and Form for Thermal Comfort: A Case Study of Urban Square, Shanghai. College of Architecture and Urban Planning Tongji University, Shanghai. LI Linxue and TAO Simin (2022)

La generación del prototipo tomó en cuenta la composición de varios factores: porosidad, capas y canal. Con el fin de probar y optimizar el rendimiento de los prototipos en el entorno de luz del sitio, se intentó producir muchas variaciones del prototipo original por diferentes dimensiones, grosor, altura, dirección y forma, y se usaron los prototipos para simular las condiciones de luz natural de un día completo en el laboratorio de luz.

En el estudio del “calor”, el grupo de investigación se inspiró en la colonia de hormigas. Se empezó con la cavidad interior y análisis de la sección, se trató de explorar los modos de combinación de diferentes ramas del

Figura 21. Generación del prototipo



Fuente: Tomado de: Optimization of Landscape Spatial Configuration and Form for Thermal Comfort: A Case Study of Urban Square, Shanghai. College of Architecture and Urban Planning Tongji University, Shanghai. LI Linxue and TAO Simin (2022)

canal, alturas y formas de sección transversal, y se consideró el método de optimización por generación; combina el clima en el sitio y los elementos funcionales requeridos (en este caso es un museo industrial) y representa una mejor regulación del calor-simulación.

El presente proyecto muestra cómo se llegó a un resultado óptimo a escala urbana a base de experimentos digitales como ase terminaron análisis de incidencia solar, de luminosidad y de viento para llegar a un resultado arquitectónico óptimo. Donde los análisis digitales denominados “termodinámicos” determinaron la forma del edificio. Pero lo más importante es donde se hizo uso de la biomimética para partir de la primera idea: el nido de termitas, debido a que se observó que la temperatura al interior en estos era óptimas para el confort, así haciendo uso de la biomimética y herramientas paramétricas se llegó a un resultado optimo.

Materiales bio-inspirados (Manufactura Aditiva)

Los materiales pueden dividirse en naturales y sintéticos: la forma de la estructura y la composición de sus componentes.

Los materiales naturales a menudo se componen de diferentes materiales, pero formas similares. Estos han surgido a través de organismos muy dispares, como las formas hexagonales de panal y los esqueletos de radiolarios. Asimismo, los materiales celulares pueden estar compuestos de diferentes materiales, pero comparten una forma definida por dos características clave:

a) Una celda unitaria: la mayoría de los materiales celulares están definidos por una unidad representativa celda (por ejemplo, hexágono, rectángulo o rombo) que es alguna combinación de materia y espacio. Esto contrasta con un material homogéneo, que es una estructura sólida compuesta por ningún espacio vacío).

b) Repetición: la celda unitaria se repite en el espacio para crear la estructura más grande o emergida, el patrón resultante no necesita ser regular o periódico y puede incluir más de un tipo de celda unitaria (por ejemplo, una combinación de octógonos y cuadrados).

Los materiales celulares se han estudiado durante milenios, pero el interés en ellos ha aumentado recientemente gracias a la fuerza de las tecnologías AM (Additive Manufacturing) que pueden realizar geometrías celulares que antes no habían sido

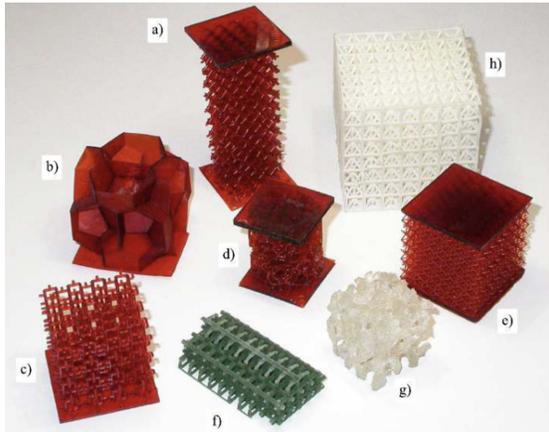
posibles. Con este recién descubrimiento de diseño surgen una serie de preguntas sobre el tipo de celda, su tamaño y distribución, y la forma en que debe integrarse en estructuras complejas. La naturaleza tiene varios ejemplos de materiales celulares empleados en una amplia gama de estructuras y para diferentes aplicaciones, por lo que es natural para buscar la sabiduría del diseño en la estructura natural (Gross, D. 2019).

