

GEOMETRIA NATURAL

GEOMETRIA DIGITAL

Trabajo Fin de Grado

30-05-2025

Textos, edición, maquetación:

Óscar Santos Fernández

DNI: 04865450F EXP: 18368

Tutor:

Eduardo Javier Gómez Pioz

TFG - Aula 7

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Universidad Politécnica de Madrid

GEOMETRIA NATURAL GEOMETRIA DIGITAL

*Arquitecturas procedurales en la era de
la fabricacion digital*

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Óscar Santos Fernández

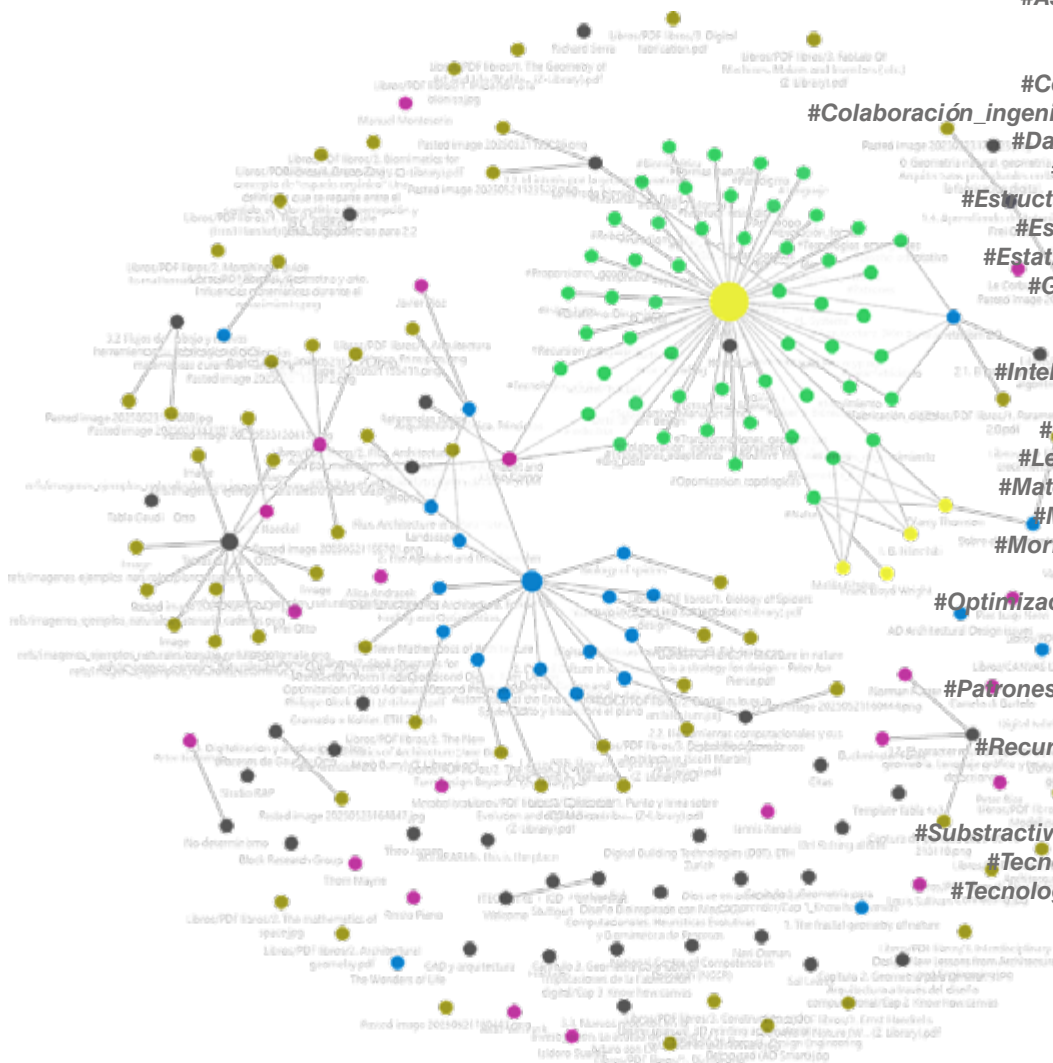
Geometría natural, geometría digital. Arquitecturas
procedurales en la era de la fabricación digital

ÍNDICE

ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	9
Motivación	13
Estado de la cuestión	15
Objetivos e Hipótesis	17
Metodología	19
Estructura del trabajo	21
1 Geometría para comprender	23
1.1 El interés por la geometría natural. La mirada biónica	25
1.2 El carácter multidisciplinar de la geometría. Lenguaje gráfico y tesoro de acciones	37
1.3 Aprendiendo de: Antonio Gaudí y Frei Otto	43
2 Geometría para generar	55
2.1 El paradigma 4.0. Del compás al algoritmo	57
2.2 Herramientas computacionales y sus parámetros geométricos	65
2.3 Digitalización y ampliación de los procesos de Gaudí y Otto	77
3 Geometría para fabricar	83
3.1 La revisión del oficio y el tablero geopolítico	85
3.2 Flujos de trabajo y nuevas herramientas de fabricación digital	93
3.3 Nuevos procesos en la investigación. La actitud de trabajo y el futuro con I.A.	99
CONCLUSIONES Y APORTACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	109

#Arquitectura biónica
#Ley de crecimiento
#Diseño computacional
#Fabricación digital
#Form Finding
#Rapid Prototyping
#Estructuras porosas
#Estructuras multibarra

#Additive_Manufacturing
#Algoritmos
#Arquetipo
#Arquitectura_Biónica
#Assembly_process
#Big_Data
#Biomimética
#Cellular_Automata
#Colaboración_ingeniería-arquitectura
#Data-driven_design
#Diseño_Biónico
#Estructuras_adaptativas
#Estructuras_ligeras
#Estatismo-Dinamismo
#Geometría_fractal
#Impresión_3D
#Industria_4.0
#Inteligencia_artificial
#L-Systems
#Lenguaje_gráfico
#Ley de Movimiento
#Materiaidad_flexible
#Minimal_surfaces
#Morfogénesis_digital
#Naturaleza
#Optimización_topológicas
#Paradigma_BIO
#Parametricismo
#Patrones_de_crecimiento
#Protocélulas
#Recursión_estocástica
#Robótica
#Sostenibilidad
#Subtractive_Manufacturing
#Tecnologías_digitales
#Tecnologías_emergentes



RESUMEN

La arquitectura y el diseño contemporáneos viven un momento de crucial cambio. Con la digitalización de la disciplina, las herramientas computacionales han permitido el trabajo con geometrías más complejas y optimizadas, dando por otro lugar a la aparición de sistemas y métodos industriales capaces de fabricarlos. Este cambio de paradigma, reflejado en el manifiesto Parametricista durante la 11ª Bienal de Venecia en 2008, promovió un cambio en los estilos y procedimientos de diseño, dando lugar a esa tan llamada *arquitectura paramétrica* o *Biomimética*.

Los cambios de rol en el oficio, la conformación de equipos multidisciplinares y la tendencia a la prefabricación de soluciones constructivas modulares marcan una tónica donde la fabricación digital y el diseño basado en algoritmos parecen tratar de imitar a la naturaleza y diseñar con lo mejor que tiene por ofrecer, pero en muchas ocasiones priorizando el impacto visual y dejando de lado el real aprendizaje del mundo orgánico.

Dado el potencial de la tecnología actual y la necesidad por propuestas innovadoras en un tiempo de encarecimiento de los recursos energéticos y las materias primas, se ofrece una revisión del papel de la geometría como instrumento de descifrado de las leyes orgánicas de crecimiento, de las que la naturaleza hace uso para superar sus retos y cómo desde su criterio interno, la arquitectura puede (y debe) encontrar las vías para fabricar un futuro desde una mayor observación a lo que la rodea.

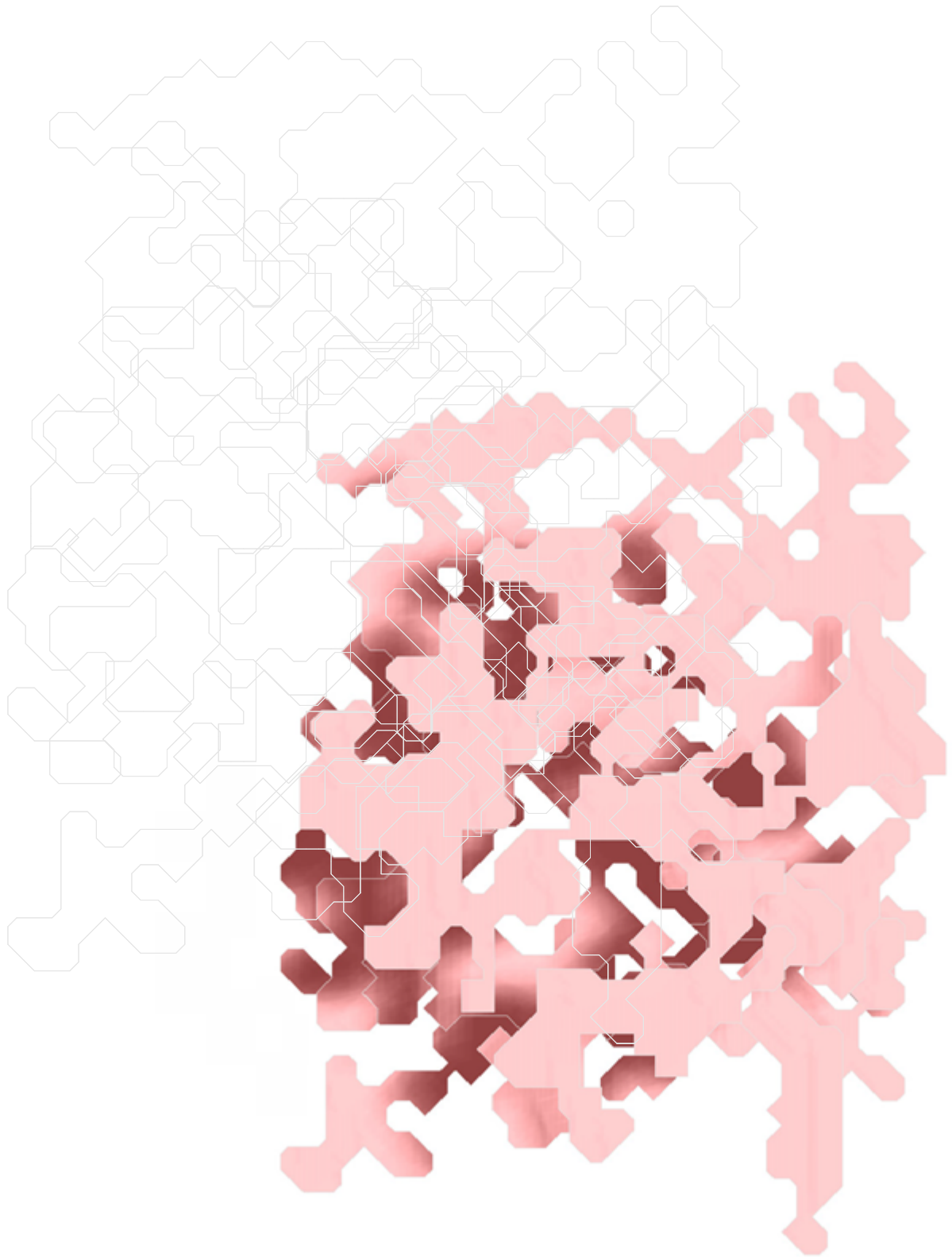
ABSTRACT

Contemporary architecture and design are going through a moment of crucial change. With the digitalisation of the discipline, computational tools have made it possible to work with more complex and optimised geometries, giving way to the emergence of industrial systems and methods capable of manufacturing them. This paradigm shift, reflected in the Parametricist manifesto during the 11th Venice Biennale in 2008, promoted a change in design styles and procedures, giving rise to the so-called *parametric* or *Biomimetic architecture*.

The changes in the role of the profession, the formation of multidisciplinary teams and the trend towards prefabrication of modular construction solutions set a tone where digital fabrication and algorithm-based design seem to try to imitate nature and design with the best it has to offer, but often prioritising visual impact and leaving aside the real learning of the organic world.

Given the potential of current technology and the need for innovative proposals at a time of rising prices for energy resources and raw materials, a review is offered of the role of geometry as an instrument for deciphering the organic laws of growth that nature uses to overcome its challenges and how, from its internal criteria, architecture can (and must) find ways to manufacture a future based on greater observation of its surroundings.

INTRODUCCIÓN



MOTIVACIÓN

La motivación para el desarrollo de este trabajo surge de una profunda fascinación por la geometría como herramienta capaz de generar soluciones arquitectónicas eficientes, adaptadas a los medios y recursos técnicos del momento. La geometría no solo organiza y da forma a las ideas, sino que también actúa como un puente entre los inicios abstractos del diseño y su aplicación práctica, permitiéndonos abordar retos complejos con claridad y precisión.

Desde siempre, la naturaleza ha sido una fuente inagotable de inspiración, ofreciendo ejemplos de estructuras orgánicas que combinan belleza y funcionalidad. En este contexto, considero que la geometría es un lenguaje universal capaz de interpretar y traducir estos patrones naturales en soluciones innovadoras. Al estudiar las estructuras orgánicas, encontramos un paralelismo entre la eficiencia de las formas naturales y su potencial aplicación en el diseño arquitectónico, lo que refuerza mi convicción de que la naturaleza puede guiarnos hacia una arquitectura más coherente con el entorno.

El dibujo ha sido una herramienta esencial en mi formación, tanto de análisis como de exploración de nuevas ideaciones gráficas. Dibujar me permite comprender la esencia de las estructuras, descomponerlas en sus elementos fundamentales y experimentar con combinaciones que aúnan estética y funcionalidad. Este enfoque analítico y creativo se convierte en un puente entre la inspiración inicial y las soluciones concretas que persigo en mi trabajo.

Asimismo, el diseño computacional ha ampliado mis horizontes, ofreciéndome herramientas avanzadas para modelar y decodificar esquemas complejos. La capacidad de simular comportamientos, optimizar topologías y evolucionar iteraciones ha revolucionado mi manera de abordar el diseño, conectando la teoría con la práctica.

Por otro lado, la fabricación digital se presenta como un pilar clave en el proceso. Gracias a técnicas como la impresión 3D y el corte láser, se pueden alcanzar resultados que exploran la relación entre la forma y el proceso constructivo con mayor fidelidad. Comprender el cambio de paradigma en el oficio, donde el diseñador es también constructor, logrando una autonomía de operación capaz de retroalimentar la toma de decisión con los resultados obtenidos

Finalmente, mi pesquisa radica en integrar todas estas ideas en una visión propia de trabajo, entendiendo el diseño en el siglo XXI como un proceso integral donde cada etapa se enriquece mutuamente.



ESTADO DE LA CUESTIÓN

A mediados de 1965, el cofundador de Intel, Gordon E. Moore propuso ante la comunidad tecnológica la idea de que cada 2 años el número de procesadores y su eficiencia se vería duplicada, reduciendo su coste y mejorando considerablemente las posibilidades de los procesadores domésticos. Este pronunciamiento sería conocido como la Ley de Moore, trasladándose con empírica certeza hasta el año 2020.

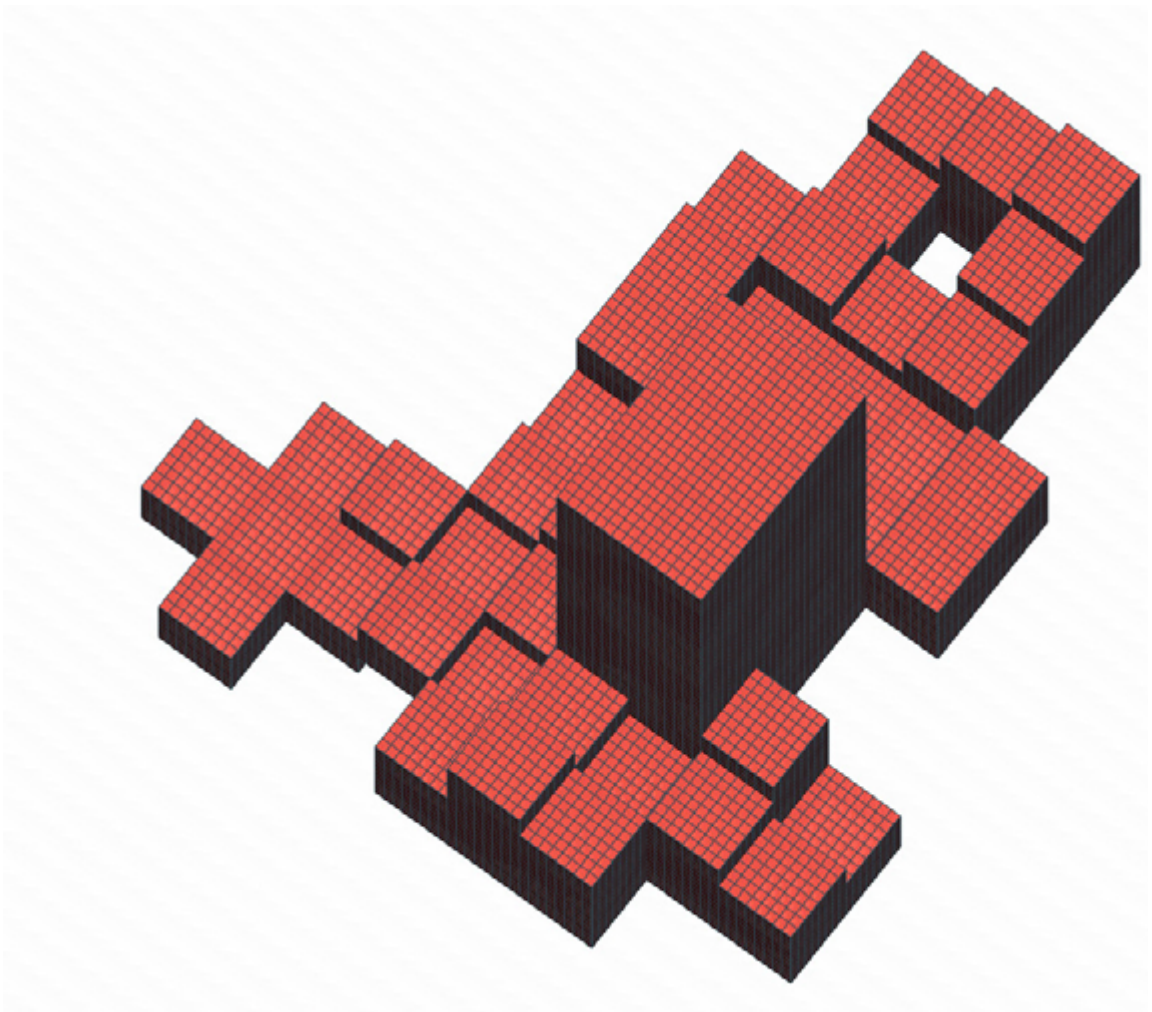
En el momento de redacción de este documento la arquitectura contemporánea vive un contexto de crucial transformación impulsado por los cambios en la tecnología digital y material para su generación, los criterios de decisión y uso de recursos, y su correspondiente proceso de manufacturación y construcción.

La incorporación de las tecnologías CAD (Computer-aided design) y CAM (Computer-aided manufacturing) en los años 90 ha significado una exponencial mejora en la modelización y cálculo de formas geométricas complejas, alejándose de los métodos tradicionales. No tan sólo en la exploración geométrica sino también en los procedimientos de su materialización, donde la programación mediante algoritmos propicia un ambiente donde el arquitecto responde con soluciones más eficaces y optimizadas al reto en cuestión.

En paralelo, la industria de la construcción también ha evolucionado rápidamente para responder a estas nuevas demandas. Análogamente a la industria automotriz, se presentan nuevos materiales y sistemas constructivos, componentes prefabricados y soluciones modulares, integrándose cada vez más con las herramientas digitales y permitiendo un enfoque más interdisciplinar. Tendencias como Parametric Architecture o Biomimetics ejemplifican este hecho y nos hacen preguntarnos si las nuevas oportunidades se centran en un efecto visual y estético o en aprovechar las leyes orgánicas de construir y abordar el espacio.

en explorar cómo la arquitectura puede seguir reinventándose, integrando la tecnología sin perder su esencia como disciplina cultural y social.

Es por ello que incorporar el estudio de la naturaleza representa una oportunidad clave para avanzar en esta transformación. La creación de bases de datos con parámetros que nos permitan entender las leyes y recursos del mundo natural abre nuevas posibilidades para la arquitectura.



OBJETIVOS

Las posibilidades que permiten instrumentos de software como Grasshopper (incorporado en la herramienta Rhinoceros) y su comunidad de tipo Open Source, hace más ágil y disponible el dialogo entre las necesidades de un público interdisciplinar (desde diseñadores de joyería hasta ingenieros civiles) y las herramientas propuestas por y para los propios usuarios.

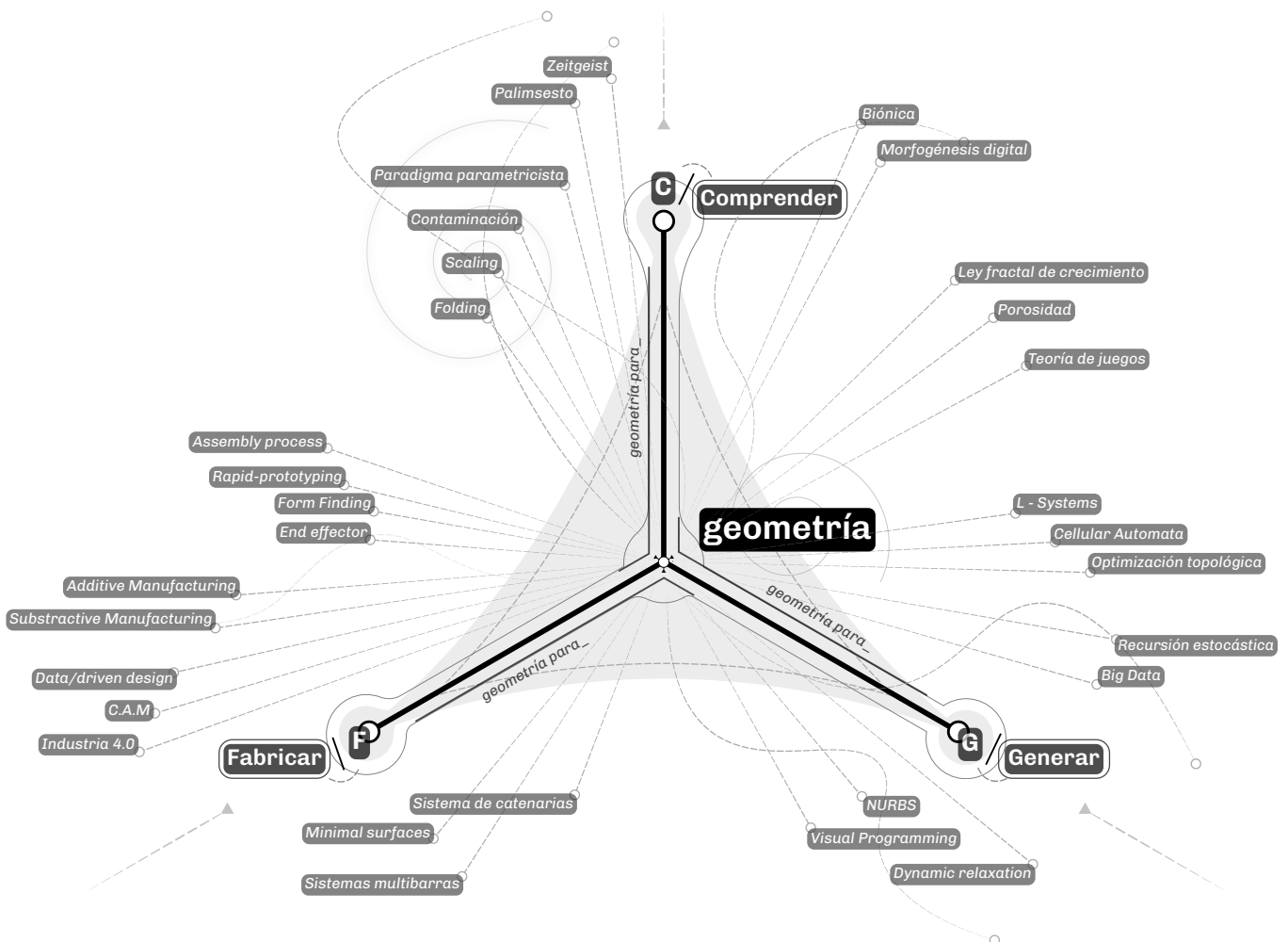
El objetivo de este estudio es de tipo teórico y empírico:

-Trazar un hilo narrativo que exponga la transición histórica, tecnológica y cultural que ha propiciado el presente de la disciplina y revise el acercamiento de esta al mundo natural visitando los orígenes matemáticos y biológicos del siglo XX y la etapa digital más reciente.

-Explorar el mundo gráfico de las arquitecturas procedurales y su potencial aplicación a la fabricación digital en propuestas arquitectónicas.

La idea primordial es el desarrollo de series gráficas de conceptos geométricos donde situar los parámetros y las leyes orgánicas de crecimiento (comprendiendo su carácter) y proponiendo una modificación de estas con el fin de explorar su viabilidad para resolver situaciones de arquitectura (generación de forma y estructura).

Finalmente, recoger y recopilar las premisas y sus resultados en una base de datos visual basada en nodos (a través del software Obdisian) donde se recopilen geometrías de inspiración natural junto a las acciones léxicas que propician un juego de dichas estructuras y muestren las capacidades de estas.



METODOLOGÍA

Se parte de una recopilación bibliográfica de autores por su obra y época, donde se valora su aportación a las siguientes categorías:

1. **Biónica y Biomimética**
2. **Geometría y Estructuras**
3. **Fabricación digital y diseño computacional**
4. **Lenguaje Gráfico y teoría arquitectónica**
5. **Tecnología y procesos**

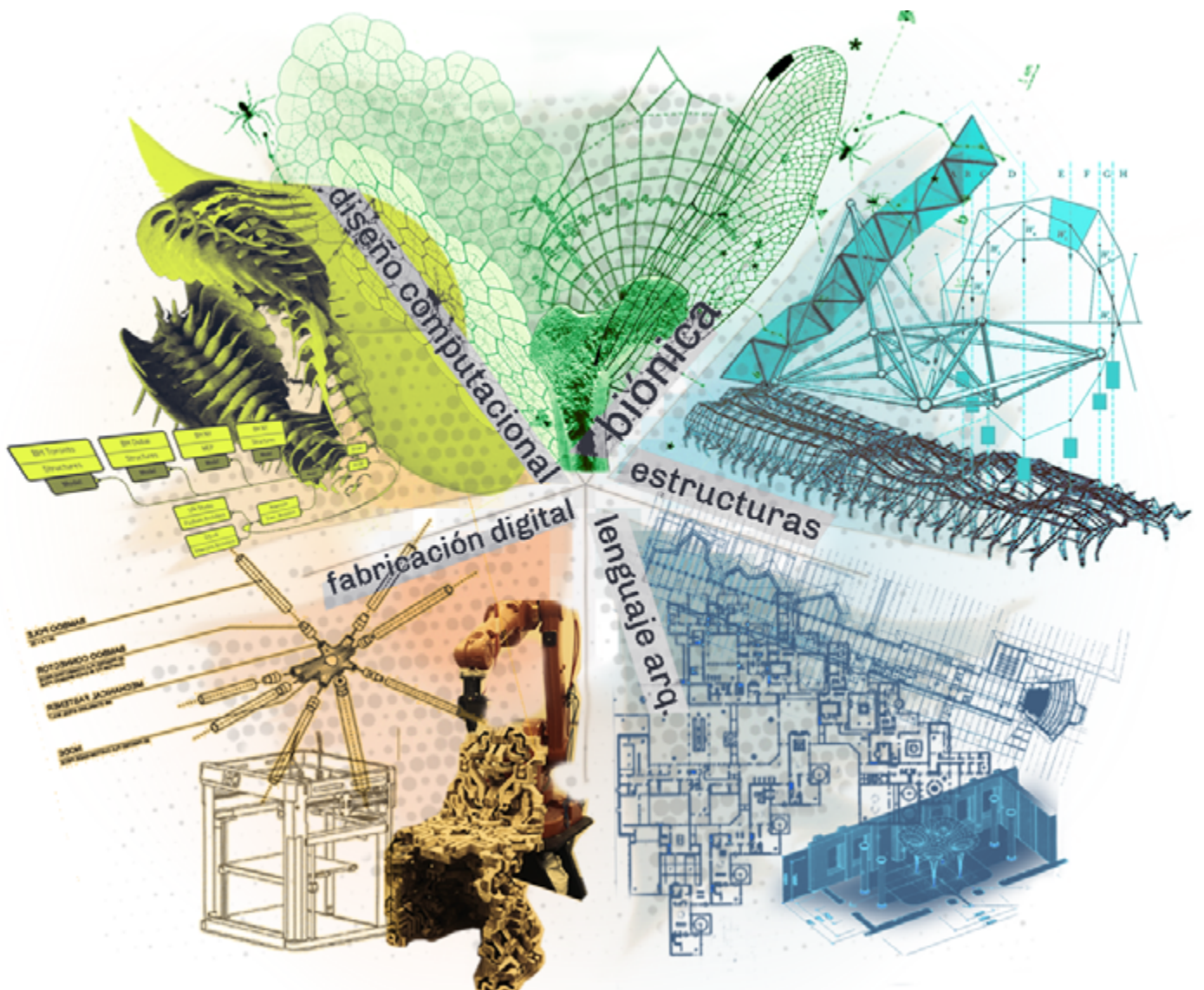
Al formalizar esta base de información se realiza un filtrado de términos clave, dando lugar a un tesoro de acciones y conceptos que sirva como principio creativo.

El principio es enfrentar las metodologías de arquitectos o equipos de arquitectos con procesos y contextos radicados, primeramente en una mirada al mundo orgánico y su traslado a la práctica con mecanismos analógicos, como es el caso de Antonio Gaudí y Frei Otto, y posteriormente equipos de investigación asentados en el ejercicio contemporáneo con herramientas computacionales de diseño y producción de soluciones innovadoras, siendo escogidos los departamentos ICD e ITKE de la Universidad de Stuttgart.

Se desarrolla un diagrama donde se analizan casos reales siguiente una lectura en el siguiente orden:

- Problema arquitectónico a ser resuelto
- Inspiración natural tomada como principio de referencia
- Uso de recursos geométricos para la decodificación de la inspiración
- Revisión de las demandas que exige el proyecto
- Dibujo de modelos arquitectónicos
- Extrapolación a su fabricación por métodos digitales
- Comprobación del grado de similitud entre la propuesta y el resultado construido

F.4 Diagrama sobre la estructura del trabajo
(Elaboración propia, 2025)



ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Tras una primera introducción donde se depositan los posos intelectuales y misiones que se plantea completar, se da paso al cuerpo del trabajo diseminado en 3 capítulos:

- 1. **Geometría como herramienta de comprensión:** análisis de órdenes geométricos
- 2. **Geometría como herramienta de generación:** flujos de desarrollo gráfico
- 3. **Geometría como herramienta de fabricación:** diseño y gestión de la fabricación de componentes y su ensamblaje

En la primera parte se abarca el marco teórico propuesto por la Biónica y su visión al estudio de las bases biológicas y matemáticas aplicables a la disciplina de diseño, con especial hincapié en las obras de D'acry Thomson y Matila Ghyka.

A continuación, se realiza un análisis de usos de la geometría para desarrollar propuestas basadas en leyes naturales en la obra de Antonio Gaudí y Frei Otto, entendiéndose esta como herramienta para estudiar y entender redes y tejidos orgánicos extrapolables a la tecnología de sus respectivas épocas.

En el segundo capítulo se ahonda en el cambio cultural e instrumental de la profesión, con referencia a los criterios de diseño, la evolución del oficio y se aporta el conjunto de series gráficas como ilustración y aplicación práctica de las fases del diagrama.

Por último, se explora la viabilidad de estas en la etapa de fabricación de cara a asumir el proyecto como un proceso de diseño y construcción integral. Esto permite, por un lado, entender en profundidad los flujos de trabajo de los casos de estudio, y por otro explorar cómo las nuevas herramientas digitales pueden ayudar a descifrar estos esquemas estructurales y abrir nuevos caminos.



F.6 Lunariae. Gouache sobre papel (Pablo Palazuelo, 1968)

1

**GEOMETRÍA PARA
COMPRENDER**



1.1 EL INTERÉS POR LA GEOMETRÍA NATURAL. LA MIRADA BIÓNICA.

La mirada biónica

“La ciencia física y la filosofía van codo con codo, y una sostiene a la otra. Sin algo del refuerzo de la física la filosofía se debilitaría; y sin algo de la riqueza de la filosofía la ciencia sería pobre”.

Thompson, D. W. (2005)

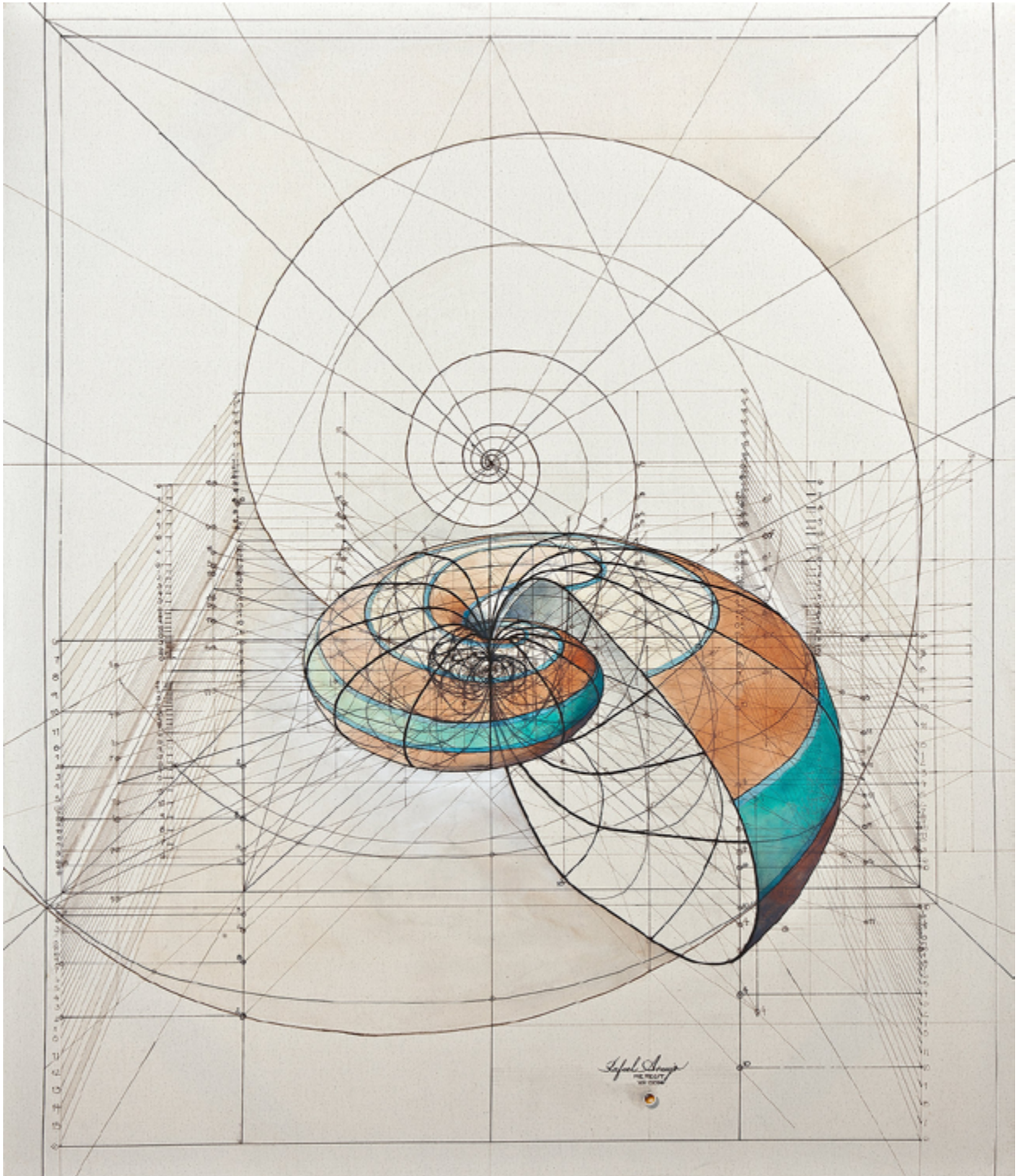
La mirada biónica no consiste en imitar la forma de la naturaleza, sino en comprender sus principios de organización, eficiencia y adaptación. Implica observar el mundo vivo como un sistema optimizado por millones de años de evolución, donde cada estructura responde a necesidades funcionales con mínimo recurso. Esta mirada requiere traducir estrategias biológicas en lógicas proyectuales: tejer, ramificar, porosificar, crecer, tensar. No se trata de copiar, sino de aprender a construir como lo haría la naturaleza. Desde los tejidos celulares hasta las redes estructurales, la mirada biónica permite al arquitecto concebir sistemas flexibles, resilientes y sostenibles, que no sólo se integran al entorno, sino que lo interpretan y se adaptan a él.

Pioz, J. (2013)

El objetivo de este subcapítulo es tratar algunos de los aspectos clave para una forma de proyectar arquitectura a partir de pilares fundamentales en lo que al paradigma BIO se refiere, con un enfoque hacia la hibridación de la praxis con una actitud de humildad hacia los ritmos y procesos presentes en la biosfera.

F.7

61 Phaeodaria
(Ernst Haeckel, 1904)



La geometría como ley natural

Sobre la forma

La forma se desvela como la situación estática de observación de un prolongado proceso evolutivo cuyo origen está en el movimiento. Sus cambios y adaptaciones son la explicación de un delicado e inexorable acto de fuerzas y esfuerzos, una manifestación de diversos tipos de energía: químicas, eléctricas o térmicas.

Los procesos de división, atracción o repulsión entre unidades celulares son sucesos que acontecen en la dimensión de la microescala. Quizá insignificantes para el ojo humano, estos cuentan con gran interés, pues tal y cómo la morfología nos muestra las causas de su conformación, muy posiblemente vaticine los posteriores ritmos y cambios de un sistema en adaptación. Los diagramas de fuerzas no se dan exclusivamente en un análisis estructural, sino que ya desde la atención hacia las dinámicas de conformación de tejidos, redes o lógicas de crecimiento, estos nos permiten descifrar los principios más elementales en cuestión de disposición de las unidades, vectores de crecimiento, proporción entre elementos o de correlación.

Ley de crecimiento

El crecimiento en los organismos vivos obedece a leyes que regulan la forma y la proporción. D'Arcy Thompson, en *On Growth and Form*, demuestra que los procesos morfogénéticos están gobernados por fuerzas físicas y matemáticas. "El crecimiento puede considerarse como la manifestación visible de un conjunto de leyes invisibles" (Thompson, 1917, cap. II). Estas leyes no solo afectan el tamaño, sino también cómo se adapta y transforma la forma según condiciones mecánicas. Thompson representa estos cambios mediante cuadrículas geométricas que muestran cómo una especie puede derivar en otra conservando coherencia estructural. Para él, la forma es el resultado de tensiones internas y fuerzas externas distribuidas con lógica.

Matila Ghyka complementa esta visión desde la geometría.

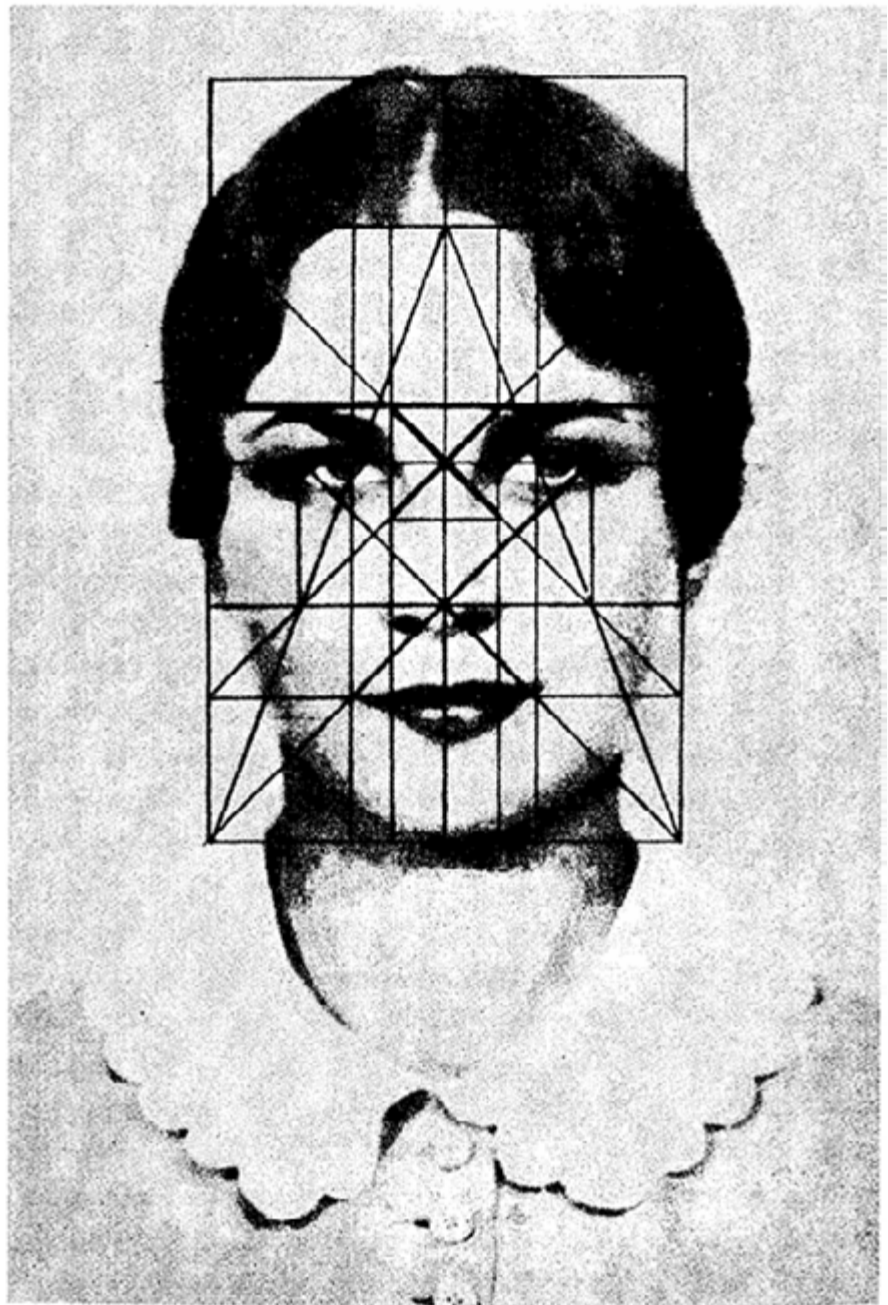


PLATE XXXVI
Miss Helen Wills, Harmonic Analysis

En *The Geometry of Art and Life*, describe cómo estructuras naturales —conchas, ramas o espirales— crecen siguiendo progresiones geométricas, manteniendo su forma durante la expansión. Las espirales logarítmicas, en particular, ilustran un crecimiento armónico constante: “The logarithmic spiral preserves the form throughout its development” (Ghyka, 1946, p. 112).

Ambos coinciden en que el crecimiento revela un principio de organización formal. Para la arquitectura, esta noción sugiere que el diseño puede concebirse como un sistema adaptativo, donde la forma responde al tiempo, al contexto y a sus propias reglas de transformación.

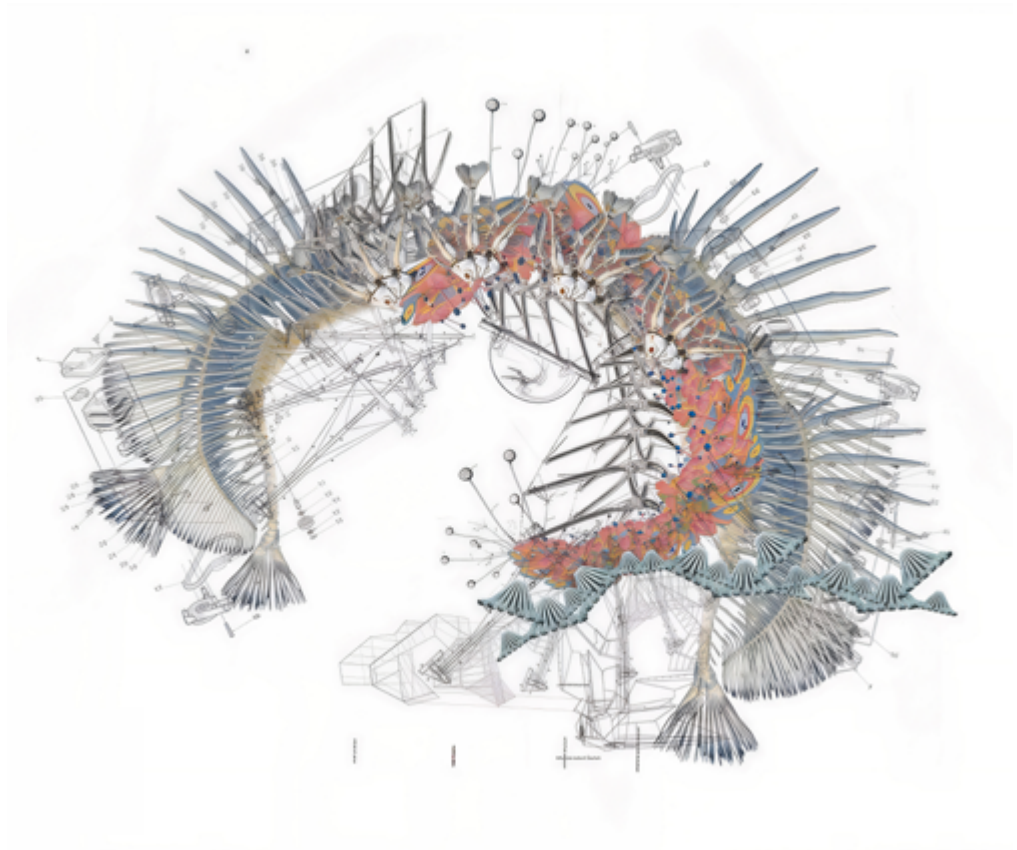
Proporción

La proporción regula la relación entre partes y permite equilibrio en el conjunto. Matila Ghyka, en *The Geometry of Art and Life*, sostiene que proporciones como la sección áurea o las progresiones geométricas no son decorativas, sino principios funcionales que optimizan espacio y energía. Observa que estas proporciones emergen espontáneamente en la naturaleza —en la disposición de hojas, la estructura de cristales o las formas de crecimiento— porque garantizan eficiencia y armonía. “The Golden Number is not merely an aesthetic convention, but a functional law” (Ghyka, 1946, p. 81).

D’Arcy Thompson, desde una mirada estructural, explica cómo las proporciones varían con el crecimiento y entre especies, respondiendo a condiciones mecánicas. En *On Growth and Form* (cap. XVII), usa cuadrículas de transformación para ilustrar cómo pequeños reajustes proporcionales generan nuevas formas. Así, la proporción no es una constante estática, sino un mecanismo de adaptación.

Ambos autores ven en la proporción una herramienta para leer la forma viva. En diseño, esto permite estructurar sistemas donde cada parte se relaciona con el todo según reglas internas, facilitando la coherencia formal y la eficiencia en el uso del material y la energía.

F.9 Plate XXXV1, Miss Helen Willis, Harmonic Analysis (Matila Ghyka, 1946)



Economía de material y energía

La naturaleza tiende a la economía: a resolver necesidades estructurales y funcionales con el mínimo de material y energía posible. D'Arcy Thompson observó que la forma de un organismo responde a condiciones físicas que buscan eficiencia: "la forma es, en gran medida, una respuesta a condiciones físicas" (*On Growth and Form*, cap. VIII). Huesos, tejidos o conchas adoptan configuraciones que distribuyen cargas de forma óptima, eliminando lo superfluo y adaptándose a las tensiones del entorno.

Matila Ghyka, por su parte, relaciona las proporciones armónicas con una eficiencia energética profunda. En *The Geometry of Art and Life*, muestra cómo formas como las espirales logarítmicas permiten crecer sin alterar la estructura, conservando equilibrio y evitando el derroche (Ghyka, 1946, pp. 110–114). Esta lógica, inscrita en lo vivo, es tanto funcional como formal.

Para la arquitectura biónica, esta idea implica diseñar sistemas que, como los naturales, respondan con precisión estructural a las condiciones del entorno, evitando el exceso y maximizando la coherencia formal y energética.

Modularidad

La naturaleza se organiza mediante módulos repetibles y adaptativos. D'Arcy Thompson identifica patrones celulares o segmentados como base morfogenética. Para Ghyka, estas unidades se rigen por proporciones armónicas.

Javier Pioz ve en esta lógica una guía para la arquitectura: módulos porosos, jerárquicos y escalables permiten estructuras más eficientes. En *Arquitectura Biónica*, defiende que la modularidad natural inspira sistemas capaces de variar sin perder funcionalidad ni coherencia.



Ritmo

El ritmo, en biología y geometría, es la repetición con variación: un patrón dinámico que regula el crecimiento y la forma. D'Arcy Thompson lo observa en las ondulaciones del crecimiento celular y en la progresión de estructuras repetidas bajo fuerzas constantes (*On Growth and Form*, cap. VI).

Matila Ghyka lo vincula a la armonía: ritmos visuales como las progresiones geométricas articulan belleza y orden (Ghyka, 1946, p. 88). Para Javier Pioz, el ritmo estructural —presente en tejidos, espículas o esqueletos— guía la repetición modular en arquitectura, permitiendo sistemas flexibles y resonantes con la lógica de lo vivo.

Seriación

La seriación es la organización progresiva de elementos según una lógica de transformación o ritmo. En la naturaleza, se manifiesta en la sucesión de hojas, segmentos corporales o patrones de crecimiento jerárquico. D'Arcy Thompson la observa en la transición formal entre especies o etapas de desarrollo, donde cada variación sigue una relación proporcional (*On Growth and Form*, cap. XVII).

Matila Ghyka vincula la seriación a progresiones matemáticas, especialmente armónicas, como base de estructuras vivas y obras de arte (Ghyka, 1946, p. 73). Para Javier Pioz, seriación es clave en sistemas constructivos evolutivos, donde cada módulo deriva del anterior con continuidad funcional y formal.

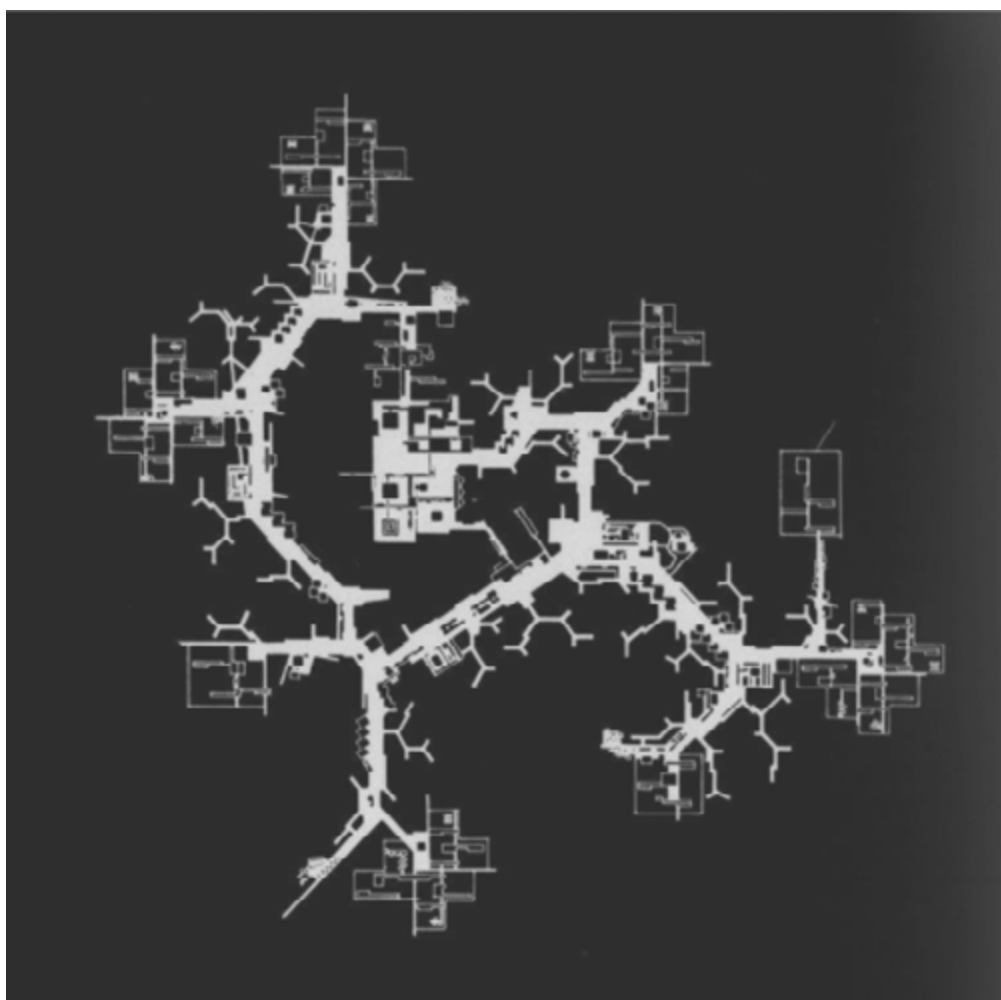
F.11 The Man Walking
(Etienne-Jules Marey, 1890)

F.12 Desnudo bajando
una escalera nº2 (Marcel
Duchamp, 1912)

Vacío y porosidad

En la naturaleza, el vacío no es ausencia, sino espacio funcional: canal, aligeramiento o reserva. Estructuras como huesos o esponjas marinas distribuyen materia con lógica de mínimos, generando redes porosas que optimizan resistencia y peso (*On Growth and Form*, cap. VIII).

Pioz retoma esta estrategia como principio constructivo: los



sistemas vivos dejan pasar aire, luz o fluidos sin comprometer su solidez. La porosidad, entendida como estructura habitada por el vacío, permite arquitecturas más ligeras, adaptativas y sostenibles, donde el espacio no construido es también parte activa del diseño.