Los materiales celulares tienen una amplia gama de aplicaciones; estructura y propiedades, entre muchas otras. En un nivel abstracto, estas propiedades son posibles debido a la manera en que los materiales celulares se dividen o se teselan en el espacio vacío, que tiene el resultado efectivo de remover material (útil para crear estructuras ligeras y/o flotantes), aumentando la relación superficie-volumen de relaciones (útil en aislamiento térmico, intercambio de calor y diseño de electrodos), y modificando el comportamiento de las olas (útil en acústica y absorción de impactos). Por lo tanto, es el uso inteligente del espacio vacío lo que tiene mayor valor en los materiales celulares para generar la(s) propiedad(es) de interés.

Dada la libertad de forma adicional en los materiales celulares habilitados por AM, un desafío importante es cómo se pueden diseñar materiales celulares para beneficio orientado a la aplicación, como los enumerados en la Figura 22 (siguiente página). La mayoría de las decisiones de diseño se toman en base a la observación empírica (experimentales o computacionales), métodos analíticos como los derivados de teoría de vigas, o combinaciones de las dos, más comúnmente en forma de ley de escala que relaciona la propiedad de interés (módulo elástico, por ejemplo) a la geometría de la estructura celular (espesor y longitud de la viga, por ejemplo). (Chung, D.H.J., Malone L., L.Ch., 2010).

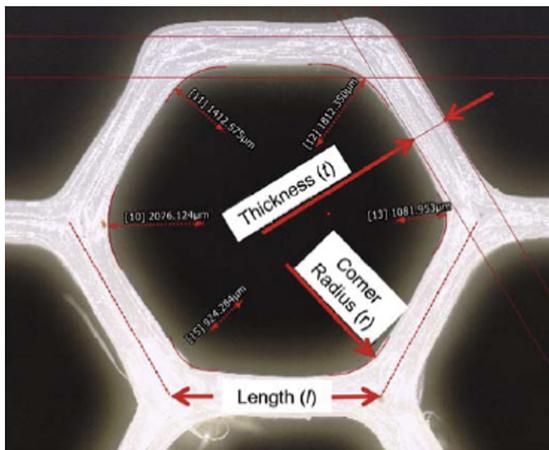
En la Figura 23 (siguiente página) se muestra el análisis estructural de una superficie hexagonal con distintos grosores de fabricación AM. Espécimen de panal con paredes de celdas y esquinas variables radio para identificar los límites de los parámetros de diseño, (B) prueba de compresión en el plano de los panales con cuatro radios diferentes, (C) respuesta efectiva de tensión-deformación para en el plano compresión del panal que muestra un mayor módulo efectivo y tensión de meseta a medida que aumenta el radio de la esquina.

Figura 22. Estructuras de muestra fabricadas mediante varios procesos de fabricación aditiva



Fuente: a-e) fabricadas mediante Procesamiento Digital de Luz, f) fabricadas mediante impresión de cera, g-h) fabricadas mediante Sinterización Selectiva por Láser. Tomada de: *Bioinspired Cellular Structures: Additive Manufacturing and Mechanical Properties*. Stampfl, Jurgen & Pettermann, H. & Liska, Robert. (2011). 10.1007/978-3-642-11934-7_6

Figura 23. Detalle de morfología de la célula hexagonal



Fuente: D. Bhate, C. Penick, L. Ferry, C. Lee, *Classification and selection of cellular materials in mechanical design: Engineering and biomimetic approaches*, *Designs* 3 (1) (2019) 19, <https://doi.org/10.3390/designs3010019>

El relleno uniforme es un enfoque útil para diseñar especímenes para la caracterización, y puede ser una estrategia beneficiosa cuando se trabaja con materiales celulares, pero en general no es preferible para los componentes ya que los puntales o paredes expuestos pueden ser propensos a daños e infiltración.