Redes estructurales // Sistemas multibarra

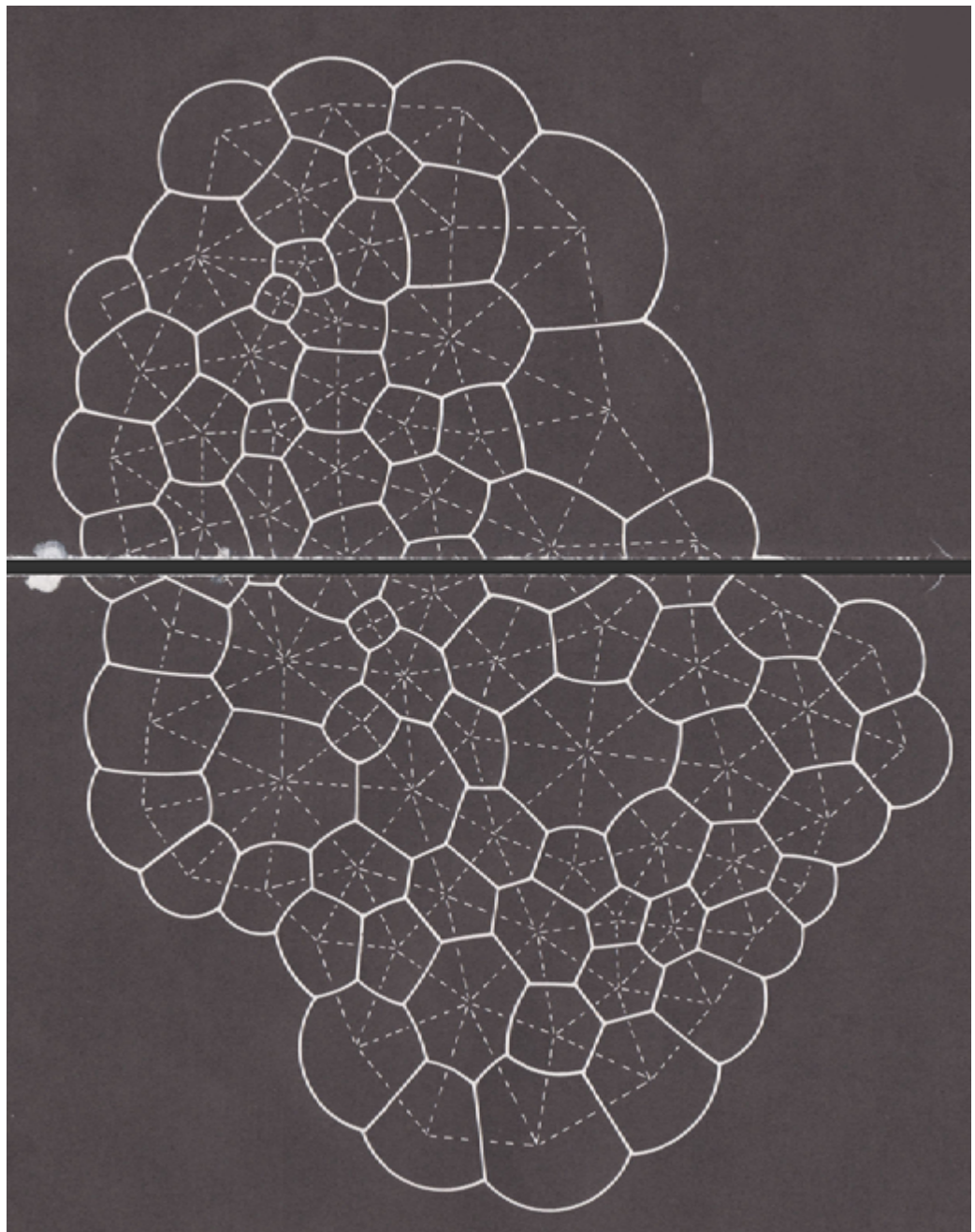
Las redes estructurales son sistemas organizados en nodos y vínculos, capaces de distribuir cargas de forma eficiente. En *On Growth and Form*, D'Arcy Thompson muestra cómo esqueletos, tejidos o estructuras celulares se organizan siguiendo trayectorias de fuerza, generando configuraciones reticulares que equilibran material y tensión.

Frei Otto y Javier Píoz desarrollan esta lógica en arquitectura a través de los sistemas multibarra: conjuntos de elementos lineales que forman entramados resistentes, ligeros y adaptativos. Estas redes imitan la eficiencia natural, permiten crecer por agregación modular y optimizan la respuesta estructural con mínimo consumo de material y máxima flexibilidad formal.

Fractalidad

La fractalidad describe formas cuya estructura se repite a distintas escalas, revelando un patrón de auto-semejanza. Benoît Mandelbrot acuñó el término en los años setenta para describir geometrías naturales —como costas, árboles o nubes— que no encajan en la geometría euclidiana, pero obedecen a leyes matemáticas precisas (*The Fractal Geometry of Nature*, 1982). Matila Ghyka, aunque anterior a Mandelbrot, ya intuía que la belleza orgánica derivaba de proporciones repetidas y ritmos escalarmente consistentes (Ghyka, 1946, cap. VI). Javier Píoz retoma la fractalidad como clave estructural en la arquitectura biónica: sistemas vivos como tejidos o esponjas se organizan por agregación jerárquica de unidades, generando tramas porosas y eficientes. En arquitectura, la fractalidad permite construir sistemas que crecen, se adaptan y se optimizan manteniendo coherencia formal.

F.13 Proyecto para el barrio de Le Mirail en Toulouse. (George Candilis, 1960)



1.2 EL CARACTER MULTIDISCIPLINAR DE LA GEOMETRÍA. LENGUAJE GRÁFICO Y TESAURO DE ACCIONES

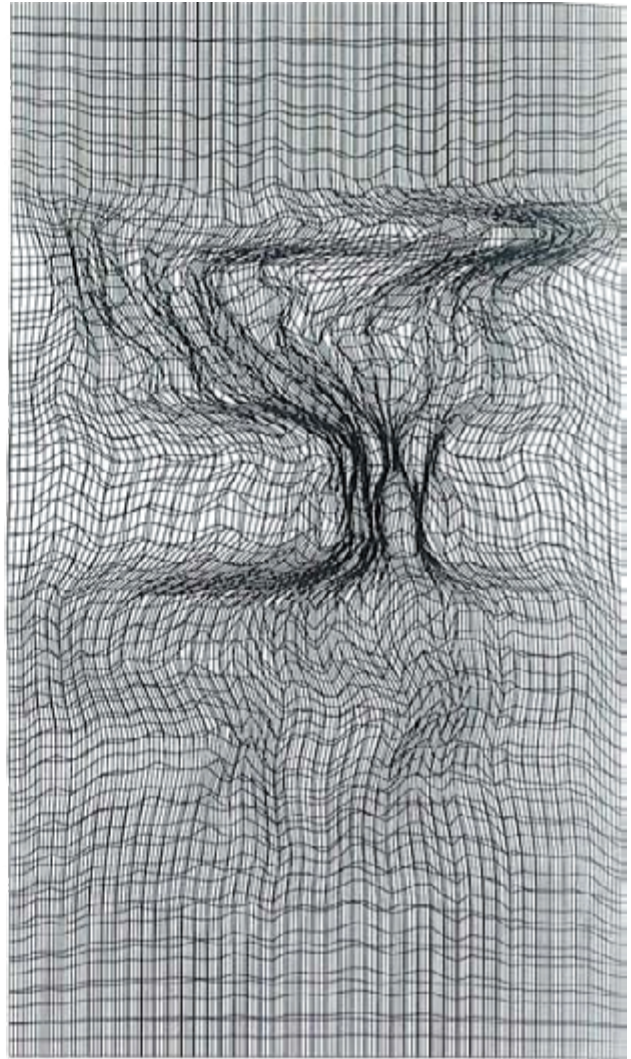
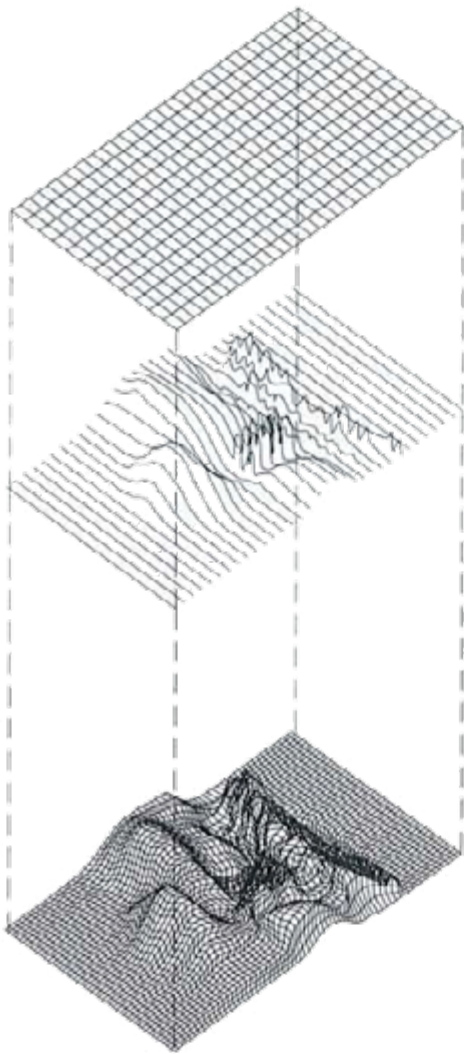
La arquitectura nace también del lenguaje

Diccionario híbrido: del léxico a la forma

La arquitectura, como disciplina proyectual, no puede desligarse del lenguaje. Las palabras no sólo nombran el mundo: lo estructuran, lo clasifican, lo hacen imaginable. En su Diccionario Híbrido, Javier Pioz propone una herramienta de pensamiento para arquitectos que supera la mera taxonomía de términos técnicos; se trata de un sistema conceptual donde cada palabra es una puerta a una lógica proyectual, una acción o una morfología. En este enfoque, el léxico deviene catalizador de formas, puente entre conocimiento y creación. En la cultura digital actual, esta concepción enlaza con el paradigma de la programación y el diseño por scripting: escribir instrucciones, operar con variables, desencadenar procesos. Así como el arquitecto computacional define algoritmos, el diseñador de lenguaje crea universos de sentido a partir de combinaciones léxicas.

Este vínculo entre palabra y forma se hace aún más evidente en el contexto contemporáneo de generación de imágenes mediante inteligencia artificial. Plataformas como Midjourney, Runway o los propios motores de generación de OpenAI permiten visualizar arquitecturas a partir de descripciones textuales complejas. La promptografía, entendida como el arte de redactar instrucciones precisas para obtener imágenes, vuelve a confirmar que nombrar es diseñar. El texto se convierte así en código generativo: un diccionario biónico donde cada verbo o sustantivo puede derivar en un conjunto de geometrías, atmósferas o sistemas materiales.

F.13 Diagrama de agregación por burbujas
(Peter Pearce, 1978)



Geometrías naturales según Pearce

En *Structure in Nature is a Strategy for Design*, Michael Pearce propone una clasificación morfológica de las geometrías presentes en la naturaleza, que sirve como base para el diseño arquitectónico inspirado en principios biónicos. Pearce distingue estructuras lineales (ramificaciones, haces, filamentos), superficies (membranas, láminas, epidermis), volúmenes (células, esferas, burbujas) y redes (entramados, estructuras reticuladas). Cada una de estas formas responde a una función precisa y se genera por una combinación de leyes físicas, limitaciones materiales y adaptaciones evolutivas.

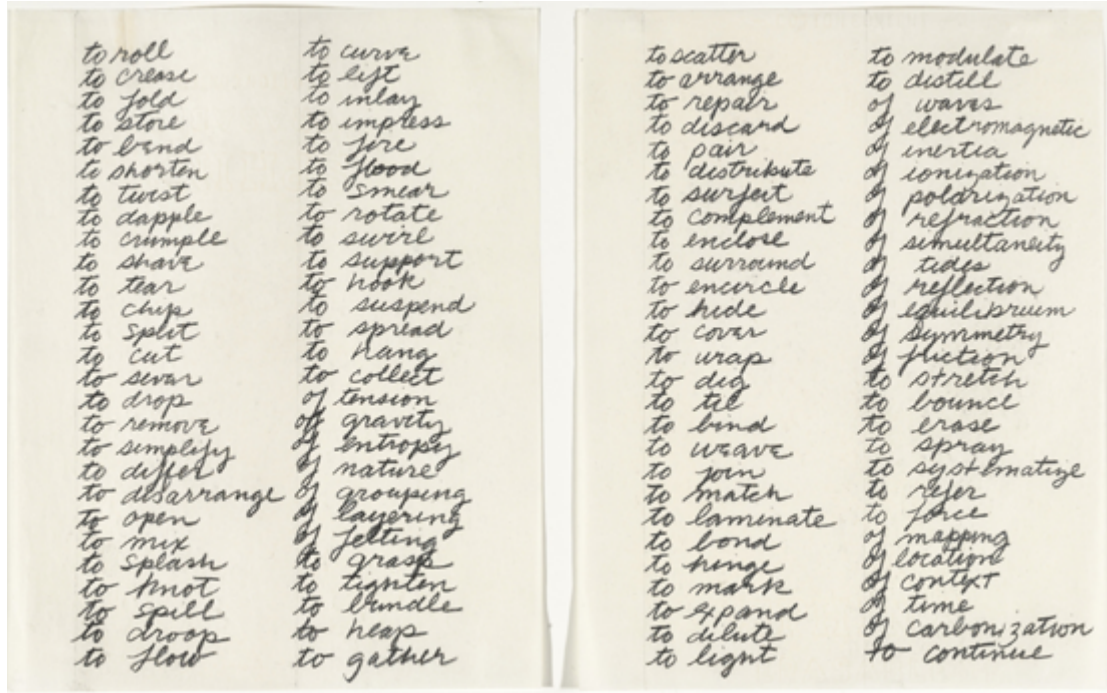
Estas categorías permiten identificar patrones replicables en el ámbito arquitectónico: sistemas estructurales porosos, envolventes tensadas, agrupaciones modulares, etc. Por ejemplo, las espumas celulares remiten a sistemas habitacionales eficientes, mientras que las redes ramificadas pueden inspirar infraestructuras o sistemas urbanos distribuidos. La mirada de Pearce convierte la geometría en un lenguaje operativo, donde cada tipo formal encarna una lógica de comportamiento. En este sentido, el vínculo entre taxonomía natural y diseño proyectual resulta no sólo inspirador, sino metodológicamente fértil.

Punto, línea y acción: Kandinsky, Lewitt, Serra

En *Punto y línea sobre el plano*, Vasili Kandinsky sistematiza los elementos básicos del lenguaje gráfico desde un enfoque sensible, casi musical. El punto, la línea y el plano no son simples elementos geométricos: poseen un carácter, una energía, una direccionalidad. Kandinsky propone una gramática visual donde la intensidad, la tensión y la vibración del trazo devienen en composición espacial. Esta mirada es fundamental para entender cómo la abstracción artística se convierte en laboratorio de formas aplicables a la arquitectura.

F.14 Diagrama para
la Biblioteca de IHEID
(Peter Eisenman, 1997)

Sol Lewitt lleva esta lógica un paso más allá, al considerar que una obra de arte puede consistir únicamente en la definición de una regla, una instrucción o una serie. En sus Wall Drawings,



Verbo	Geometría asociada	Aplicación arquitectónica
Tejer	Retícula / Red	Fachadas, estructuras tensadas, pavimentos
Doblar	Superficie curva / Plegada	Envolventes, cubiertas, paneles modulares
Perforar	Porosidad / Celularidad	Pantallas solares, filtros, sistemas de ventilación
Apilar	Estratificación / Capas	Organización modular, viviendas por agregación
Ramificar	Árbol / Sistema radial	Infraestructuras, circulación, redes energéticas
Enrollar	Espiral / Helicoide	Escaleras, recorridos, estructuras de compresión
Repetir	Módulo / Patrón	Prefabricación, replicabilidad, ornamentación
Palimpsesto	Superposición / Huella	Intervenciones sobre lo existente, capas históricas
Escalar	Superposición Auto-similaridad / Fractal	Arquitecturas adaptativas, escalas de intervención
Agregar	Cúmulo / Agregación celular	Sistemas porosos, agrupaciones espaciales

por ejemplo, el autor no realiza la obra, sino que deja un conjunto de indicaciones para que otros la ejecuten, a menudo en lugares distintos y de forma múltiple. Esta concepción del arte como sistema generativo está en línea directa con la programación contemporánea y con la lógica de las estructuras naturales: lo importante no es el objeto, sino el proceso que lo genera. “El concepto es el principio de la obra” (Lewitt, 1967).

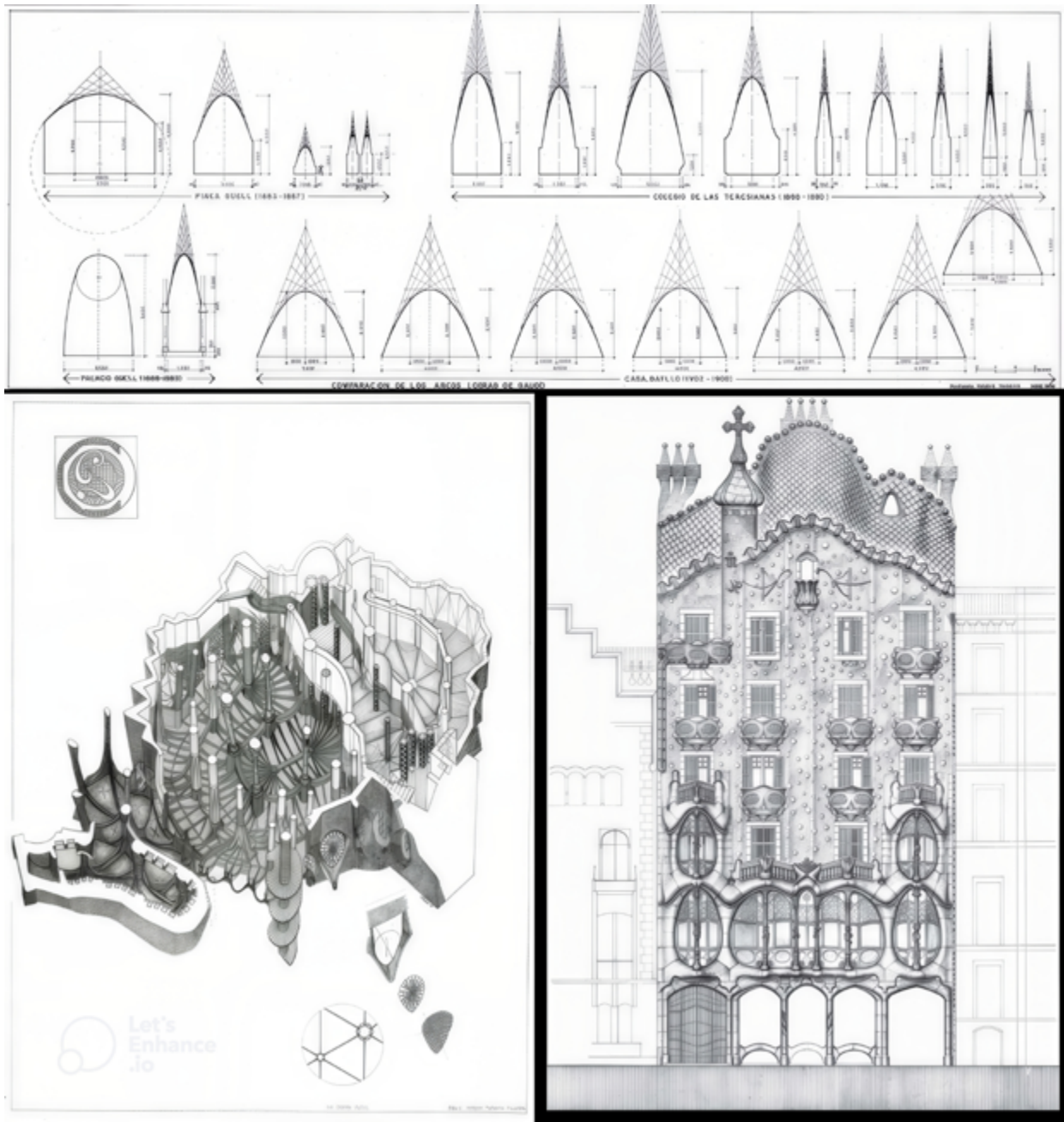
Por su parte, Richard Serra propone una lista de verbos de acción aplicables a materiales y procesos, como doblar, rasgar, enrollar, apilar, tensionar. Esta lista —aparentemente abierta e inacabada— funciona como un diccionario gestual desde el cual proyectar no objetos, sino interacciones, dinámicas y configuraciones. Su relación con la lógica natural es evidente: en biología, las formas no son estáticas, sino el resultado de acciones acumuladas en el tiempo.

Conclusión: hacia un tesoro proyectual biónico

Desde los sólidos platónicos hasta las células biológicas, las estructuras naturales ofrecen una gramática universal de la forma. Si aceptamos que proyectar es en parte nombrar, clasificar, organizar y operar, entonces un tesoro de términos puede convertirse en una potente herramienta de diseño. A continuación se presenta en la página izquierda contigua una tabla que sintetiza algunos verbos y sustantivos clave que, desde una mirada biónica, enlazan acciones naturales, geometrías elementales y posibilidades arquitectónicas.

F.15 Lista de verbos
(Richard Serra, 1967)

F.16 Tabla de verbos
biónicos
(Elaboración propia, 2025)



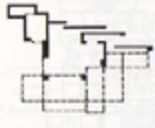

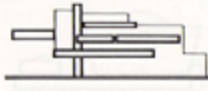
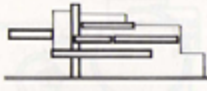


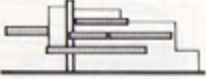
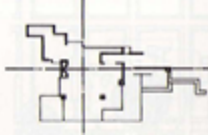
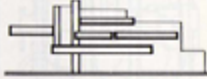
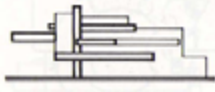


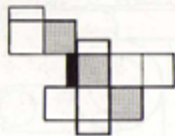
1.3 APRENDIENDO DE ANTONIO GAUDÍ Y FREI OTTO

Antoni Gaudí y Frei Otto comparten una forma de mirar la naturaleza que va más allá de la imitación formal. Sus obras no traducen figuras naturales, sino que asumen principios fundamentales de organización, crecimiento, eficiencia y adaptación. Esta mirada, que hoy podemos denominar biónica, se manifiesta como una actitud proyectual que les permitió concebir sistemas constructivos orgánicos, coherentes con las leyes físicas y energéticas del entorno. Ambos, cada uno desde su contexto histórico y técnico, anticiparon una manera de pensar la arquitectura como proceso antes que como forma, como sistema antes que como imagen. Este subcapítulo analiza cómo el trabajo de Gaudí y Otto encarna una lógica natural traducida en reglas geométricas, transformaciones materiales y experimentación estructural, abriendo el camino hacia lo que Patrik Schumacher define como “actitud paramétrica” en su reformulación del Parametricismo 2.0 (Schumacher, 2023).

El concepto de arquitectura orgánica según Bruno Zevi

Bruno Zevi definió la arquitectura orgánica no como un estilo, sino como una manera de entender el espacio arquitectónico desde la vida, la fluidez y el movimiento. Para Zevi, la verdadera arquitectura no es la que imita la naturaleza, sino la que comparte con ella los principios de continuidad, dinamismo y adecuación al entorno. “La arquitectura orgánica no representa la naturaleza: la reabsorbe” (Zevi, 1980, p. 2). Esta concepción implica estructuras abiertas, asimétricas, adaptables, que dan primacía al espacio interior y a la experiencia del habitante. En este sentido, Zevi reconoce en Gaudí a uno de los arquitectos más radicales de la modernidad, precisamente por su forma de trabajar el espacio como un organismo vivo, donde forma, estructura y función se

F.17 Dibujos sobre la
Capilla Güell
(Hiroya Tanaka, 1983)

 <p>ESTRUCTURA</p>	 <p>CIRCULACIÓN-ESPACIO USO</p>	 <p>UNIDAD-CONJUNTO</p>	 <p>ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN</p>	
 <p>ILUMINACIÓN NATURAL</p>	 <p>PLANTA-SECCIÓN</p>	 <p>REPETITIVO-SINGULAR</p>	 <p>SIMETRÍA Y EQUILIBRIO</p>	 <p>JERARQUÍA</p>
 <p>MASA</p>	 <p>GEOMETRÍA</p>	 <p>PARTI</p>	 <p>PARTI</p>	

integran sin jerarquía ni separación. La geometría de Gaudí, lejos de ser caprichosa, responde a una búsqueda de coherencia interna: sus superficies regladas, sus catenarias invertidas, sus sistemas de ramificación, no son gestos estéticos, sino respuestas estructurales y energéticas a problemas arquitectónicos concretos. Frei Otto, décadas más tarde, asumiría esta misma actitud, sustituyendo el ornamento por el comportamiento de los materiales, y la forma impuesta por la forma encontrada.

De la forma al comportamiento: Gaudí y las catenarias

Uno de los gestos más revolucionarios de Gaudí fue su decisión de trabajar con maquetas funiculares como método de cálculo estructural. Estas maquetas invertidas, construidas con cuerdas y pesos, permitían visualizar la forma que la gravedad misma generaría en condiciones ideales. En ellas, la forma no se dibuja: se revela. Este método, derivado de los estudios de Hooke y posteriormente utilizado por figuras del neogótico, encuentra en Gaudí una síntesis entre intuición formal y racionalidad física. Las catenarias utilizadas en la Sagrada Familia o la Cripta Güell no sólo optimizan la transmisión de cargas, sino que encarnan una visión natural de la estructura como equilibrio dinámico. En lugar de imponer geometrías abstractas, Gaudí permitía que las fuerzas “dibujaran” la forma más estable. Como señala Collins (1962), esta lógica conecta directamente con la tradición gótica, donde los arbotantes y bóvedas nervadas responden a una comprensión empírica de las fuerzas. Pero Gaudí lleva esta lógica a una dimensión casi matemática, integrando paraboloides, hiperboloides y helicoides como superficies regladas que permiten construir sin moldes, optimizando materiales y reduciendo complejidad constructiva (Burry & Burry, 2006).

Frei Otto y la experimentación con materia

La obra de Frei Otto se funda sobre un principio similar al de Gaudí: dejar que las fuerzas físicas determinen la forma. En lugar de diseñar la forma y luego calcular su viabilidad, Otto parte de modelos físicos —como películas de jabón o membranas tensadas— que revelan soluciones estructurales optimizadas. Esta actitud experimental le llevó a fundar el Instituto de Estructuras Ligeras (IL) en Stuttgart,

F.18 Análisis compositivo
en la obra de Frank Lloyd
Wright
(Roger H. Clark, 1996)



desde donde desarrolló sistemas tensoestructurales y neumáticos que revolucionaron la ingeniería arquitectónica del siglo XX. Proyectos como el Pabellón Alemán en la Expo de Montreal (1967) o el Estadio Olímpico de Múnich (1972) muestran cómo la forma arquitectónica puede emerger de la lógica del material. Como explica Otto, “no diseñamos la forma, buscamos la ley que la rige” (Otto, 2005, p. 34). Esta búsqueda lo aproxima a la tradición gótica y a la intuición estructural de Gaudí, pero también anticipa la lógica computacional contemporánea: sistemas que se adaptan, responden y evolucionan según condiciones externas e internas. Su influencia es visible en el trabajo de Achim Menges y otros investigadores que hoy exploran la materia como agente computacional.

Del organicismo moderno al Parametricismo 2.0

La relectura contemporánea de estas estrategias encuentra un marco teórico coherente en el Parametricismo 2.0, propuesto por Patrik Schumacher. Según el autor, la verdadera revolución no consiste en el uso de herramientas digitales, sino en el paso de una lógica de objetos fijos a una lógica de sistemas relacionales. En este sentido, Gaudí y Otto anticipan la actitud paramétrica porque trabajan con variables: fuerzas, materiales, condiciones del entorno. No diseñan formas, sino algoritmos implícitos de generación formal. Schumacher destaca que la arquitectura paramétrica debe ser entendida como un estilo performativo, donde cada elemento tiene sentido en función de su posición dentro del sistema (Schumacher, 2023). La actitud biónica de Gaudí y Otto se alinea con este pensamiento: ambos concebían la arquitectura como un organismo en evolución, no como una composición estática. En lugar de imponer una forma, dejaban que esta emergiera del comportamiento de los sistemas que la conforman. Este enfoque resuena con las tres dimensiones del Parametricismo 2.0: funcionalidad técnica (eficiencia estructural), funcionalidad social (adaptabilidad al usuario) e integración computacional (uso de modelos paramétricos como herramientas de diseño adaptativo).

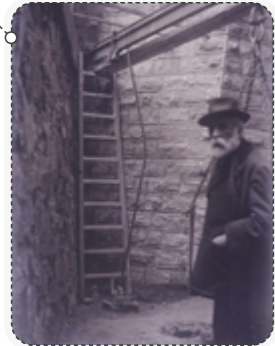
F.19 Frei Otto y sus colaboradores con una de las maquetas para el estadio Olímpico de Munich (Frei Otto, 1969)



Conclusión

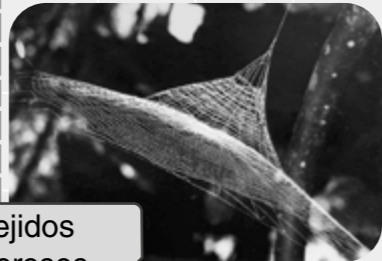
Tanto Gaudí como Otto representan una actitud proyectual profundamente contemporánea: observar, aprender y traducir los principios de la naturaleza en reglas geométricas, procesos materiales y sistemas constructivos. Su interés por las formas vivas no radica en su apariencia, sino en su lógica. Al trabajar con gravedad, tensión, crecimiento y eficiencia, desarrollaron métodos que anticipan los actuales sistemas generativos. Su obra, más allá del estilo, se convierte en un laboratorio de pensamiento biónico. Como señala Pioz (2013), la arquitectura del futuro no puede prescindir de estos principios si desea responder a las exigencias energéticas, materiales y sociales del presente. La lección de Gaudí y Otto no está en sus formas, sino en su manera de pensar: una arquitectura que, como los seres vivos, se adapta, se transforma y se optimiza.

Antonio Gaudí

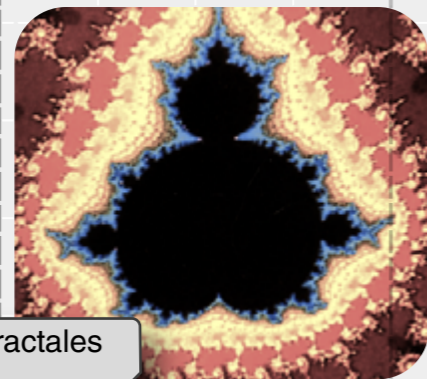


- 1852 - Nace en Reus, Tarragona. El contacto con la forja de su padre le acerca al trabajo en artesanía.
- 1869-78 - Estudia arquitectura en Barcelona y colabora como delineante para Joan Mantorell.
- 1878 - Se titula y participa en la Expo Universal de París. Entra en contacto con Eusebi Güell.
- 1883-88 - Etapa de **exploración mudéjar**. Realiza la Casa Vicens e inicia trabajos en la Finca Güell.
- 1889-94 - Comienza la **indagación en lo Neogótico**. Obras en Astorga y León, con especial hincapié en las curvas catenarias.
- 1898-1910 - Acercamiento al naturalismo. **Énfasis en geometrías regladas**: helicoides, parábolas, e hipérbolas.
 - 1898-1900: Casa Calvet
 - 1900-1914: Parque Güell
 - 1904-1906: Casa Batlló
 - 1906-1910: Casa Milà
- 1914 - Se instala en el taller del templo de la **Sagrada Familia**. Uso de maquetas de pesos colgados.
- 1926 - Fallece en Barcelona a causa de un atropello.

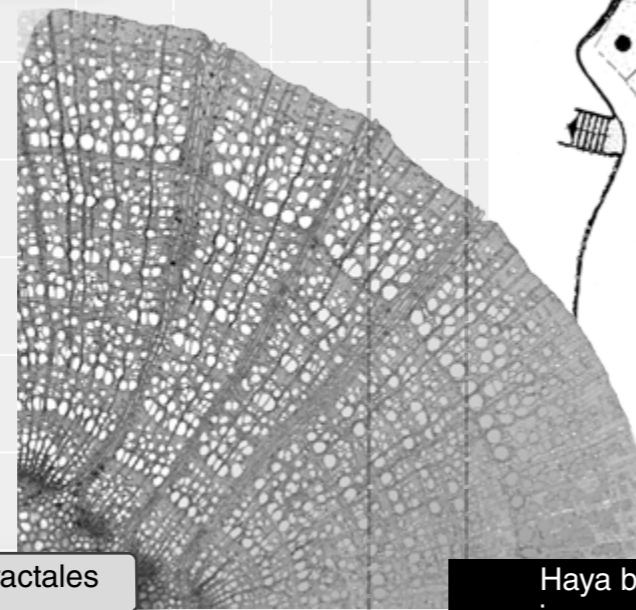
influencia natural



Tejidos porosos

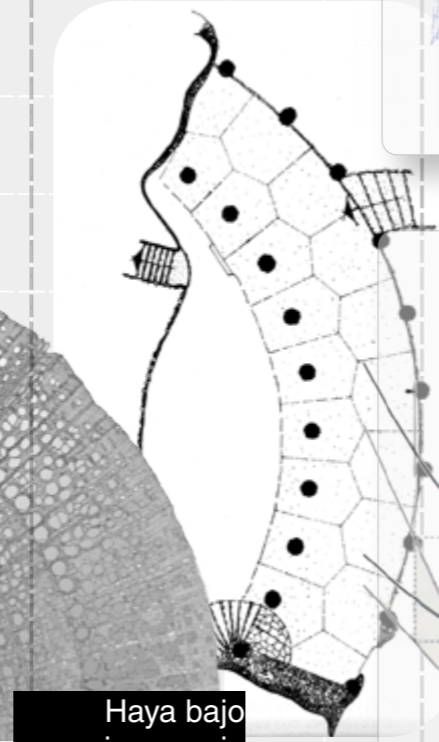
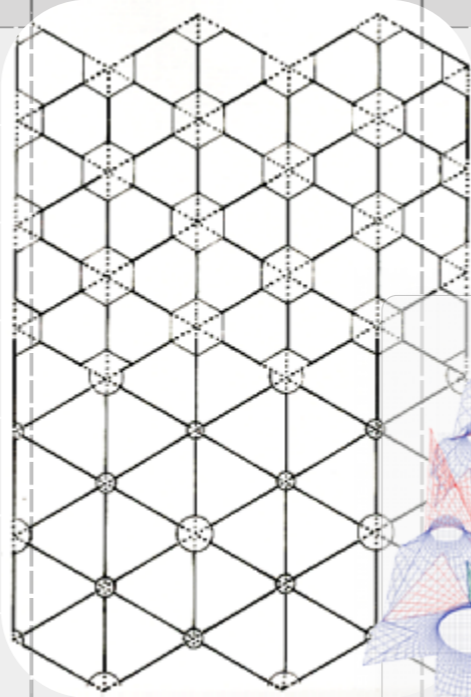


Fractales



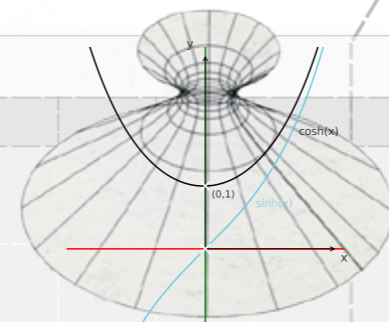
Fractales

aproximación gráfica

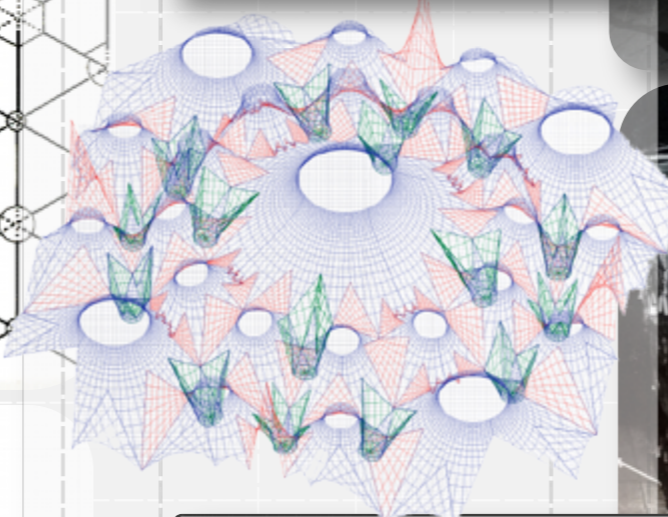


Haya bajo microscopio

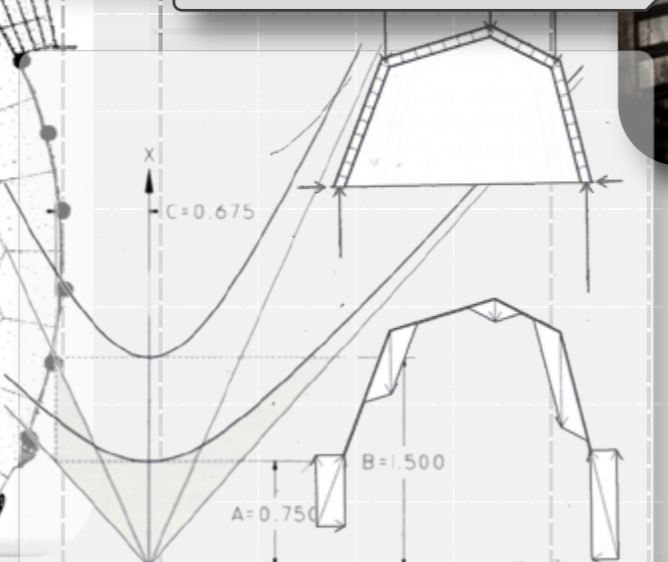
descripción matemática



curvas hiperbólicas

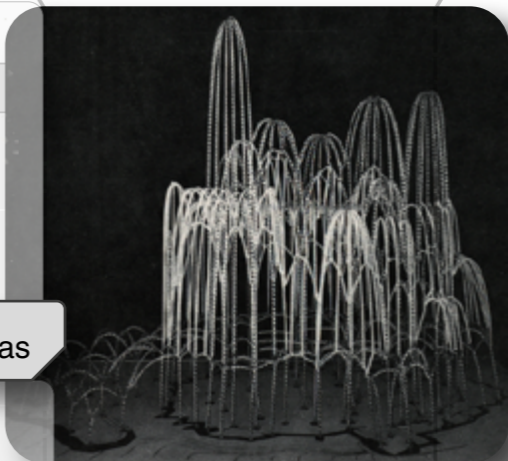


secciones cónicas

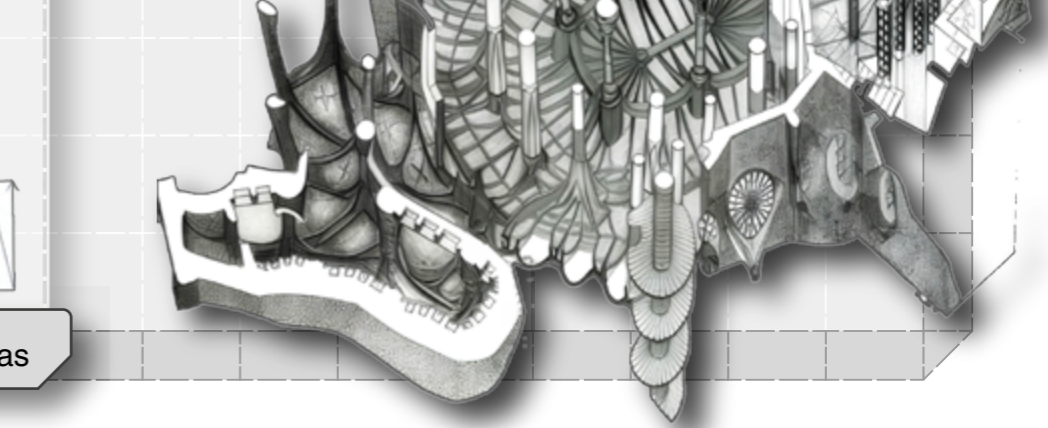


curvas catenarias

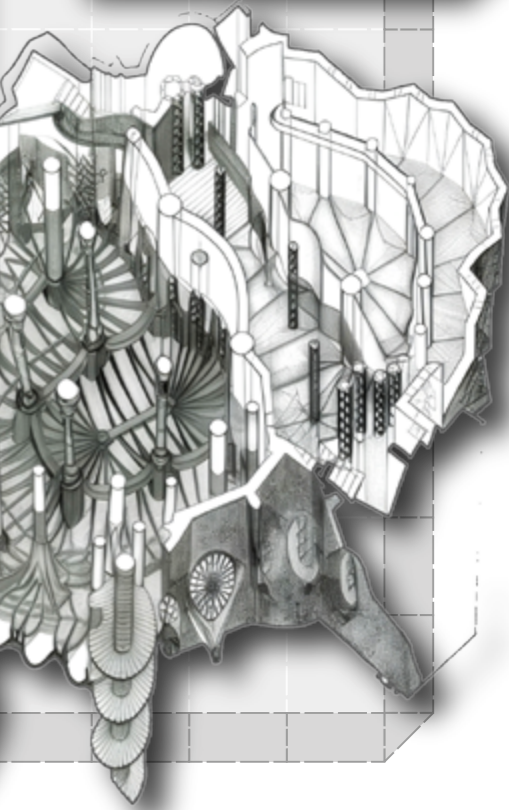
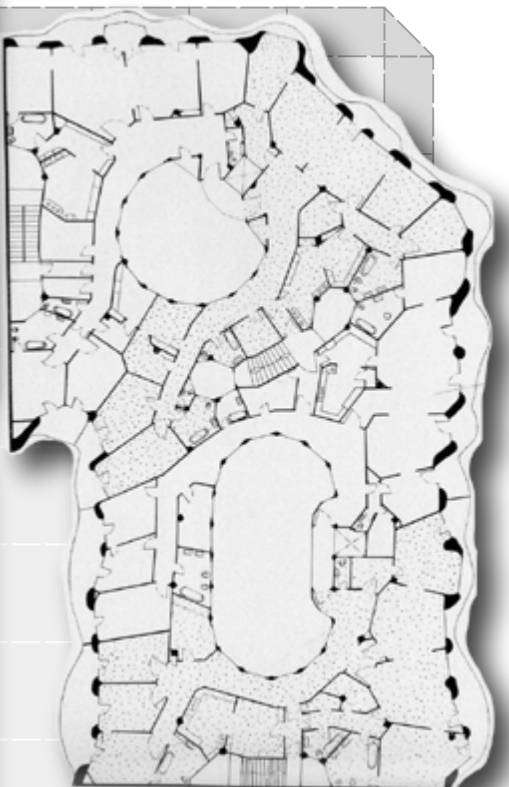
modelos y experimentos



Capilla Güell 1898-1914



arquitecturas



Frei Otto



- 1925 - Nace en Siegmarsdorf, Sajonia, República de Weimar.
- 1943-45 - Piloto en la Luftwaffe. Es tomado como P.D.G. en Francia.
- 1948-52 - Se forma como arquitecto en la T.U. de Berlín. Viaja a EE.UU.
- 1958 - Funda el **Instituto de Estructuras Ligeras** en la Universidad de Stuttgart.
- 1967 - Pabellón de Alemania en la **Expo de Montreal**, junto a Rolf Gutbrod.
- 1972 - Obra para el **Estadio Olímpico de Múnich**, junto a Günter Behnisch.
- 1980s - Colaboraciones con Büro Happold. Proyectos en Oriente Medio.
- 1990s - Consultor en concursos junto a Shigeru Ban, Toyo Ito o Norman Foster entre otros.
- 2015 - Fallecimiento y Pritzker póstumo.

influencia natural

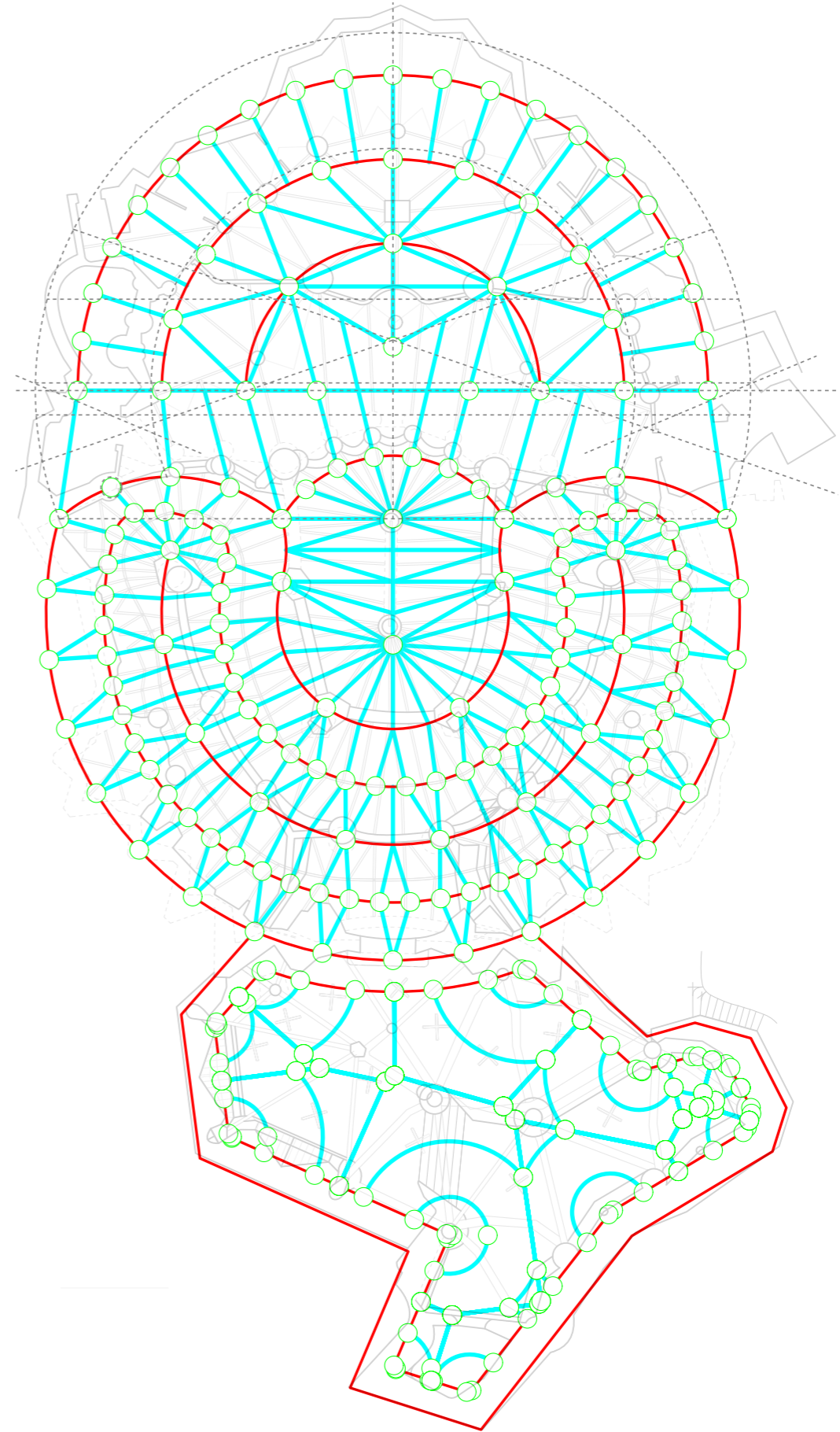
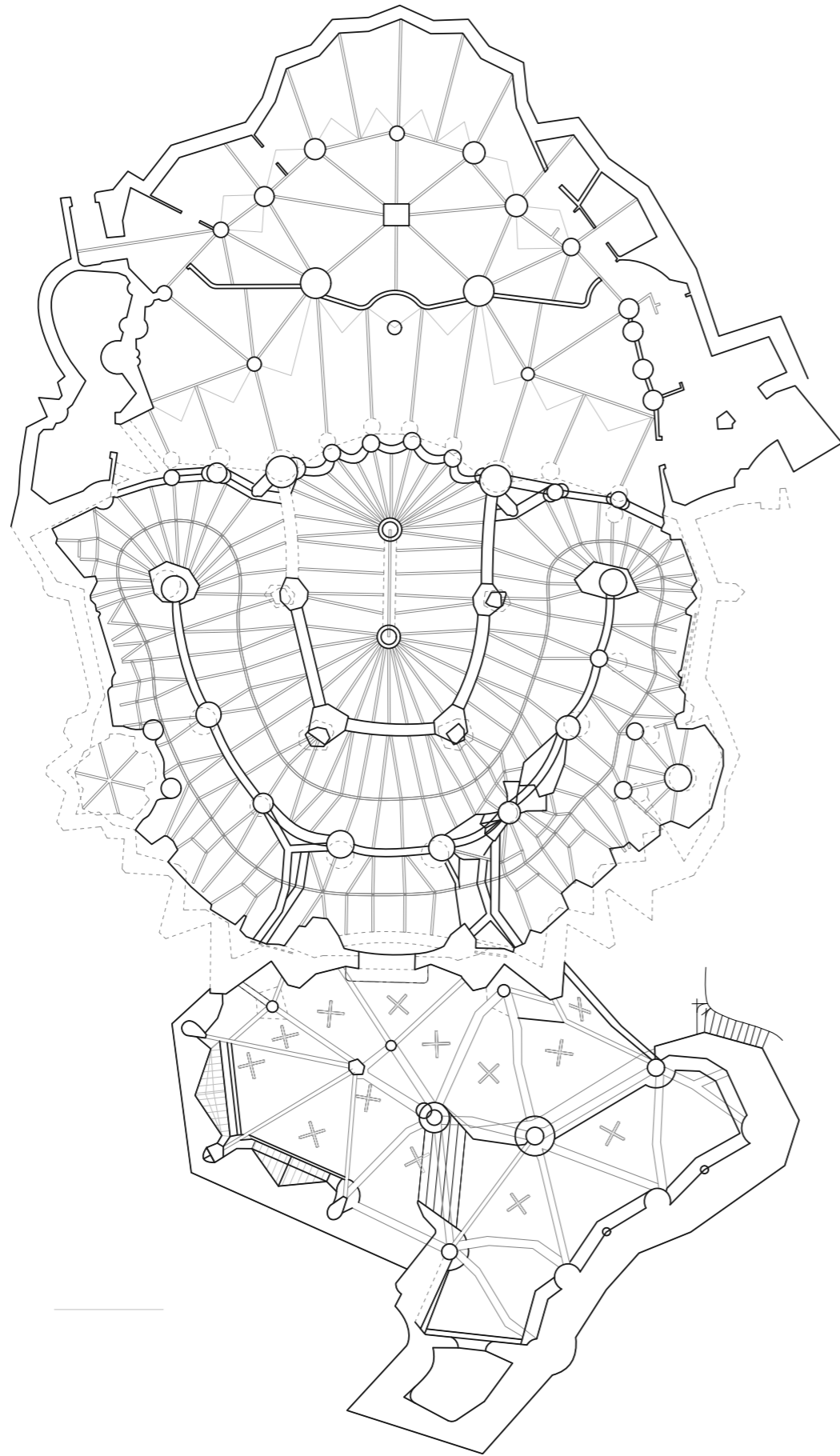
aproximación gráfica

descripción matemática

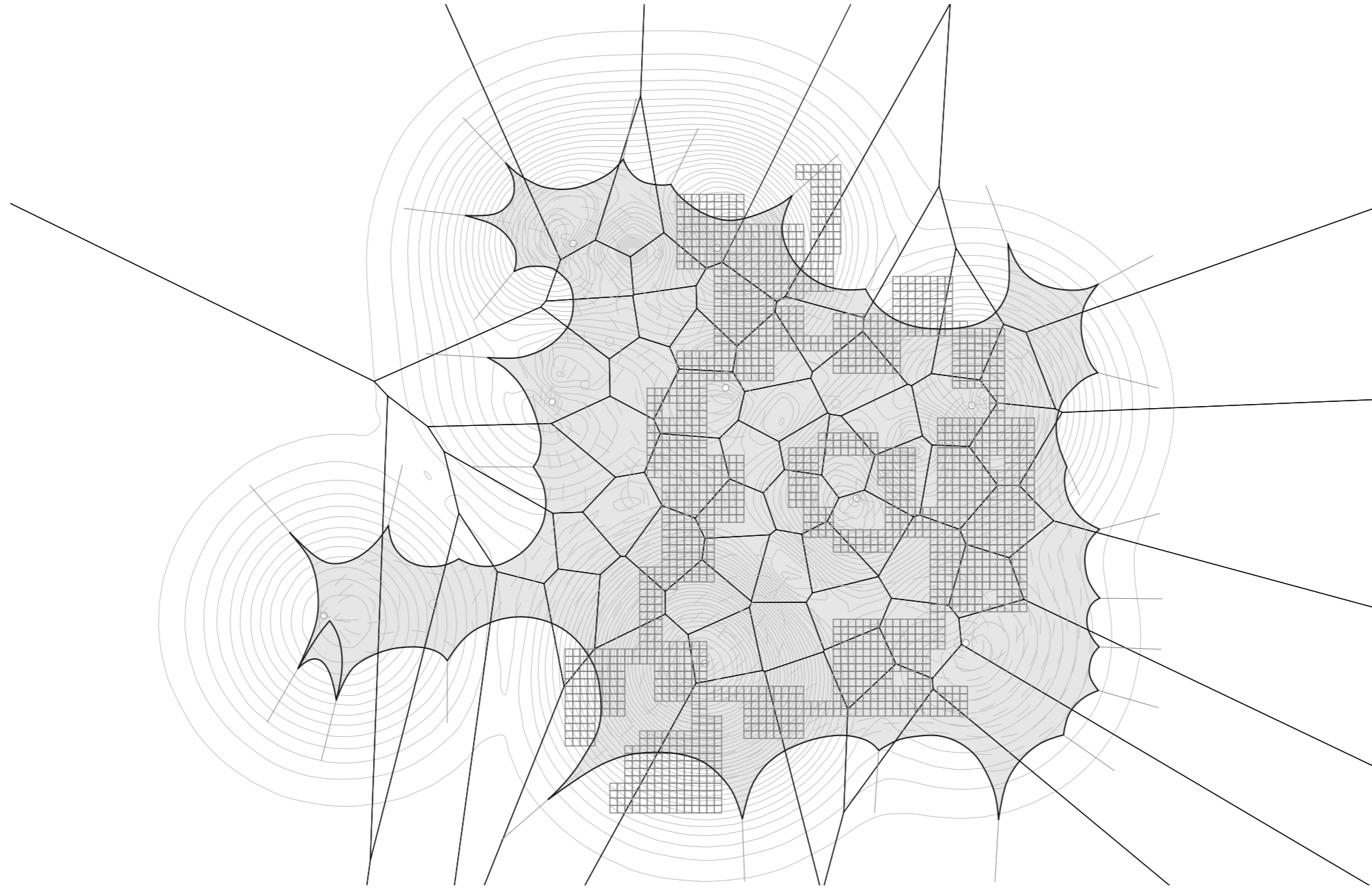
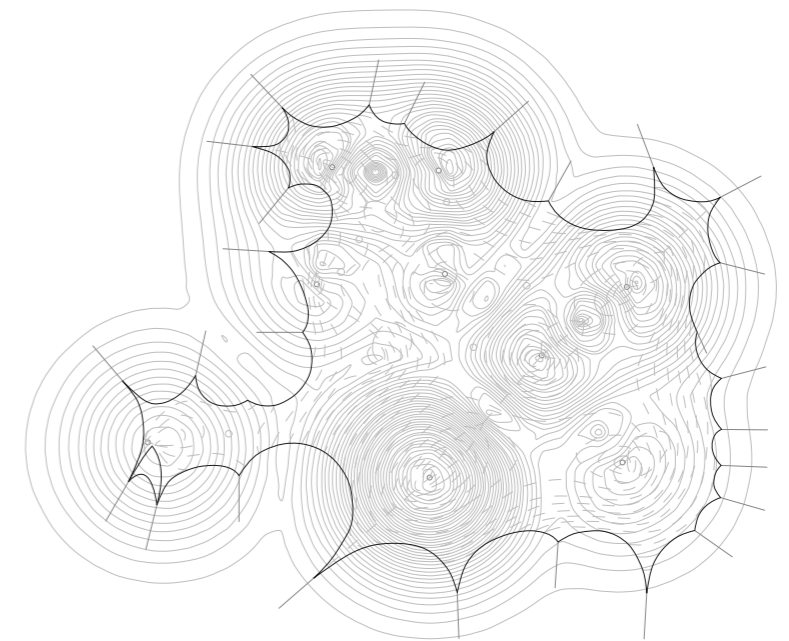
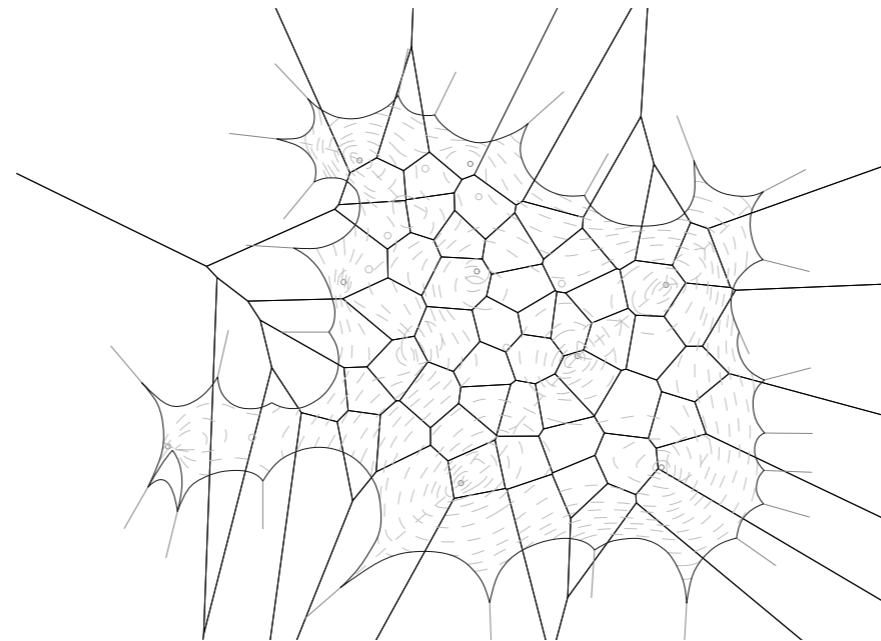
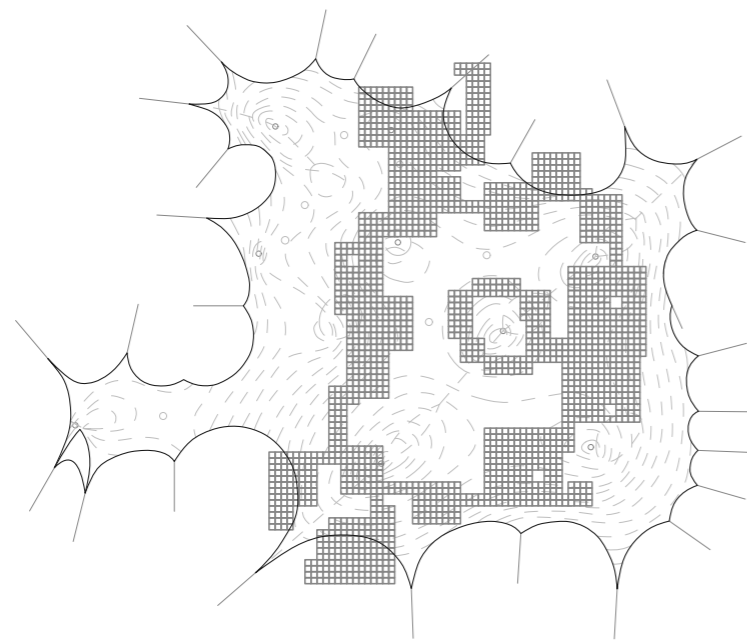
modelos y experimentos