Conclusiones

En la arquitectura, la biomimética ha hecho grandes aportes como se vio a lo largo de este trabajo, sin embargo, se considera que aún así es poco lo que se ha obtenido hasta el momento en función a lo que puede aportar esta ciencia. La biomimética en la arquitectura necesita del parametrisismo para poder traducir sus hallazgos a la arquitectura, por lo tanto, es necesario estudiar los nuevos avances que se hacen en la tecnología para poder plasmar las ideas que surgen a través de la biomimética.

Los enfoques que se hacen en la biomimética a través de la arquitectura tienen intrínsecamente el sentido de la ecología como ahorro de recursos tanto energéticos como desde su construcción, esto es llevado en parte por el diseño computacional a través del parametrisismo, el cual permite tener el control sobre basta información para poder tomar la mejor decisión. Conforme la tecnología avanza, como el diseño computacional a través de la inteligencia artificial, los métodos de fabricación, etc., la biomimética en la arquitectura continuará su desarrollo en los siguientes años creando inventos cada vez más complejos e interdisciplinarios. Los nuevos hallazgos se darán a conocer más rápido y accesiblemente a los científicos que participan en la ciencia para poder hacer desarrollos de manera conjunta. ©

Referencias bibliográficas

- Biloria N. and Chang. (2016). Hyper Morfología, Experimentación de procesos de diseños inspirados por la biología, HyperBody Lab, TU Delft <http://www.hyperbody.nl/>, <http://pandalabccc.blogspot.com>
- Boix F.y Montelpare A. (2012). El proyecto arquitectónico : enseñanza y práctica de las estrategias proyectuales /. - Universidad Abierta Interamericana, 2012. (UAI - Investigación) ISBN 978-987-1867-11-0
- Cardenas R.C., Daniel A.M., de la Cruz C. (2022). *Atacama Desert: Genius of place*. 5. *BIOMIMICRY FOR AEROSPACE Technologies and Applications* Vikram Shyam, Marjan Eggermont, Aloysius F. Hepp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821074-1.00001-3>
- Chung,D.H.J.,Malone-L.,L.Ch., (2010). Computational fluid dynamics for urban design .In: CAAD's New Frontiers: Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, Hong Kong, 357-366.
- Daly, J. Farahani. (2017). Midiendo las Experiencias Humanas de los Espacios Públicos: Una Metodología en Construcción. *Conscious Cities Anthology: Bridging Neuroscience, Architecture and Technology*, Conscious Cities Journal No.1 DOI: <https://doi.org/10.33797/CCJ.01.01>
- D'Arcy Thompson (1917). En *Crecimiento y Forma*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. 1917. 294
- D. Ambrosi, G.A. Ateshian, E.M. Arruda, S.C. Cowin, J. Dumais, A.Goriely, G.A. Holzapfel, J.D. Humphrey, R. Kemkemmer, E. Kuhl. (2011). Perspectives of Biological Growth. *Journal of Mechanichs and physics of solids*. ELSEVIER.
- Ellison M.E. (2013). *Biomimetic Textiles (10)*. Engineered Biomimecry. School of Materials Science and Engineering, Clemson University, Clemson, SC 29634-0971, USA
- Frazer, John. 1995, *Hacia una Arquitectura Evolutiva*, AA Publications. School of Design, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong
- Geitmann, A., Steer,M (2006) The architecture and properties of the pollen tube cell wall. In: *The Pollen Tube*, pp. 177–200. Springer (2006)
- Goriely A., Ben Amar M., (2006). On the definition and modeling of incremental, cumulative, and continuous growth laws in morphoelasticity. *Springer-Verlag* 2006, 2.
- Goriely A. (2017). *The Mathematics and Mechanics of Biological Growth* Springer Science+Business Media LLC 2017. 35
- Goss D., Penick C., Grishin A., Bhate D. (2019). Bio-inspired design and additive manufacturing of cellular materials. 6. *BIOMIMICRY FOR AEROSPACE Technologies and Applications*. Vikram Shyam, Marjan Eggermont, Aloysius F. Hepp. 164-201
- Goy I. (2006). Kant's Theory of Biology. *Epigenetic Theories: Caspar Friedrich Wolff and Immanuel Kant*. (pp 47).
- Goy I., Watkins E. (2013). *Kant's Theory of Biology*. Edited by Ina Goy and Eric Watkins. Introduction Ina Goy and Eric Watkins. Editorial Alianza, pp 232-239. ISBN 978-3-11-022578-5.
- Jinao Zhang, Jaehyun Shin, Yongmin Zhong, Denny Oetomo (2019). Heat conduction-based methodology for nonlinear soft tissue deformation. Springer Edition. 29
- Larson, Allan. (2018). *Guía Princeton de la Evolución, Conceptos en la Macroevolución del Carácter: Adaptación, homología y capacidad de evolución*. Guía Princeton 2014, ISBN 978-0-691-14977-6
- Linxue L. and Simin T. (2022). Optimization of Landscape Spatial Configuration and Form for Thermal Comfort: A Case Study of Urban Square, Shanghai. College of Architecture and Urban Planning Tongji University, Shanghai, 200092, China.
- Lipovetsky, G. (2015). *Towards a sensitive architecture*. Alexandra Laignel-Lavastine. Anagrama Colección Argumentos (Ed). On Lightness (Pp. 265-266).
- Luo, L., & Zhang, W. (2014). A review on biological adaptation: with applications in engineering science. *Selforganizology*, 1(1), 23-30.
- Menges, A. (2011). Biomimetic design processes in architecture: morphogenetic and evolutionary computational design. (Pp. 1,5) doi:10.1088/1748-3182/7/1/015003
- Mirón P. L. (2009). El mundo de las matemáticas en la naturaleza. *Didáctica de las matemáticas*. Pp-1. ISSN 1988-6047