arquitecturas

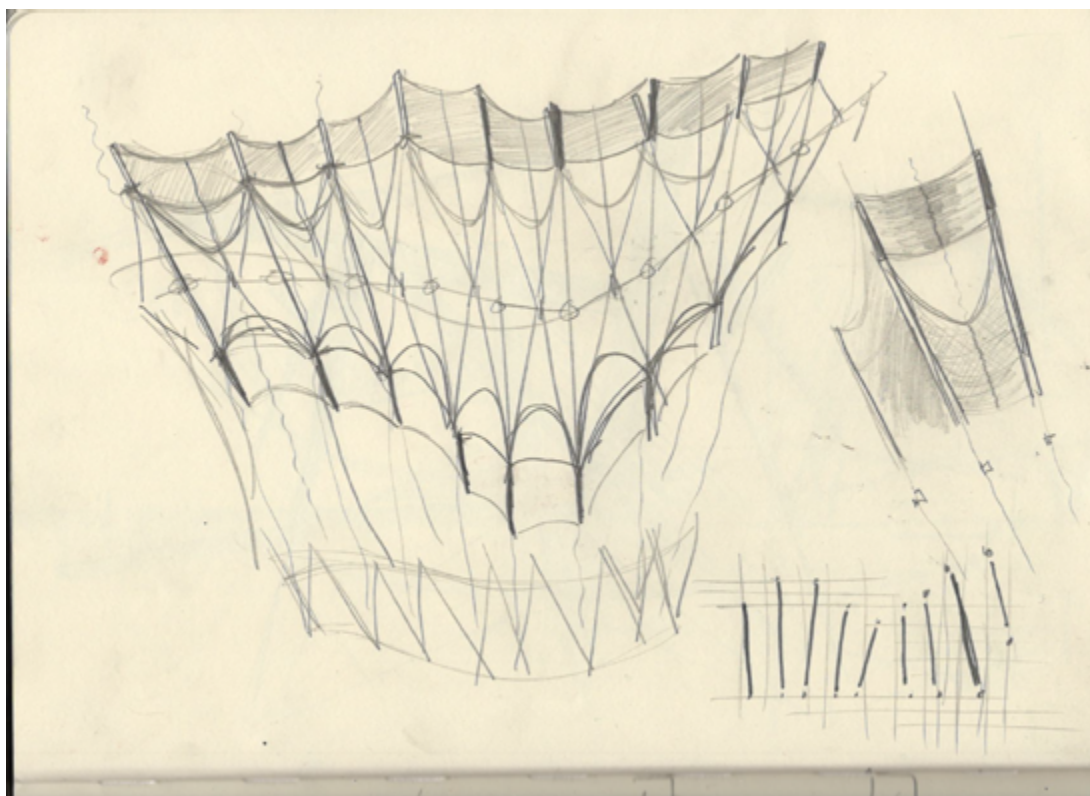
DECODIFICACIÓN: CAPILLA GÜELL 1889-1915



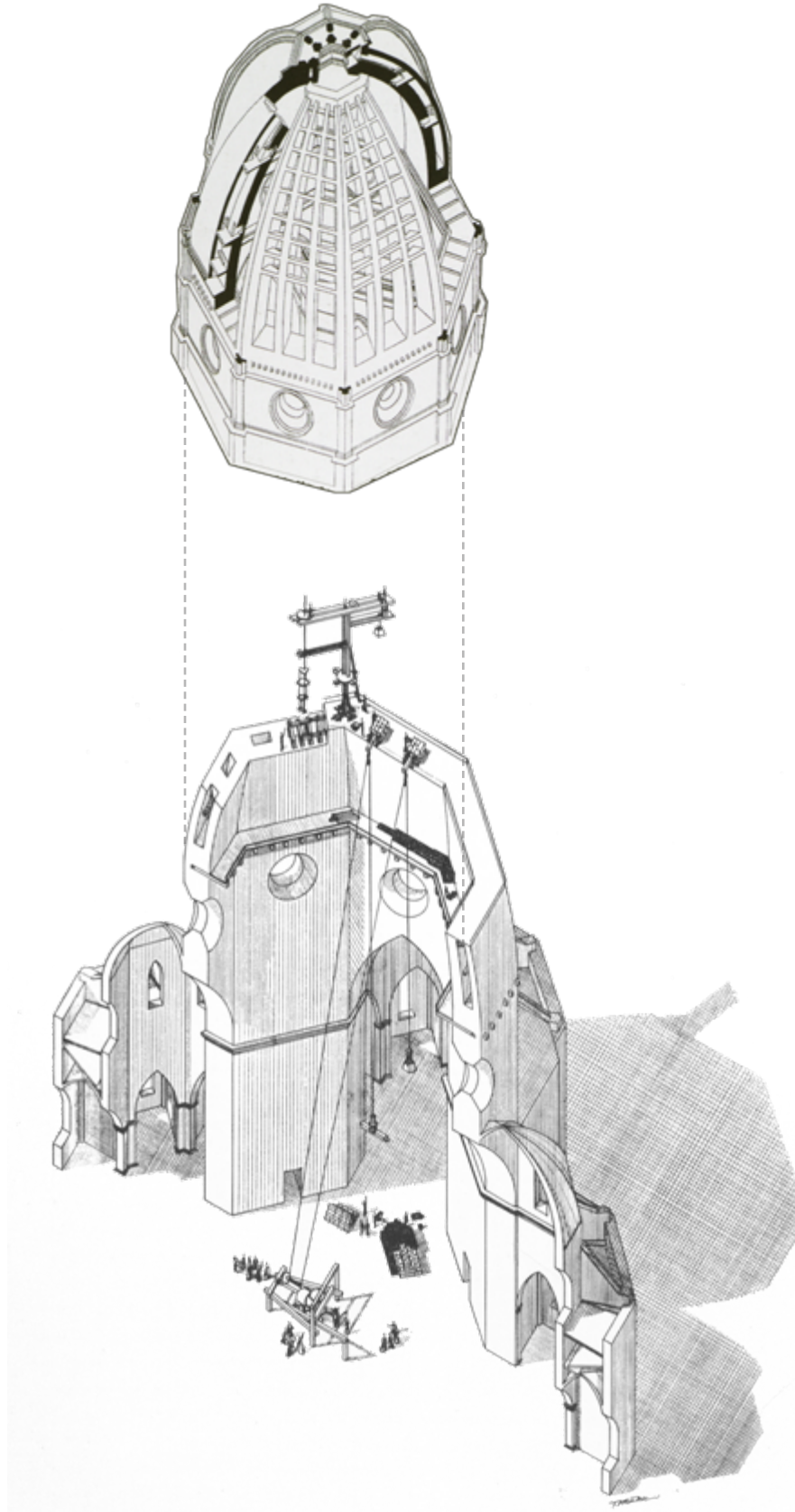
• DECODIFICACIÓN: PABELLÓN DE MONTREAL '67



F.21 Estudio sobre estructuras tensadas
(Elaboración propia, 2023)



2 GEOMETRÍA PARA GENERAR



2.1. EL PARADIGMA 4.0. DEL COMPÁS AL ALGORITMO

Las herramientas condicionan el lenguaje, y el lenguaje configura el tapiz de resultados.

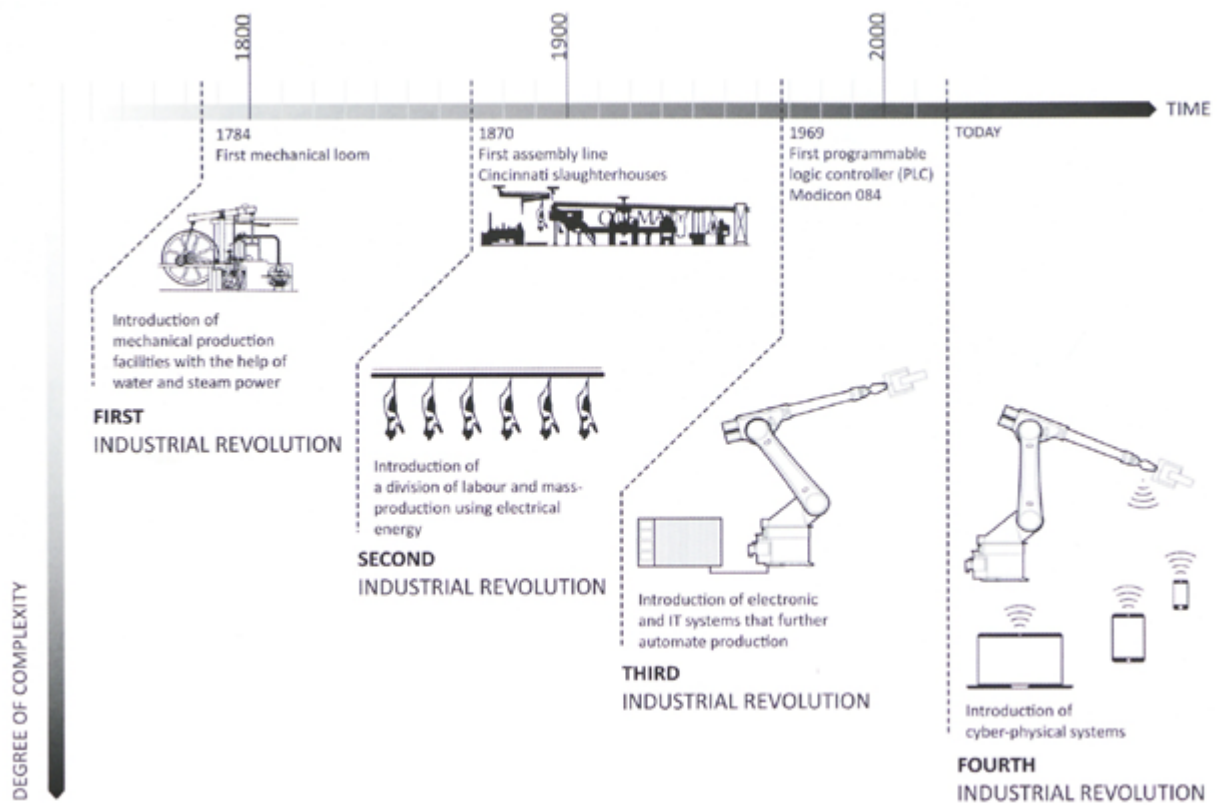
La creatividad de arquitectos tardo-medievales como Brunelleschi a la hora de afrontar concurso, ingeniería y proceso constructivo denotan la importancia que el ambiente tecnológico y artístico del momento impregna en la manera de resolver. Hoy, 500 años después de los trabajos, la cúpula de Santa Maria del Fiore sigue siendo estudiada en las escuelas occidentales de arquitectura.

Volviendo la vista atrás podríamos remontar la revolución de la imprenta de Gutenberg como uno de los hitos más señalados en lo que ha representado, editorial y reproducción de información gráfica se refiere. La incorporación de la perspectiva cónica y la proyección de planos mediante planta, alzados y secciones son fenómenos cuyas consecuencias son patentes hasta el día de hoy en la manera en que los seres humanos tenemos de imaginar, visualizar y engendrar procesos de diseño.

La arquitectura y sus herramientas como huella de época

La arquitectura ha evolucionado históricamente al ritmo de sus instrumentos de representación. Del compás al algoritmo, las herramientas no solo determinan cómo se dibuja, sino cómo se piensa, proyecta y construye. Esta transformación epistemológica ha implicado una mutación en los sistemas de conocimiento y

F.22 Dibujos sobre el proceso constructivo de la cúpula de Brunelleschi (*Giovanni y Michele Fanelli, 1898*)



producción arquitectónica. Como apuntan Antoine Picon y Mario Carpo, la arquitectura no puede desvincularse de su contexto técnico-cultural. Picon remarca que los modos de diseñar responden a estructuras sociales y tecnológicas cambiantes, como ya ocurrió con la imprenta y la geometría proyectiva durante el Renacimiento (Picon, 2010, pp. 11–14). Carpo, por su parte, traza una genealogía desde el sistema de notación y escala helenístico, pasando por el Renacimiento y el Humanismo, hasta el giro algorítmico contemporáneo (Carpo, 2011, pp. 17–23).

Esta transición ha marcado momentos clave en la autoría proyectual: de la figura del maestro constructor gótico a la separación entre autor de obra y autor de diseño en Alberti. Hoy, el entorno digital reformula la práctica nuevamente, diluyendo el rol autoral y dando paso a una inteligencia distribuida en la que intervienen arquitectos, algoritmos y comunidades de código abierto. La comunidad Food4Rhino o los desarrollos colaborativos en Grasshopper ilustran cómo las herramientas digitales activan una lógica de diseño compartida, personalizable y procesual.

Genealogía digital: de la cibernética al diseño computacional

La Segunda Guerra Mundial marcó el nacimiento de la cibernética, con Norbert Wiener al frente. Su principio de retroalimentación influyó directamente en el diseño, proponiendo arquitecturas reactivas y adaptativas. Experimentos como el Fun Palace de Cedric Price o el trabajo de Nicholas Negroponte en el MIT introdujeron el ordenador como agente epistémico en el diseño. A pesar de que estos planteamientos no cuajaron del todo como corrientes transformadoras, sí dejaron una huella conceptual duradera.

El verdadero cambio se consolidó en los años 90, cuando entornos

F.23 Diagrama sobre las revoluciones industriales (*Achim Menges, 2015*)



como el Columbia Paperless Studio y herramientas de modelado 3D permitieron manipular geometrías complejas. Lo que surgió no fue una arquitectura cibernética, sino una revolución paramétrica basada en entornos visuales y geometría spline. Como apunta Carpo, este giro trasladó el centro del diseño desde el control retroalimentado hacia la exploración formal a través de datos y relaciones (Carpo, 2016).

Del diseño paramétrico al algoritmo autónomo

El parametricismo inicial permitía definir variables para que el software generara soluciones dentro de límites dados. Sin embargo, el segundo giro digital introduce algoritmos adaptativos, aprendizaje automático y cloud computing. Herramientas como Google Colab, GitHub Copilot o Runway ML ejemplifican esta transición hacia un ecosistema de diseño autogenerativo. El arquitecto se convierte así en un curador de sistemas más que en un dibujante de formas. La actitud paramétrica deviene en una lógica generativa: no se busca representar, sino encontrar formas emergentes.

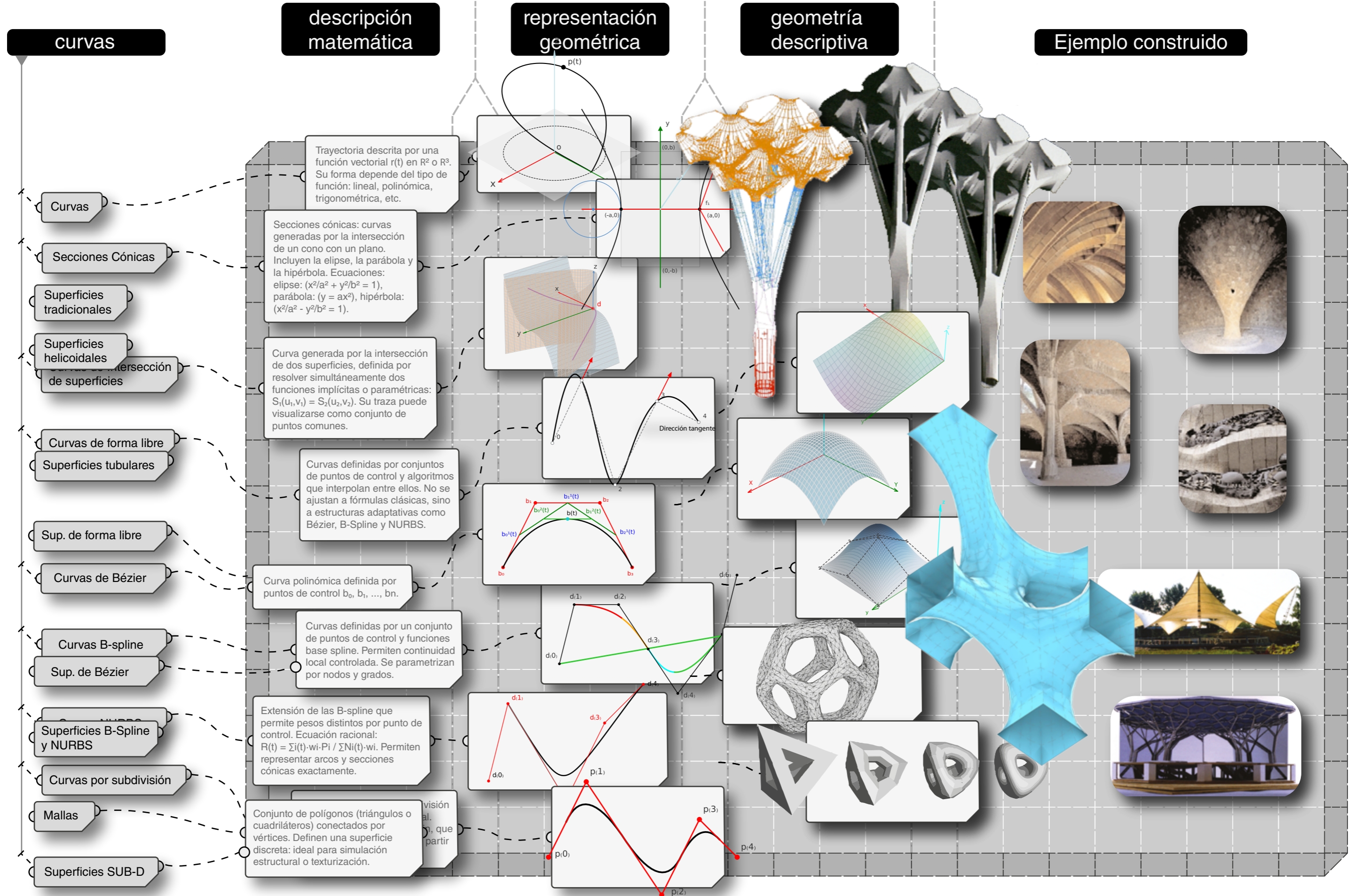
Esta lógica se fundamenta en una estructura de datos y procesos capaz de integrar restricciones físicas, simulaciones, inputs ambientales o comportamiento de materiales. La personalización masiva, el diseño iterativo y el control numérico dibujan el nuevo territorio de la producción proyectual. La geometría ya no se concibe como forma, sino como sistema.

Conclusión

El paso del compás al algoritmo revela una transformación profunda en la naturaleza del proyecto arquitectónico. El diseño ya no es un producto acabado sino un proceso parametrizado, sensible al cambio y programable. Esta lógica relacional, anticipada por figuras como Alberti y radicalizada por la digitalización, ha llevado al arquitecto a repensar su rol, sus herramientas y sus modos de creación.

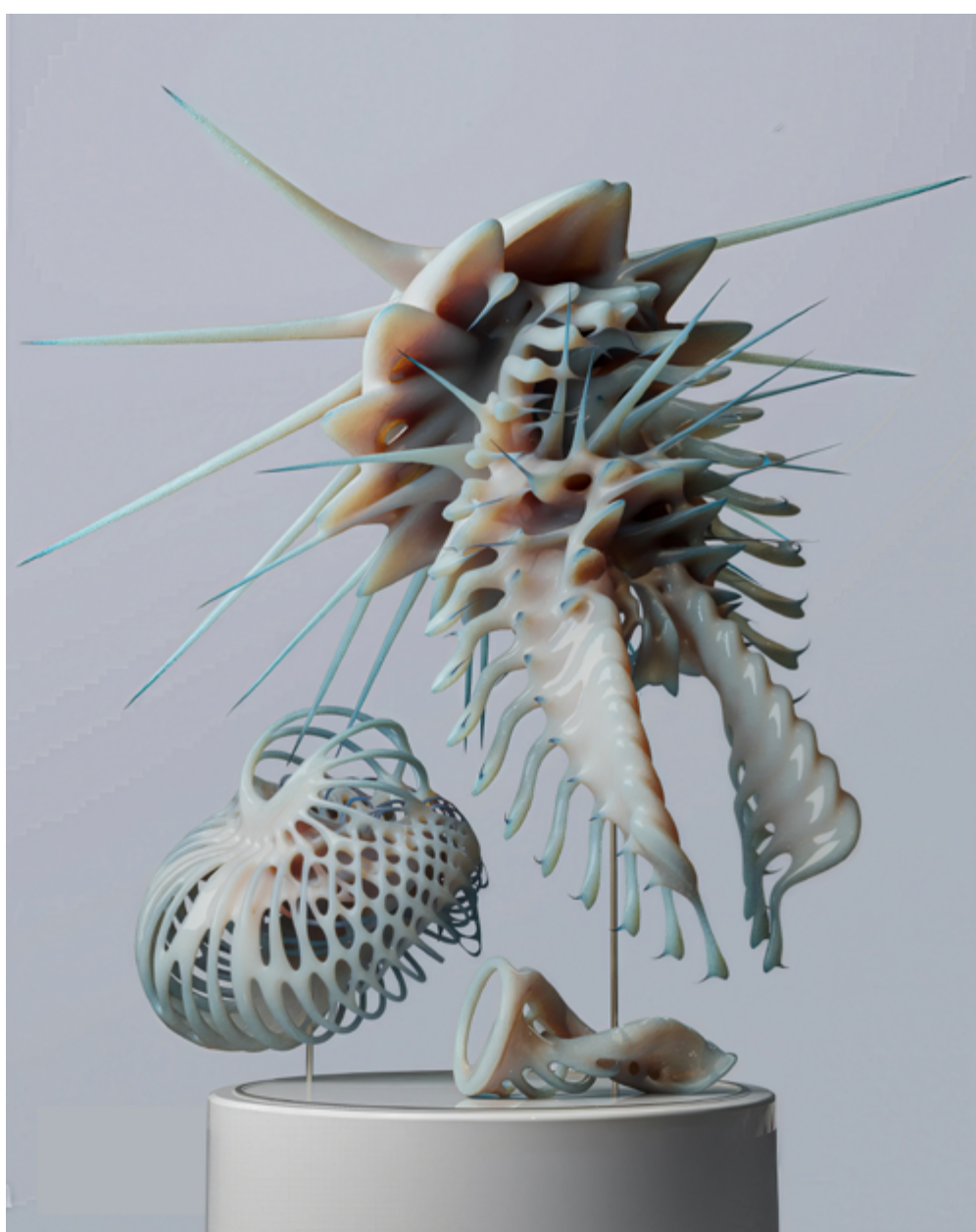
En el siguiente capítulo, se abordarán los procesos de profesionalización en el contexto geopolítico del diseño digital,

F.24 Manufacturing 14, serie de fotografías de China (Edward Burtynsky, 2005)



Caso: Gaudí

Caso: Otto

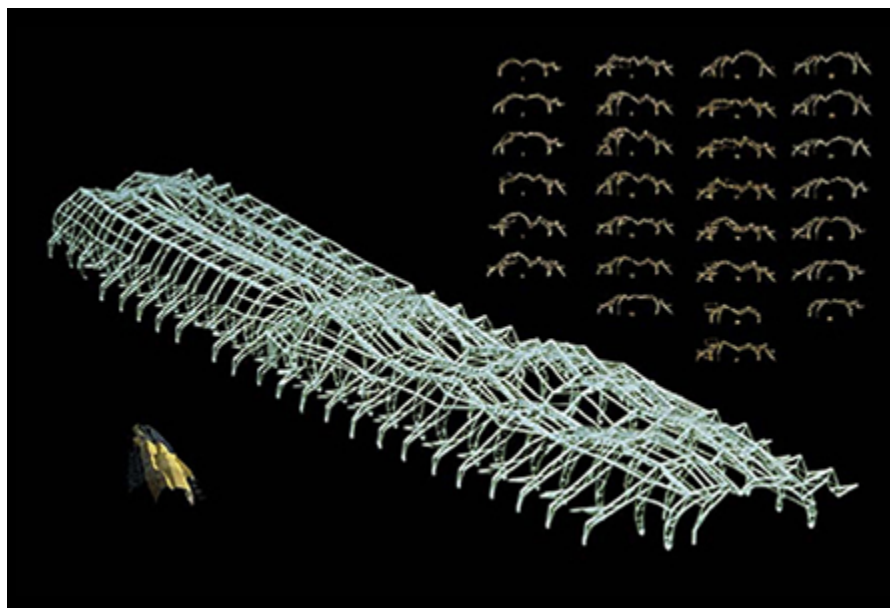


2.2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES Y SUS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Herramientas digitales: del dibujo a los datos

La evolución de las herramientas digitales ha transformado radicalmente los modos de representación y producción arquitectónica. La transición del CAD (Computer-Aided Design) al BIM (Building Information Modeling) no solo implicó un cambio de formato, sino una redefinición del proyecto como base de datos interrelacionados. Mientras el CAD ofrecía líneas, capas y bloques en un entorno bidimensional o tridimensional estático, el BIM introduce parámetros, atributos, reglas y jerarquías que permiten pensar el edificio como un sistema.

Este salto se ve complementado por el desarrollo de entornos de programación visual, como Grasshopper para Rhino, que permiten manipular geometrías complejas mediante algoritmos visuales. Estas plataformas fomentan una lógica de diseño generativo basada en variables y condiciones modificables, abriendo paso a procesos de diseño iterativos, responsivos y adaptativos. Además, el ecosistema de plugins, como Kangaroo (física), Galapagos (optimización), Karamba (análisis estructural) o Ladybug (análisis ambiental), convierte a estos entornos en auténticos laboratorios de diseño. El valor de estas herramientas se ve amplificado por la cultura de comunidad abierta: foros, repositorios, tutoriales y paquetes compartidos por usuarios, que convierten a los propios diseñadores en desarrolladores activos de su entorno técnico, construyendo una cultura proyectual distribuida, cooperativa y en constante evolución.



Geometría computacional: curvas y superficies complejas

La geometría computacional se convierte en la base operativa de estos entornos, permitiendo el diseño, manipulación y fabricación de formas complejas. En *Architectural Geometry* (Pottmann et al., 2007) se establece una clasificación rigurosa de curvas y superficies, útil tanto para el modelado como para el análisis geométrico. Entre las curvas más relevantes se encuentran las curvas Bézier, B-Spline y NURBS, todas ellas definidas por puntos de control que permiten generar trazados suaves y ajustables. Las NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) son particularmente potentes por su capacidad para representar con precisión tanto geometrías analíticas (círculos, elipses) como formas libres.

Las superficies complejas pueden clasificarse según su origen geométrico. Las superficies de revolución se generan girando un perfil alrededor de un eje; las superficies de traslación, por el desplazamiento de un perfil a lo largo de una trayectoria; las helicoidales, mediante una combinación de rotación y traslación; y las regladas, que se definen por el desplazamiento de una recta. A estas se suman las geometrías de malla: triangulares, más aptas para subdivisión y cálculo, y cuadrangulares, útiles en procesos de panelización. Más allá de su morfología, estas superficies permiten controlar la densidad de información, la segmentación para fabricación, y la definición precisa de bordes y tangencias, claves en diseño computacional y fabricación digital.

Procedimientos algorítmicos y generación de forma

La arquitectura computacional incorpora metodologías algorítmicas que permiten no sólo modelar formas, sino generarlas según reglas estructurales. Conceptos como los L-Systems (sistemas de Lindenmayer), que simulan patrones de crecimiento vegetal mediante reglas recursivas, o los autómatas celulares, que desarrollan configuraciones espaciales a partir de estados iniciales simples, introducen dinámicas de generación basadas en comportamiento. Estas herramientas permiten pensar la forma como

F.26 Propuesta para la terminal portuaria de Yokohama (Reiser+Umemoto, 1995)

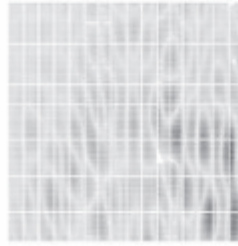
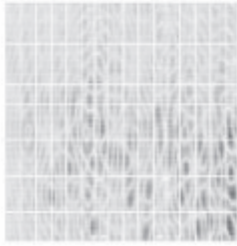
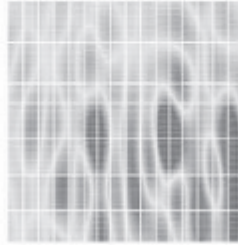
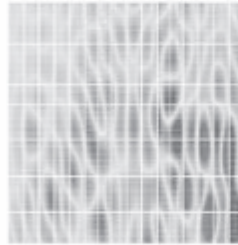
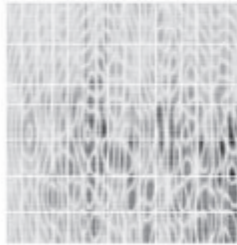
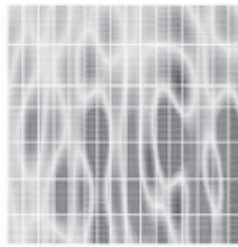
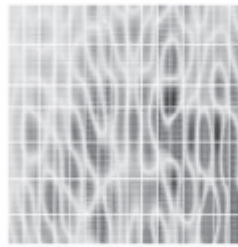
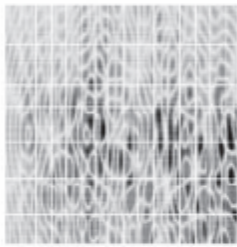
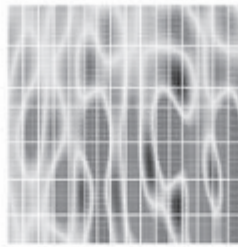
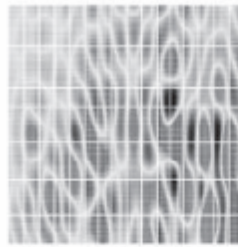
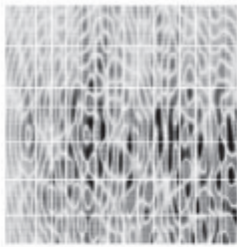
DESIGNING

DESIGN USTRY

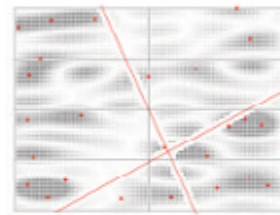
ASSEMBLY

53

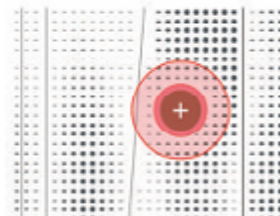
MARCUS



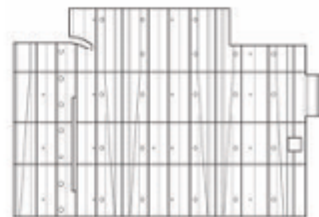
Perforations intensify at attractor locations



Pattern adjusts to panel joints and bend lines



Perforations respond to light and sprinkler cut-outs



Points and steel substructure grid

consecuencia de un proceso más que como una decisión arbitraria.

Otros procedimientos como las superficies mínimas (generadas a partir de tensiones equilibradas, como en las películas de jabón), los modelos catenarios (estructuras autoportantes invertidas), o la recursión estocástica (variante aleatoria de procesos generativos) permiten formular modelos formales inspirados directamente en la naturaleza. Aquí se manifiesta un vínculo explícito con el tesoro de acciones del capítulo 1.2: ramificar, agregar, tensar, plegar, perforar. Cada procedimiento computacional corresponde a un principio natural que puede ser sistematizado. En este contexto, la arquitectura se convierte en una disciplina que opera desde sistemas de reglas: cadenas lógicas que permiten explorar múltiples soluciones ante una misma condición proyectual, siguiendo el modelo de comportamiento adaptativo de los organismos vivos (The New Mathematics of Architecture, Burry & Burry, 2010).

Optimización, análisis y rendimiento

El diseño computacional no se limita a la generación de formas, sino que introduce herramientas de análisis que permiten evaluar su comportamiento estructural, energético o funcional. Este enfoque requiere pensar en términos de rendimiento y no de apariencia. Plugins como Karamba para análisis estructural o Ladybug/Honeybee para simulación ambiental permiten anticipar cómo responderá un diseño antes de construirlo. En estos procesos, la iteración es un concepto central: el proyecto ya no es una figura fija, sino una serie de pruebas ajustadas en ciclos sucesivos, donde cada paso incorpora retroalimentación técnica.

Este pensamiento iterativo se amplifica con la noción de digital twin, o gemelo digital: una réplica virtual del objeto arquitectónico que simula en tiempo real su comportamiento. En estos entornos, el diseño se convierte en un proceso de negociación entre geometría, materia, estructura y ambiente. Esta lógica devuelve protagonismo al material, que deja de ser mero soporte para convertirse en agente de forma. Así, el diseño se convierte en una coreografía de parámetros, donde los datos físicos y las reglas

F.27 Panelizado para centro de estudiantes Toni Stabile (*Marble Fairbanks*)



digitales se entrelazan en la búsqueda de un equilibrio dinámico.

Topología: continuidad, fluidez y deformación espacial

Frente a la geometría clásica, que prioriza la medida, la topología introduce una lógica de continuidad y transformación. Esta disciplina estudia las propiedades que permanecen invariantes ante deformaciones suaves: estiramientos, torsiones, plegamientos. En arquitectura, esta lógica permite trabajar con espacios no cartesianos, continuos, fluidos, donde el límite entre interior y exterior, estructura y piel, superficie y volumen se disuelve.

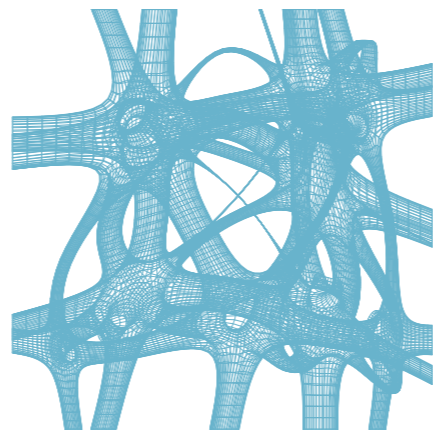
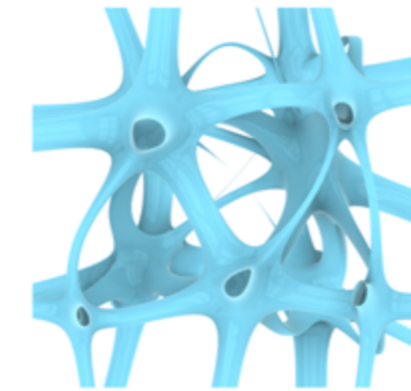
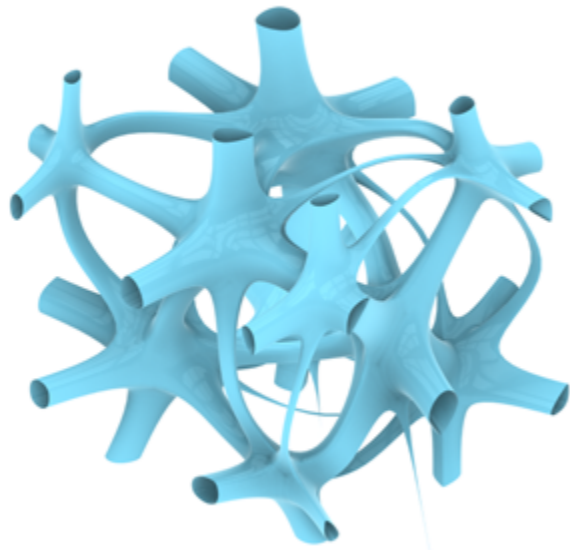
Plugins como Topos (Grasshopper) permiten explorar estas condiciones desde la lógica de la optimización topológica, generando piezas estructurales que eliminan materia innecesaria para obtener formas más ligeras y eficientes. La topología no define figuras, sino relaciones: conecta puntos, traza trayectorias, construye campos de tensiones. En este sentido, la topología no solo es una herramienta formal, sino conceptual: invita a pensar la arquitectura como un sistema de interdependencias, donde la forma final es el resultado de múltiples condicionantes. Las imágenes que acompañan este apartado muestran una exploración proyectual sobre una pieza estructural de madera, donde los arcos y vacíos responden a un cálculo preciso de cargas y esfuerzos.

Visualización, datos y multiescalaridad

En la era del Big Data, la arquitectura se enfrenta al desafío de gestionar, representar e interpretar grandes cantidades de información. La visualización de datos se convierte en una herramienta fundamental, no solo para comunicar resultados, sino para construir nuevas formas de conocimiento proyectual. Equipos como AKT II integran análisis de datos, modelado paramétrico y simulaciones para resolver proyectos complejos desde una lógica integral.

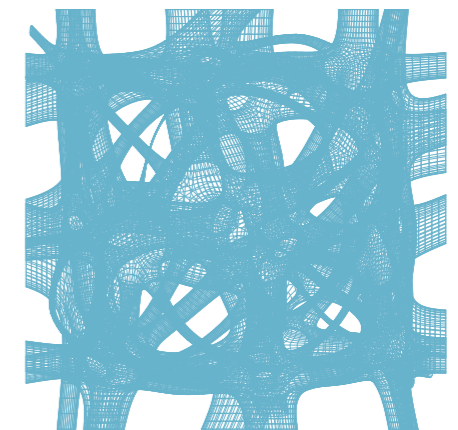
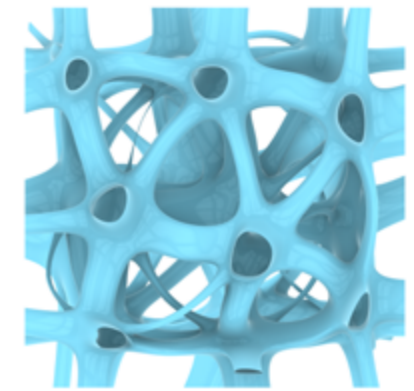
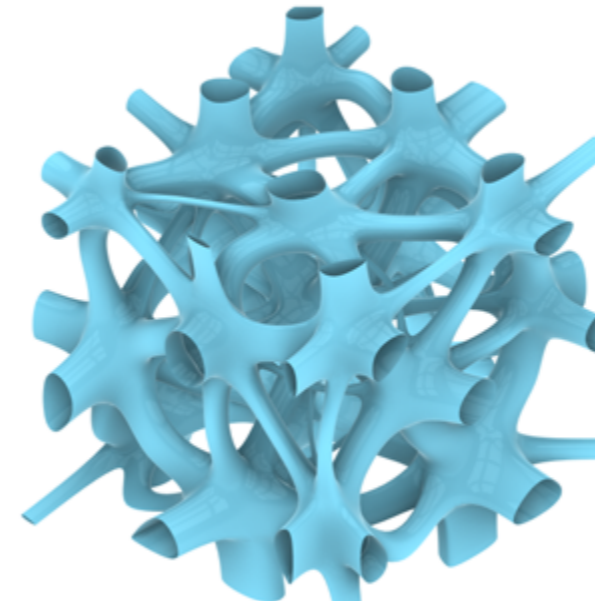
ITERACIÓN 1

- _cantidad de ocupación del volumen: **24%**
- _nivel de semilla (*seed*): **2 de 10**
- _factor de porosidad: **27.8/100**
- _nivel de subdivisión: **3 de 3**



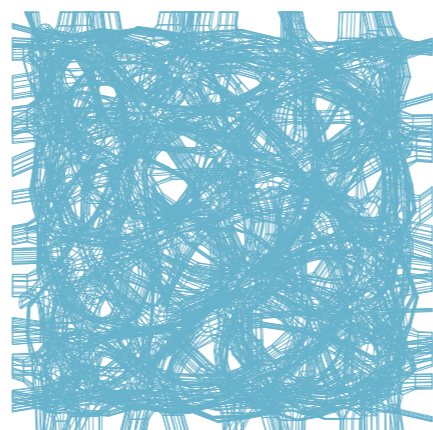
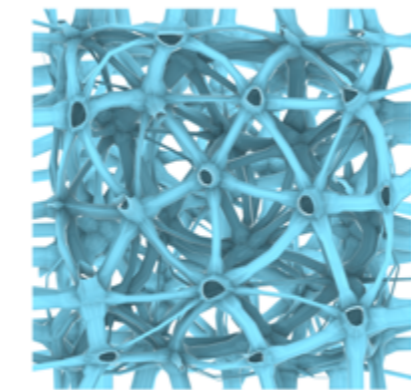
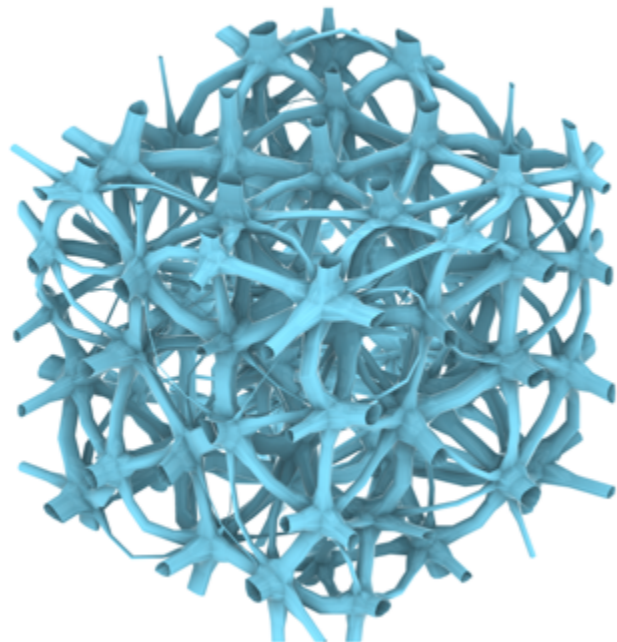
ITERACIÓN 2

- _cantidad de ocupación del volumen: **37%**
- _nivel de semilla (*seed*): **4 de 10**
- _factor de porosidad: **52.5/100**
- _nivel de subdivisión: **3 de 3**



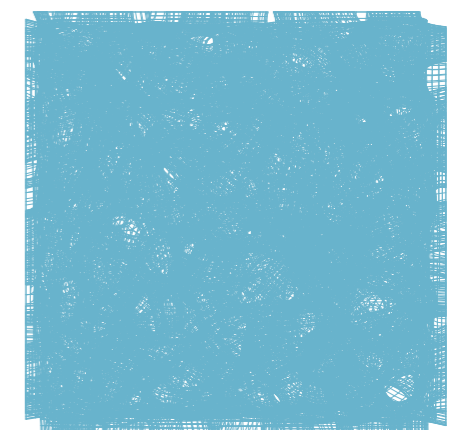
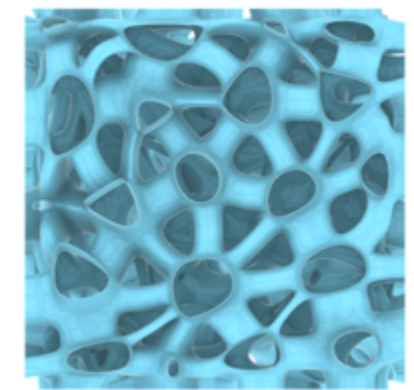
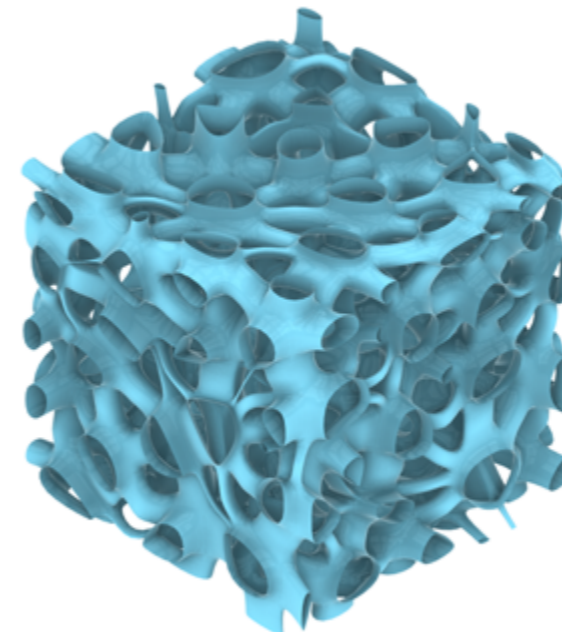
ITERACIÓN 3

- _cantidad de ocupación del volumen: **80%**
- _nivel de semilla (*seed*): **4 de 10**
- _factor de porosidad: **78/100**
- _nivel de subdivisión: **1 de 3**

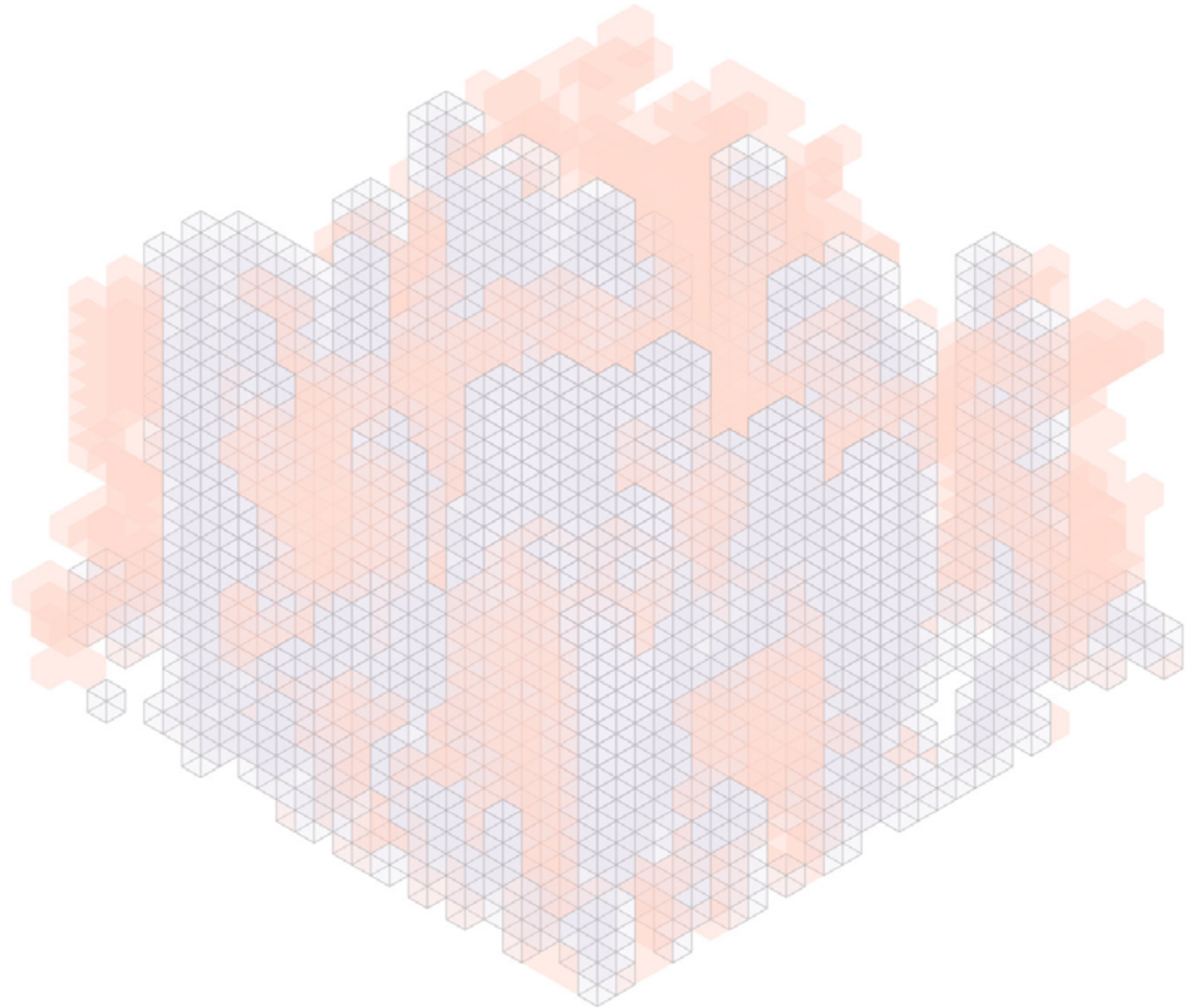
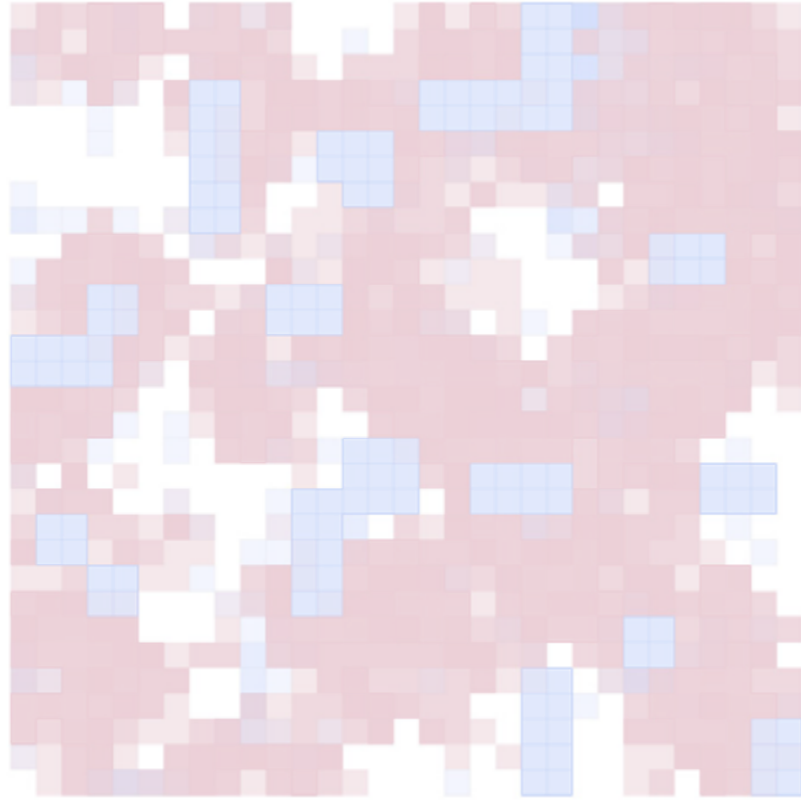