- Neal M., 2018. Manual de diseño digital en Grasshopper. https://grasshopper.app/es_419/glossary/functions/function-declaration/
- Moe K 2013 *Convergence: An Architectural Agenda for Energy* (London & New York: Routledge) pp 22-25
- Nguyen L., Daniel Lang, (2016). Procesos evolutivos como modelos de exploración. University of Missouri. DOI:10.1007/978-3-319-46374-2_15
- Parlac V. (2018). *Adaptive Architecture: Towards Resiliency in the Built Environment*. University of Calgary
- Rodríguez D., 2022. Figura propia. Propuesta de tema para Doctorado variables dependientes e independientes. Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Santamaría, C. & Silva, J (2018). Allometric growth in the armadillo *Chaetophractus villosus* (Xenarthra, Dasypodidae). *Acta Theriologica*, 63(1), 97-104.
- Schumacher, Patrik. *Parametricism (2011) : A New Global Style for Architecture and Urban Design*, 2009/07/01. DOI - 10.1002/ad.912
- Torben Lenau and Thomas Heseler (2019). Biomimética en la auto curación y auto organización. 13. *BIOMIMICRY FOR AEROSPACE Technologies and Applications*. Vikram Shyam, Marjan Eggermont, Aloysius F. Hepp. 333-355
- Urdinola, Diana & Zuleta Gil, Alejandro & Valenci-Escobar, Andres & Torreblanca, David & Patino, Ever. (2018). *Biomimicry and Design*.
- Wolfwang B. (2013). *Evolutionary Computation and Genetic Programming*. **17**. *Engineered biomimicry*. (Akhlesh Lakhtakia and Raúl Jose Martín-Palma) 444-445. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-415995-2.00017-9>