ITERACIÓN 4

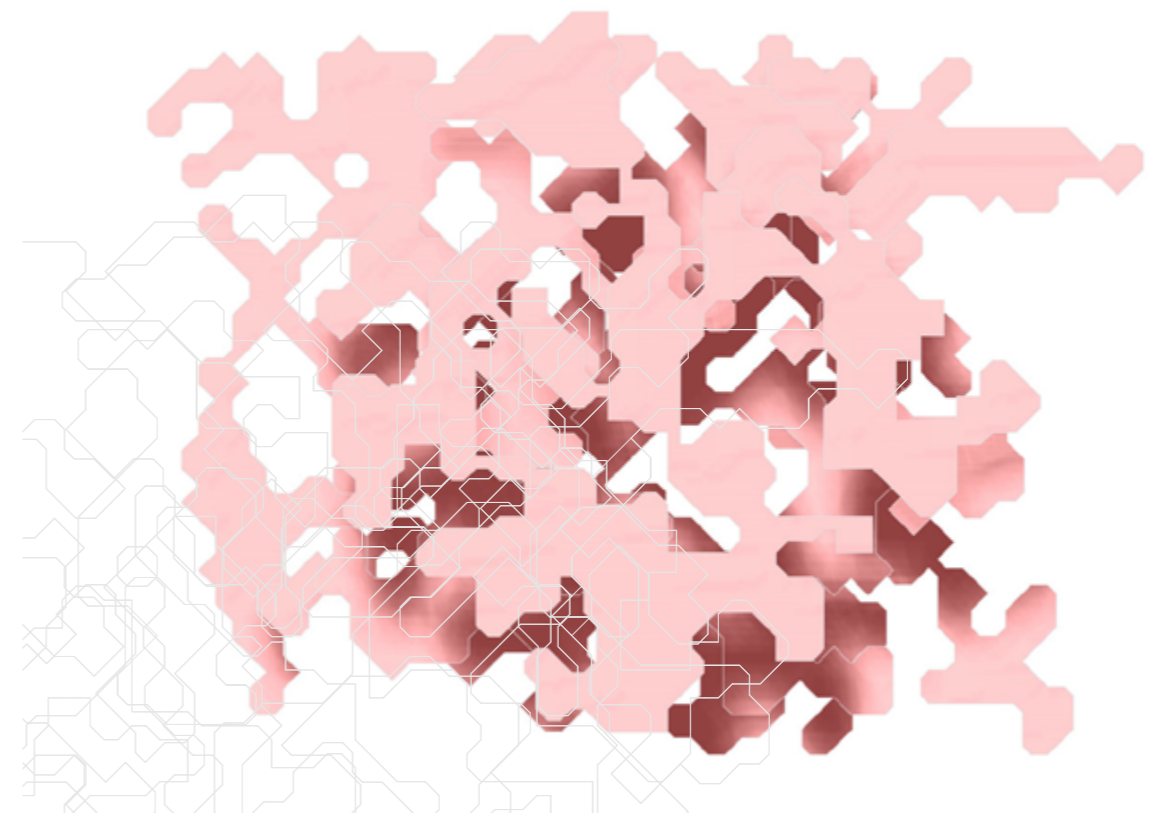
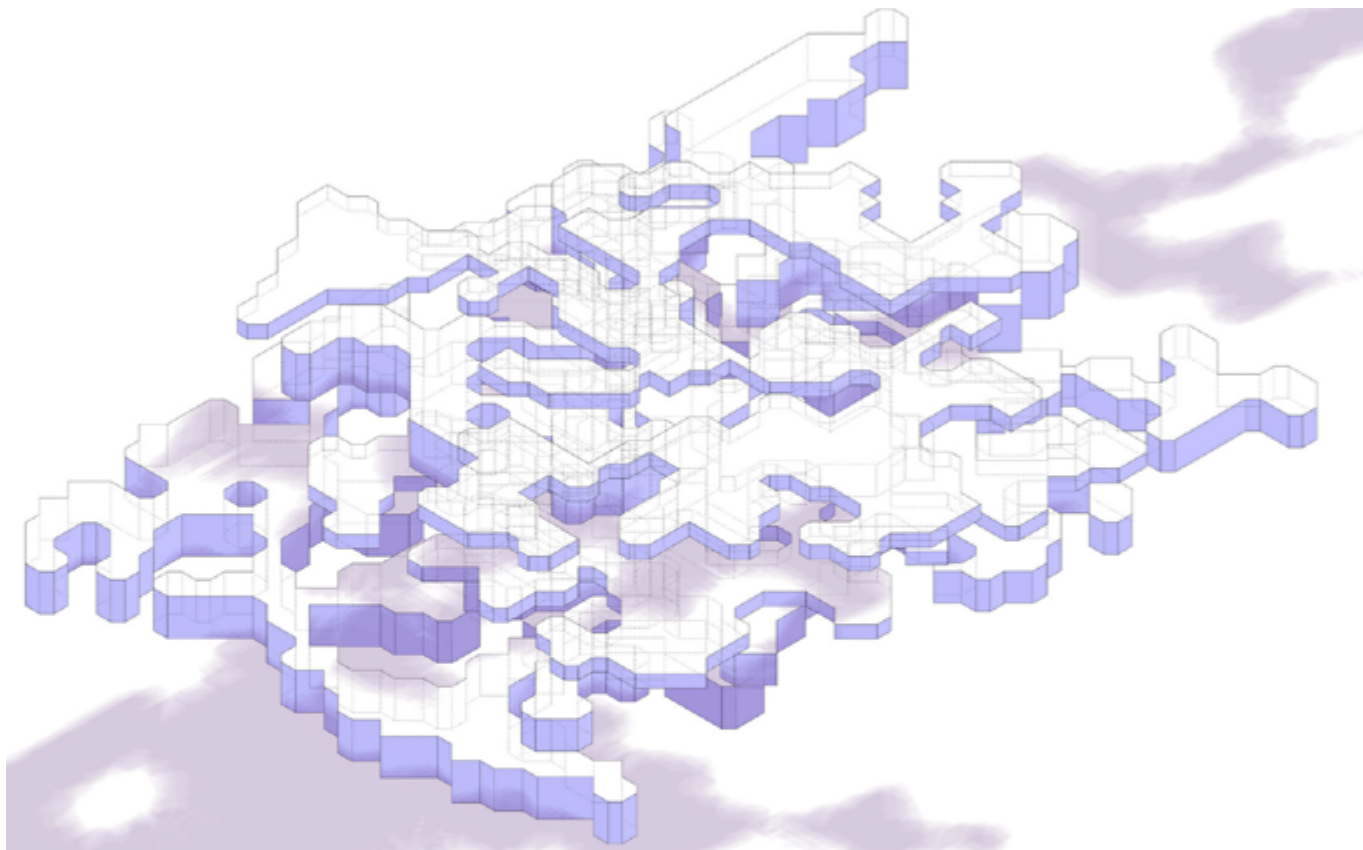
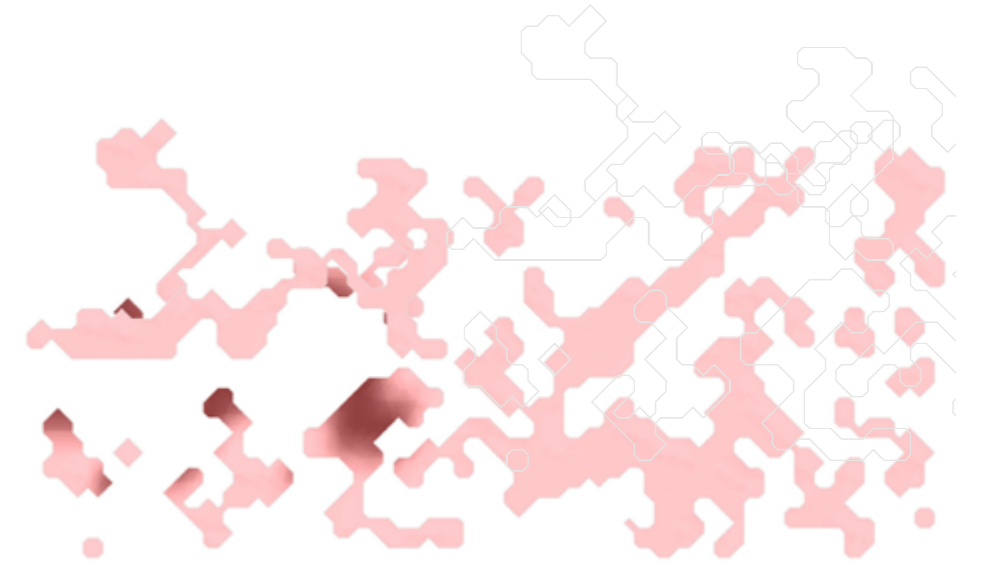
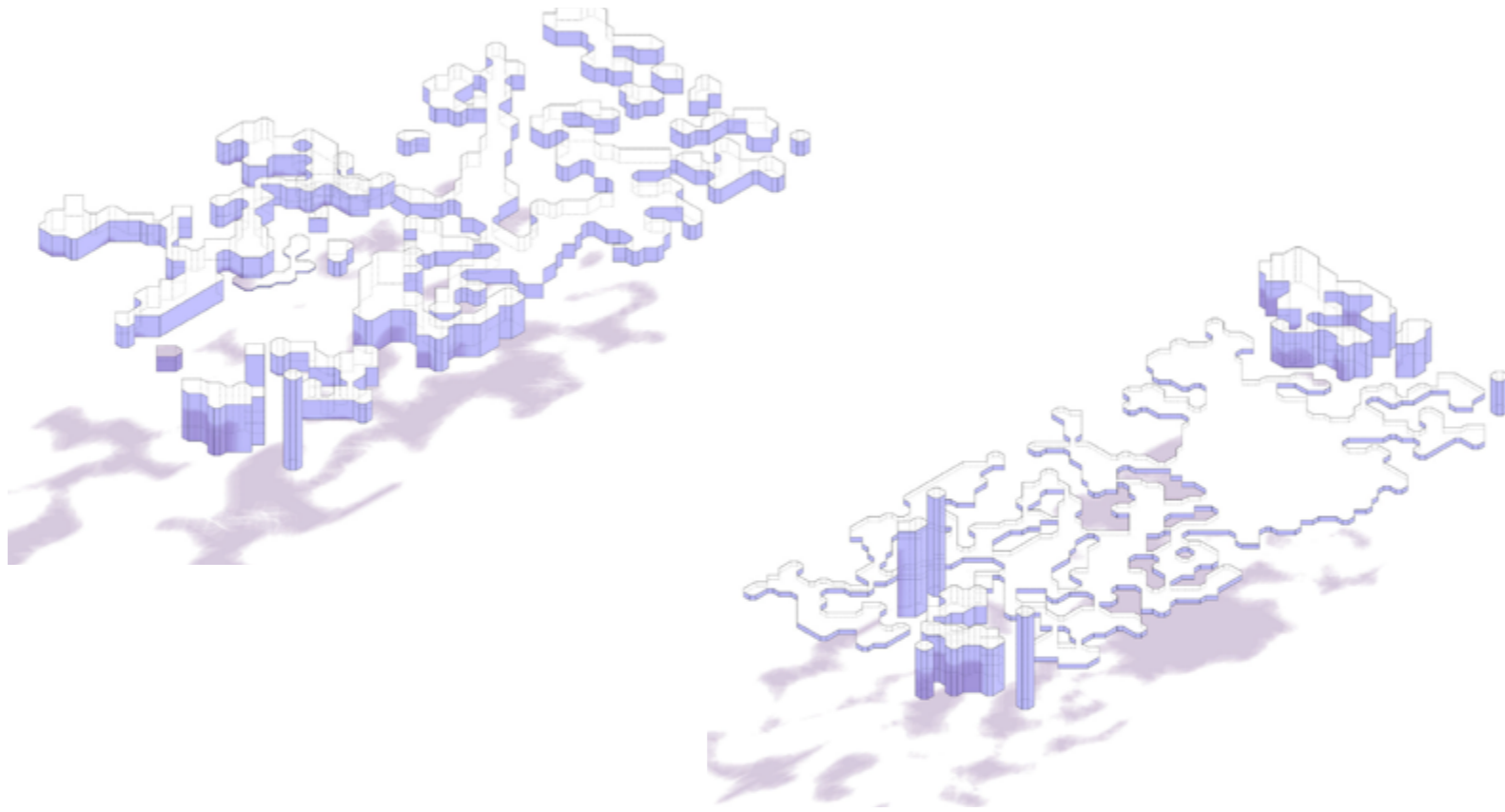
- _cantidad de ocupación del volumen: **90%**
- _nivel de semilla (*seed*): **3 de 10**
- _factor de porosidad: **93/100**
- _nivel de subdivisión: **2 de 3**



CELULAR AUTOMATA _V1

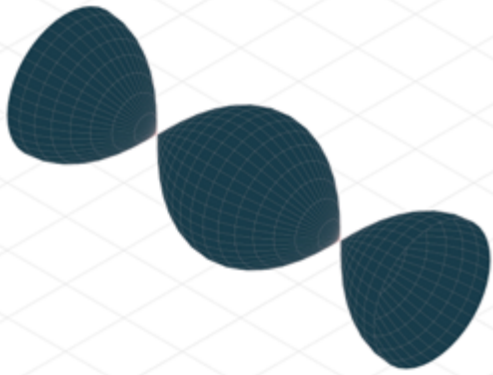


CELULAR AUTOMATA _V2



SUPERFICIES MATEMÁTICAS

BONBON



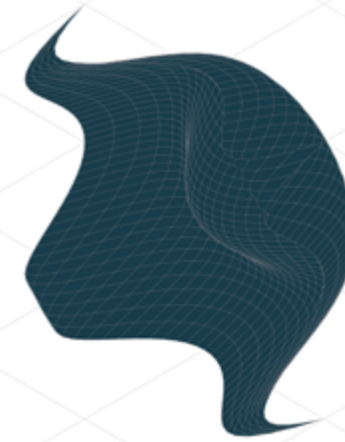
CATALAN



CATENOID



COSINUS



ENNEPER



FRESNEL 2



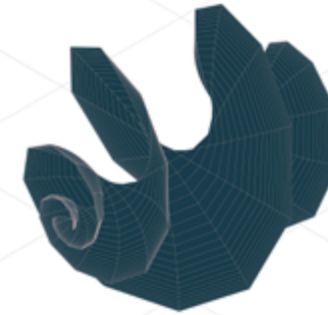
HELICOIDAL



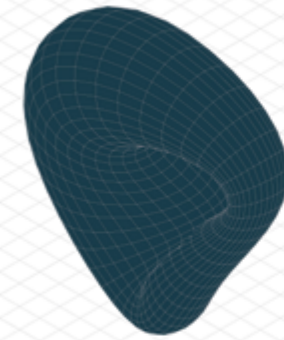
HENNEBERG



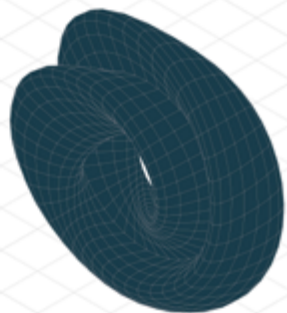
HYPERHELICOIDAL



KLEIN



KLEIN 2



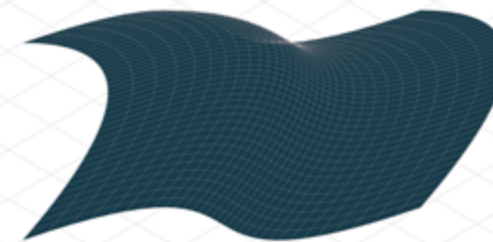
KUEN



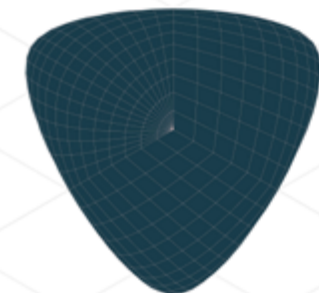
MOEBIUS

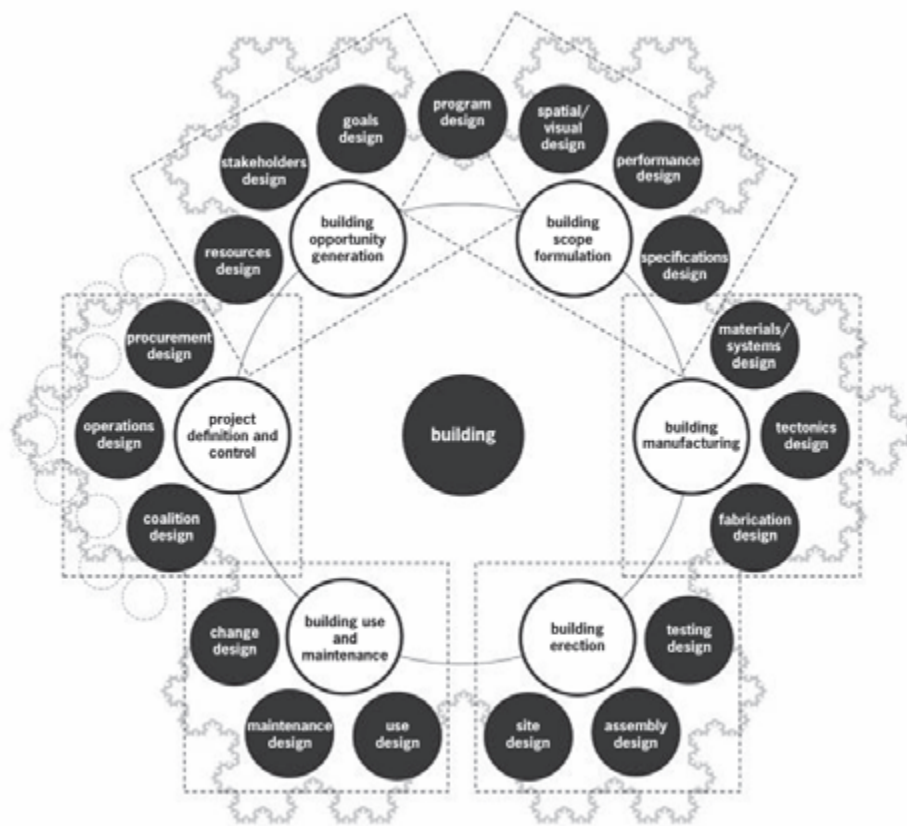


SHOE



STEINER





2.3. DIGITALIZACIÓN Y AMPLIACIÓN DE LOS PROCESOS DE GAUDÍ Y OTTO

De la intuición física al modelado paramétrico

La obra de Antoni Gaudí y Frei Otto puede entenderse como un punto de partida intuitivo hacia lo que hoy denominamos pensamiento paramétrico. Ambos arquitectos desarrollaron una metodología proyectual basada en principios físicos, reglas geométricas y comportamientos materiales, que prescindía de la representación convencional para centrarse en procesos de formación. Gaudí, mediante maquetas funiculares invertidas y geometrías regladas, y Otto, a través de modelos tensiles y experimentación con películas de jabón, revelaron formas estructurales derivadas del equilibrio, la eficiencia y la adaptación.

Hoy, mediante herramientas digitales como Grasshopper para Rhino, estas intuiciones se traducen en sistemas computacionales capaces de modelar, simular e iterar las lógicas de crecimiento, tensión o gravedad que guiaban sus proyectos. La digitalización no sustituye el pensamiento material, sino que lo expande: permite modular cada variable, registrar el comportamiento de un sistema en distintas fases, y generar familias de soluciones interdependientes. Lo que en el taller de Gaudí o en el laboratorio de Otto requería horas de prueba y error manual, puede hoy explorarse de forma paramétrica, acelerando el feedback proyectual sin perder la lógica natural que lo origina.

Planta viva, sección reactiva: una arquitectura por fases

Si en el capítulo 1.3 se abordaba la dimensión planimétrica de estos procesos —especialmente la organización en planta de la Cripta Güell o los sistemas ramificados de los pabellones de Otto— aquí se propone una lectura tridimensional que

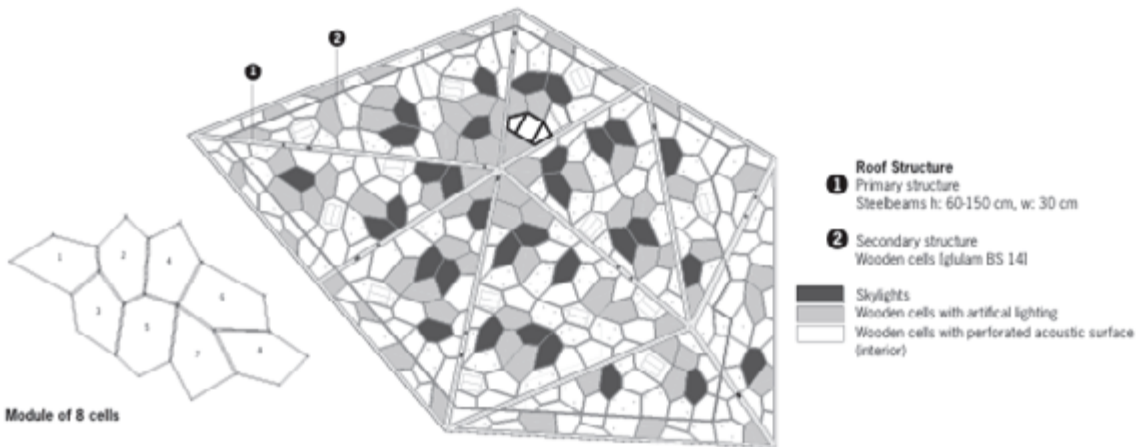
DESIGNING

DESASSEMBLY

INDUSTRY

101

BARKOW/
LEIBINGER



amplía ese análisis. Las geometrías derivadas de modelos naturales —catenarias, paraboloides, membranas, redes— no solo afectan al contorno, sino a todo el cuerpo espacial del proyecto: su masa, su relación con la luz, la dirección de las cargas y la modulación de los elementos constructivos.

Trabajar con algoritmos generativos permite simular este desarrollo como una secuencia de fases: desde el trazado de líneas estructurales a la identificación de nodos, la formación de superficies tensadas, el cálculo de grosores según esfuerzos o el ajuste de aperturas según iluminación. Cada paso es consecuencia del anterior, tal y como sucede en los procesos de formación biológica. Este método, que puede implementarse en Grasshopper combinando componentes como Kangaroo (para simulación física), Ladybug (para análisis solar) o Weaverbird (para subdivisión de mallas), encarna una arquitectura que no se diseña por capas, sino por comportamiento acumulativo.

En ambos casos, el proceso puede iniciarse a partir del planteamiento de catenarias generadas sobre una malla base, obtenida mediante diagramas de Voronoi o triangulación de Delaunay, que estructuran el campo geométrico inicial. A partir de esta malla, la herramienta Kangaroo permite establecer puntos de anclaje (anchors) y aplicar fuerzas simuladas (loads) para decidir qué zonas se desean ampliar, tensar o estabilizar. Este procedimiento no busca una forma definitiva, sino un sistema abierto de relaciones que puede responder a múltiples condiciones.

Naturalizar el algoritmo: crecimiento, presión, gravedad

La digitalización no implica automatismo, sino que permite ampliar el repertorio de acciones proyectuales a partir de la lógica natural. Por ejemplo, se pueden desarrollar secuencias donde el crecimiento de una red espacial responde a condiciones de ocupación, luz y gravedad. Nodos conectados por líneas pueden formar retículas que se inflan mediante fuerzas simuladas (como presión o tensión superficial), generando espacios autoportantes y eficientes. Este tipo de estrategias retoman principios fundamentales

F.30 Iteraciones de panelado de modulo de 8 celdas (*Barkow/Leibinger, 2008*)



del capítulo 1.2: tejer, ramificar, agregar, doblar, escalar.

Cada parámetro es un vector de transformación: el canto de una pieza se ajusta a las tensiones; la forma de una cúpula se deforma por presión; el ritmo de los soportes se ordena por la lógica del crecimiento. Como explica Michael Hensel (2010), el diseño morfogenético no busca imponer una forma, sino establecer un marco de relaciones donde las formas emergen. En este sentido, los procesos digitales se convierten en plataformas para reencarnar los principios que Gaudí y Otto descubrieron empíricamente: gravedad, tracción, adaptación, eficiencia.

De modelo a sistema: hacia una arquitectura informada

El paso de la maqueta al modelo digital no implica solamente un cambio de soporte, sino una ampliación conceptual. Mientras las maquetas físicas permiten la experimentación directa con materiales reales, los modelos paramétricos incorporan datos, simulaciones y vínculos con herramientas de análisis. Así, cada nodo de una red, cada elemento estructural o cada apertura responde a condiciones cuantificables: ángulos de incidencia solar, esfuerzos por carga, distancias entre apoyos, etc. Este enfoque da lugar a lo que algunos autores denominan arquitectura informada o performativa: una arquitectura que no representa la forma, sino que la hace emerger del diálogo entre geometría, contexto y comportamiento físico.

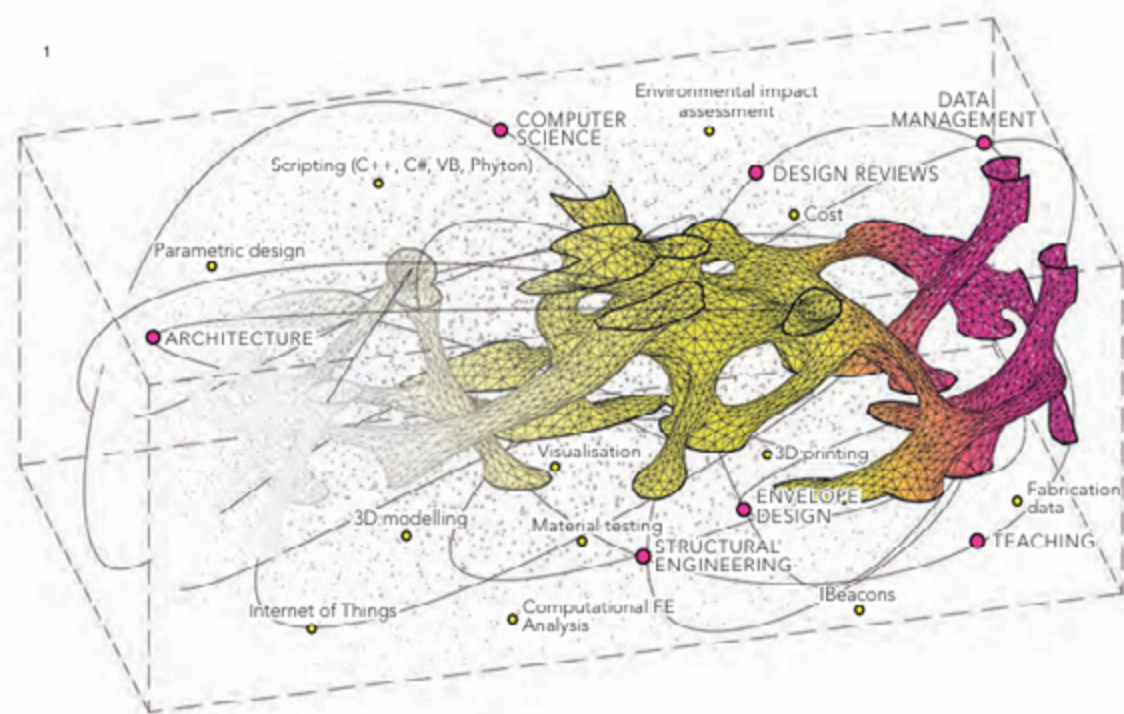
Este proceso, heredero directo de las exploraciones de Gaudí y Otto, encuentra hoy continuidad en sistemas de diseño generativo basados en lógica algorítmica, análisis multivariable y fabricación digital. La semilla plantada en sus talleres cobra nueva vida en el entorno digital: sus principios no han quedado obsoletos, sino que se han convertido en gramática activa del diseño computacional contemporáneo.

F.32 Gramazio & Kohler
Lab, ETH Zurich (*Gramazio
& Kohler*)



3 GEOMETRÍA PARA GENERAR

1 AKT II, 2015; p.art atmosphere.
The environments in which AKT II's applied research team navigates, builds connections and plays an active role whether the goal is the delivery of a design or speculative research.



3.1. LA REVISIÓN DEL OFICIO Y EL TABLERO GEOPOLÍTICO

Crisis de la autoría individual

Uno de los principales efectos del paradigma digital en arquitectura ha sido la disolución de la figura del arquitecto como autor individual. Desde el Renacimiento hasta buena parte del siglo XX, la arquitectura se concibió como la manifestación de una voluntad estilística personal. Figuras como Le Corbusier o Frank Lloyd Wright encarnaban el modelo del genio demiúrgico, cuya firma era identificable en cada trazo. Con la irrupción del diseño computacional, esta forma de autoría ha comenzado a fragmentarse.

Mario Carpo ha denominado este fenómeno como la emergencia de una "autoría genérica", donde el arquitecto ya no es el responsable directo de cada forma, sino el diseñador de un sistema generativo basado en datos, reglas y algoritmos (Carpo, 2011). Esta mutación se materializa en estudios como Zaha Hadid Architects, donde herramientas como Maya, Grasshopper o Kangaroo son utilizadas por equipos interdisciplinarios para generar formas complejas que evolucionan a partir de scripts y protocolos, muchas veces sin intervención directa del autor original.

De igual forma, el proyecto del Yokohama International Port Terminal de FOA ejemplifica esta transformación: el diseño se concibió como una plataforma abierta a múltiples especialidades, donde el flujo peatonal, las restricciones estructurales y las condiciones del lugar se integraron como variables en un sistema de información compartida. Como señala Antoine Picon (2010), el diseño digital no se estructura ya de forma secuencial, sino como una red de decisiones interdependientes que redistribuye la agencia proyectual.

Esta nueva condición se ve facilitada por entornos como Grasshopper, TouchDesigner o Unreal Engine, que permiten



trabajar mediante módulos, iteraciones y colaboración entre técnicos, diseñadores y programadores. La comunidad Food4Rhino es un ejemplo claro: arquitectos, artistas y desarrolladores comparten y refinan plugins, creando una inteligencia colectiva que trasciende el despacho de autor.

De la estandarización a la personalización masiva

La modernidad arquitectónica sostuvo durante décadas la promesa de una estandarización universal. Las *Unité d'Habitation* de Le Corbusier o los sistemas prefabricados del Team 10 fueron expresiones de esta fe en la repetición como garantía de eficiencia. Sin embargo, la digitalización ha puesto en cuestión esta lógica: con la fabricación digital, ya no es necesario repetir lo mismo para producir de manera eficiente.

Tecnologías como el corte CNC, la impresión 3D o el fresado robotizado permiten la producción de piezas únicas con costes similares a los de la producción en serie. El Pabellón ICD/ITKE de Stuttgart lo ejemplifica: cada componente estructural es distinto, pero forma parte de un sistema paramétrico coherente. Michael Hansmeyer ha explorado esta posibilidad mediante subdivisiones algorítmicas y geometrías de alta complejidad.

Este cambio de paradigma no es solo técnico, sino conceptual. Ya no se diseña en función de moldes, sino de catálogos de variantes. El diseñador configura un sistema de reglas que genera formas adaptadas a condiciones locales: luz, ventilación, acústica, o incluso preferencias estéticas del usuario. Esto se ha denominado “personalización masiva” (Picon, 2010), y transforma radicalmente la relación entre arquitectura y usuario.

Herramientas como Grasshopper y plugins como OpenNest o LunchBox permiten modelar esta variabilidad sin necesidad de redibujar. La geometría se vuelve información, y el diseño se convierte en un proceso de selección y ajuste continuo.

F.34 Fresado en CNC de 5 ejes de la fábrica Hauer en New Haven (*Erwin Hauer*)



Nuevos perfiles profesionales

La práctica arquitectónica se ha vuelto cada vez más híbrida. El perfil clásico del arquitecto como compositor, dibujante y director de obra ha sido reemplazado por un repertorio más amplio: programación, análisis medioambiental, visualización avanzada, fabricación digital, y modelado de datos. La figura del arquitecto se redefine como un estratega de sistemas.

Estudios como BIG o UNStudio han integrado laboratorios de investigación dentro de sus oficinas, con equipos formados por programadores, ingenieros de datos y especialistas en materiales. En este contexto, herramientas como Grasshopper o Rhino no son solo medios de representación, sino lenguajes de operación.

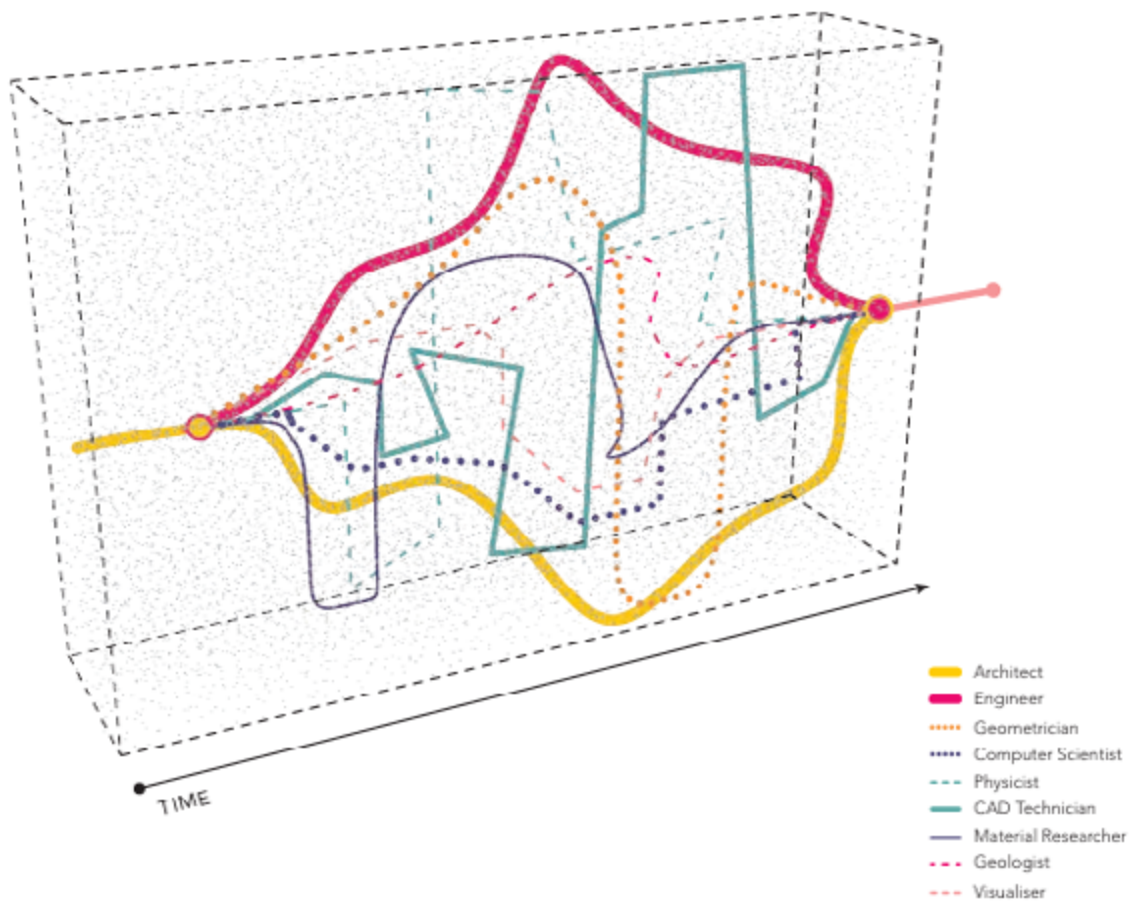
Este desplazamiento también conlleva una cuestión ética: ¿quién responde por una decisión tomada por un algoritmo?, ¿qué papel juega la intuición en un entorno regido por lógicas paramétricas? La profesión debe replantear sus responsabilidades en un entorno de decisiones distribuidas.

Como observa Carpo (2011), el arquitecto no desaparece, sino que se reprograma. El arquitecto se convierte en curador de procesos, diseñador de sistemas, editor de scripts. Esta transformación amplía el campo de acción del arquitecto hacia nuevas formas de intervención: diseño urbano, fabricación robótica, visualización de datos, o incluso desarrollo de software específico.

Geopolítica y digitalización

El paradigma digital no se desarrolla en un vacío geográfico ni político. Las condiciones de acceso a las tecnologías, los flujos de información y la localización de los centros de desarrollo marcan profundamente el tipo de arquitectura que puede producirse en cada contexto.

Las redes digitales permiten una colaboración sin precedentes, pero también reproducen desigualdades. La dependencia de licencias,



infraestructuras y plataformas condiciona la capacidad de operación de los estudios en países del sur global. La brecha tecnológica no es solo una cuestión técnica, sino también una cuestión geopolítica.

Por otro lado, la digitalización también ha dado lugar a nuevas formas de poder cultural. La exportación de modelos digitales de diseño, fabricación y urbanismo se ha convertido en una herramienta de soft power. Las industrias creativas forman parte del tablero estratégico global, como lo muestra la emergencia de hubs como Singapur, Seúl o Dubái.

La arquitectura digital no puede comprenderse sin atender a estos flujos de capital, conocimiento y logística. La aparición de redes como Design Computation Lab o la práctica de oficinas como The Living o Carlo Ratti Associati evidencian la convergencia entre tecnología, diseño y política global.

Conclusión

La figura del arquitecto ya no puede entenderse como la de un autor aislado. En el contexto digital, el diseño se produce mediante flujos de información, sistemas colaborativos y herramientas que distribuyen la toma de decisiones. La autoría se vuelve compartida, la forma es generada, y el control se negocia entre humanos, algoritmos y protocolos.

Esta transformación no es una pérdida, sino una ampliación. El arquitecto se convierte en diseñador de procesos, mediador entre disciplinas, estrategia de relaciones. El paradigma digital exige nuevas competencias, pero también abre nuevas posibilidades para repensar el oficio y su impacto en el mundo.

Como se ha señalado a lo largo de este capítulo, la arquitectura digital no es solo una cuestión formal o técnica. Es una forma de intervenir en la realidad desde lógicas más abiertas, distribuidas y adaptativas. Es también una forma de redefinir la agencia del arquitecto en un mundo profundamente transformado por los datos, la red y la colaboración global.



3.2 FLUJOS DE TRABAJO Y NUEVAS HERRAMIENTAS DE FABRICACIÓN DIGITAL

Principios y métodos de fabricación digital

La fabricación digital ha redefinido las posibilidades constructivas al permitir una convergencia inédita entre diseño computacional, precisión material y ejecución automatizada. Esta transformación afecta tanto a los procesos de trabajo como a los lenguajes arquitectónicos, habilitando la creación de formas no estándar y la personalización en masa. Las técnicas se agrupan habitualmente en tres categorías según su lógica operativa: sustractiva, aditiva y formativa. El contenido redactado en este apartado del trabajo está basado en el cuerpo de la obra “**Digital Fabrication in Architecture**” de **Nick Dunn**.

- **Procesos sustractivos:** *CNC milling y routing*. Los sistemas de *Computer Numerical Control (CNC)* representan una de las tecnologías más asentadas en el ámbito arquitectónico. Mediante la eliminación precisa de material desde un volumen sólido, herramientas como el router o el mill permiten obtener componentes arquitectónicos o moldes altamente complejos, especialmente útiles en madera, plásticos o aluminio

Las máquinas CNC se configuran principalmente en versiones de tres, cuatro o cinco ejes. Los modelos de cinco ejes permiten alcanzar zonas internas o geometrías en voladizo gracias a la rotación simultánea de cama y cabezal, lo cual amplía significativamente las posibilidades del fresado volumétrico. Su integración en estudios de arquitectura o talleres universitarios ha demostrado una notable eficacia para proyectos de componentes únicos, como se observa en los sistemas de ensamblaje ranurado empleados en pabellones de madera o en el prototipado de paneles estructurales.



- **Procesos aditivos:** *Rapid prototyping* y *3D printing*

En contraposición a la lógica sustractiva, los métodos aditivos construyen objetos mediante la superposición de capas sucesivas, a partir de datos digitales convertidos en geometrías planas. Técnicas como *Stereolithography (SLA)*, *Selective Laser Sintering (SLS)* o *Fused Deposition Modelling (FDM)* permiten imprimir geometrías complejas o incluso prototipos funcionales que luego son usados como moldes, componentes de análisis o estudios a escala

Uno de los desafíos principales de estos métodos ha sido históricamente la escala de las piezas, pero desarrollos como el *contour crafting* —que emplea compuestos similares al hormigón— prometen revolucionar la impresión de arquitectura en 1:1

- **Procesos formativos:** plegado, doblado y conformado térmico

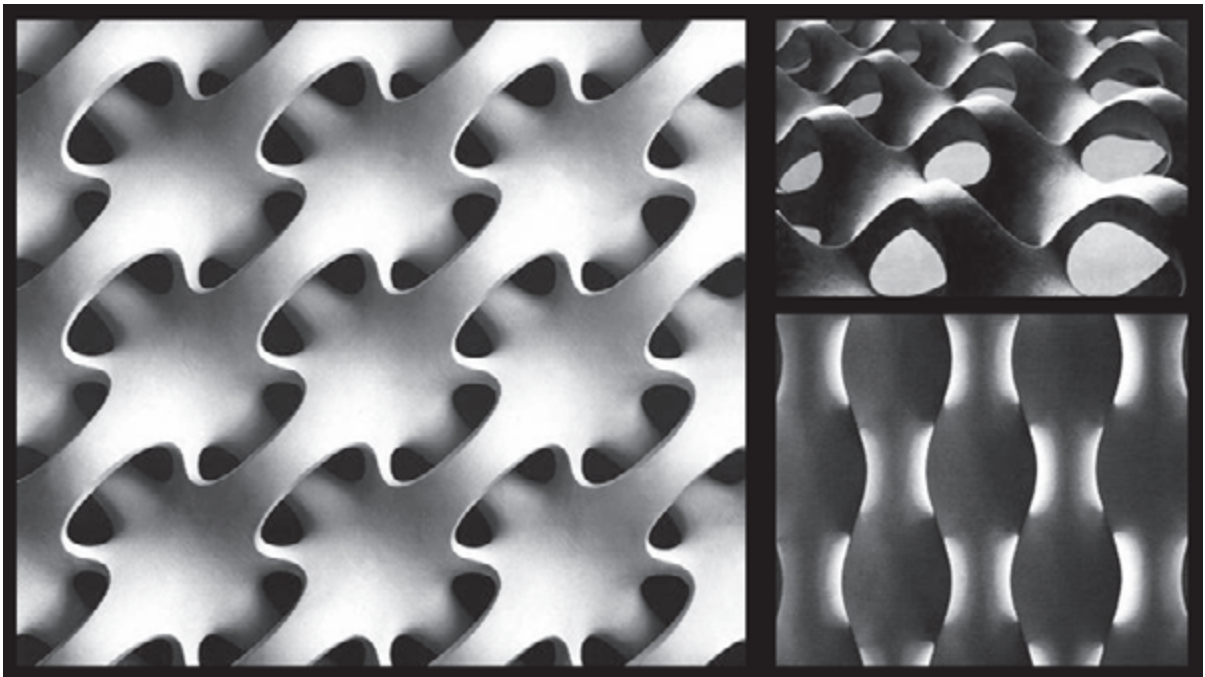
Una tercera vía se apoya en la manipulación física de materiales mediante calor o presión. Estas técnicas —como el doblado de madera mediante vapor o la conformación de plásticos— buscan deformar sin eliminar ni añadir material, lo que requiere una relación más estrecha entre geometría, resistencia y proceso. Estos métodos suelen combinarse con cortes previos por *laser cutting* o CNC para facilitar la manipulación

Estrategias proyectuales

El desarrollo de estrategias específicas de fabricación ha permitido adaptar las técnicas a los lenguajes arquitectónicos emergentes:

Nonlinearity and Indeterminacy. Frente a los métodos secuenciales tradicionales, la lógica digital permite asumir procesos no lineales, donde la geometría puede depender de datos externos o cambiar en tiempo real. Esto es especialmente útil en estructuras adaptativas o *responsive design*.

Digital Tooling. No se trata solo de utilizar máquinas digitales, sino de diseñar herramientas digitales específicas para cada problema. La programación visual o textual genera así herramientas



a medida que son parte activa del proceso proyectual.

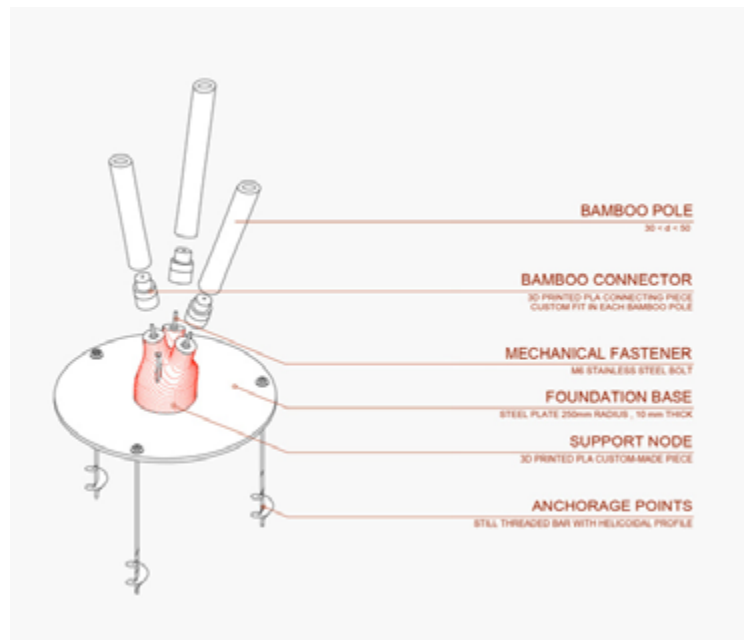
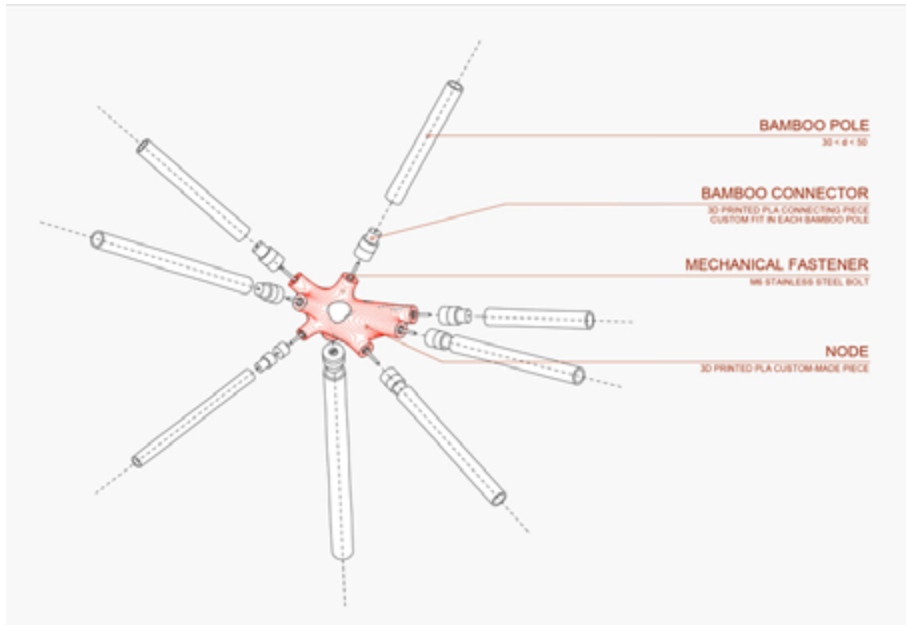
Contouring. Técnica que parte de secciones paralelas para describir volúmenes complejos. Ideal para procesos sustractivos como el fresado CNC. Es utilizada también para simplificar geometrías orgánicas en piezas seriadas.

Folding. Aprovecha las cualidades estructurales y formales de los pliegues. Puede partir de láminas planas cortadas por láser, que luego se doblan generando formas tridimensionales eficientes. Es una técnica de bajo coste y alto impacto espacial .

Forming. Se refiere a la deformación de materiales mediante vacío, presión o calor. Desde la termoformación hasta el inflado neumático, permite obtener superficies suaves y de gran continuidad con alta eficiencia estructural.

Sectioning. Consiste en subdividir una geometría compleja en piezas planas cortadas por secciones. Muy útil para modelar superficies de doble curvatura usando materiales estándar como cartón o contrachapado.

Tiling. Técnica basada en el diseño de patrones repetitivos o paramétricos que permiten recubrir superficies complejas. Se puede combinar con variaciones de densidad o tamaño para adaptarse a condiciones contextuales como la luz, la acústica o la ventilación .



3.3. NUEVOS PROCESOS EN LA INVESTIGACIÓN. LA ACTITUD DE TRABAJO Y EL FUTURO CON I.A

Panorama y flujos de trabajo en la fabricación digital

La fabricación digital ha transformado profundamente la praxis arquitectónica al conectar directamente los entornos de diseño computacional con la producción material. Esta transición responde a la lógica de continuidad entre lo proyectado y lo construido, superando la fragmentación entre dibujo, modelo y ejecución. Así, la arquitectura se articula en flujos de trabajo integrados que abarcan desde la modelación paramétrica hasta el control numérico de máquinas y robots.

Como explican Yuan, Menges y Leach en *Digital Fabrication*, esta lógica productiva incorpora tecnologías como el fresado CNC (control numérico por computadora), los brazos robóticos multiejes, la impresión 3D (aditiva) o el corte por láser, todas ellas conectadas a modelos digitales que ya contienen los datos necesarios para su ejecución material. El diseñador se convierte entonces en un programador de procesos, capaz de simular y adaptar las fases productivas según variables contextuales, estructurales o estéticas.

En este nuevo paradigma, el modelo digital no es solo representación, sino información ejecutiva. La geometría se traduce en trayectorias de herramienta, el material en comportamiento físico, y el diseño en un algoritmo constructivo. Tal y como destacan los autores, esta integración no solo mejora la precisión y reduce el desperdicio, sino que abre la posibilidad a una personalización masiva sin sacrificar eficiencia.



El ICD de Stuttgart: optimización estructural y morfogénesis material

Uno de los referentes más influyentes en el ámbito de la fabricación digital es el Institute for Computational Design and Construction (ICD) de la Universidad de Stuttgart. Entre sus múltiples proyectos destaca el ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16, que establece un puente conceptual y técnico con la tradición de Gaudí y Otto.

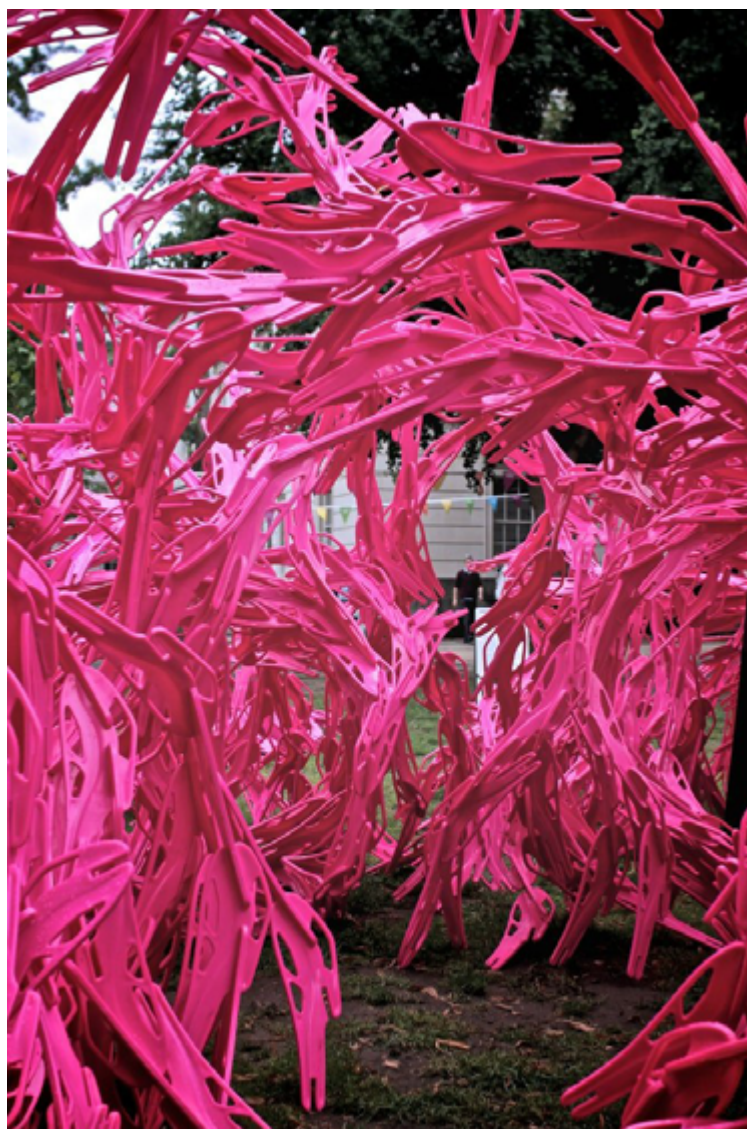
Inspirado en los caparazones de insectos, este pabellón se construye a partir de una simulación de comportamiento estructural mediante relajación dinámica, usando algoritmos que replican el modo en que fibras naturales distribuyen fuerzas. El modelo digital fue desarrollado con herramientas como Kangaroo (motor de física para Grasshopper), que permite simular la acción de cargas, puntos de anclaje y condiciones de deformación en tiempo real. El proceso se basa en una lógica de form-finding, en la que la forma resulta del equilibrio entre fuerzas internas y restricciones externas, en estrecha relación con los métodos de catenarias invertidas de Gaudí y los modelos tensoestructurales de Otto.

A partir del modelo digital, se desarrollaron patrones de corte para piezas de fibra de vidrio reforzada, fabricadas mediante bobinado robótico en moldes flexibles. La fabricación se llevó a cabo en el taller del ICD, y el ensamblaje fue posible sin necesidad de subestructuras, demostrando el potencial de las estructuras ligeras autoportantes basadas en simulación computacional.

3. Marc Fornes y el Vaulted Willow: ornamentación estructural algorítmica

El pabellón Vaulted Willow (2014) del arquitecto Marc Fornes y su estudio THEVERYMANY constituye otro ejemplo paradigmático del potencial expresivo y estructural de la fabricación digital. Instalado en Edmonton (Canadá), esta estructura multicolor combina principios de catenaria con técnicas avanzadas de subdivisión geométrica y laminado computacional.

F.41 Vaulted Willow, Edmonton
Canadá (Marc Fornes, 2014)



La geometría se generó a través de un sistema algorítmico basado en scripts de subdivisión y ramificación, que determinó tanto la forma global como el patrón estructural de doble capa. A diferencia de los procesos lineales tradicionales, el diseño no partió de una figura predefinida, sino de un conjunto de reglas geométricas que generaron la forma mediante iteraciones, en clara afinidad con los sistemas de crecimiento natural y el principio de fractalidad que se ha analizado en este TFG.

Para su fabricación, se utilizaron paneles de aluminio cortados por CNC y doblados manualmente según los ángulos especificados en el modelo. La lógica estructural se basa en la autoestabilidad por curvatura, donde la geometría laminar reemplaza a la armadura tradicional. El resultado es una forma continua, porosa y viva, cuya expresividad estética deriva directamente de su eficiencia geométrica y material.

Alisa Andrasek y la programación de lo no-lineal

La obra de Alisa Andrasek, arquitecta y directora de Biothing y cofundadora del estudio Bloom Games, se caracteriza por una aproximación profundamente algorítmica al diseño, donde la lógica del código sustituye a la del plano. Un proyecto significativo es Cloud Pergola (2018), concebido como una nube tridimensional generada a través de algoritmos de crecimiento estocástico y principios de atracción/repulsión.

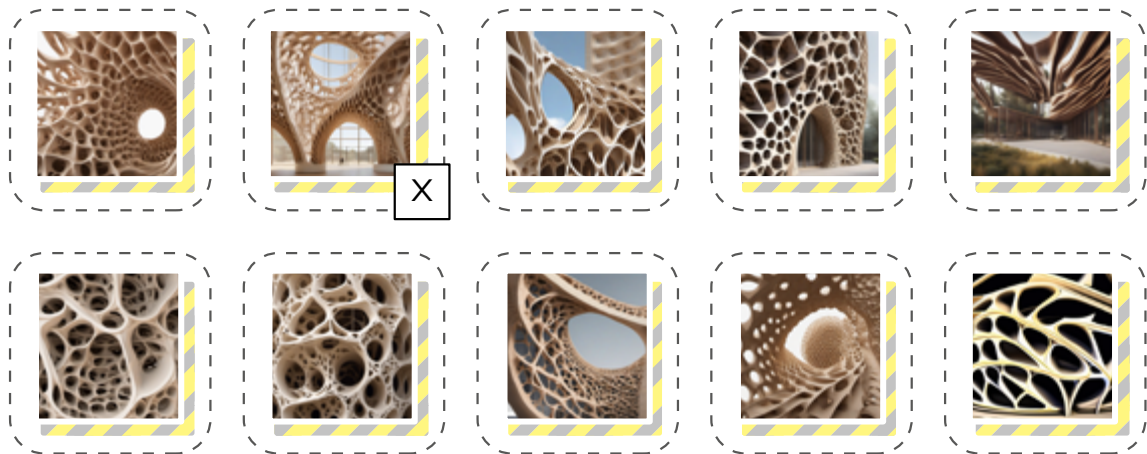
Inspirada en los procesos biológicos de agregación celular, la estructura fue producida mediante impresión 3D de filamentos de polímero en colaboración con el laboratorio Cloud 9. Su compleja geometría responde a una lógica de comportamiento más que de forma preconcebida, y el resultado es un entorno inmersivo, donde la organización espacial sugiere una arquitectura relacional en lugar de limitaciones objetuales.

La obra de Andrasek sitúa la fabricación aditiva como una técnica privilegiada para dar forma a lo complejo, lo continuo y lo orgánico, abriendo un campo de exploración proyectual donde la arquitectura puede emerger de flujos de información, tal y como hacen las formas naturales.

Prompt 01_

Estructuras porosas inspiradas en la naturaleza

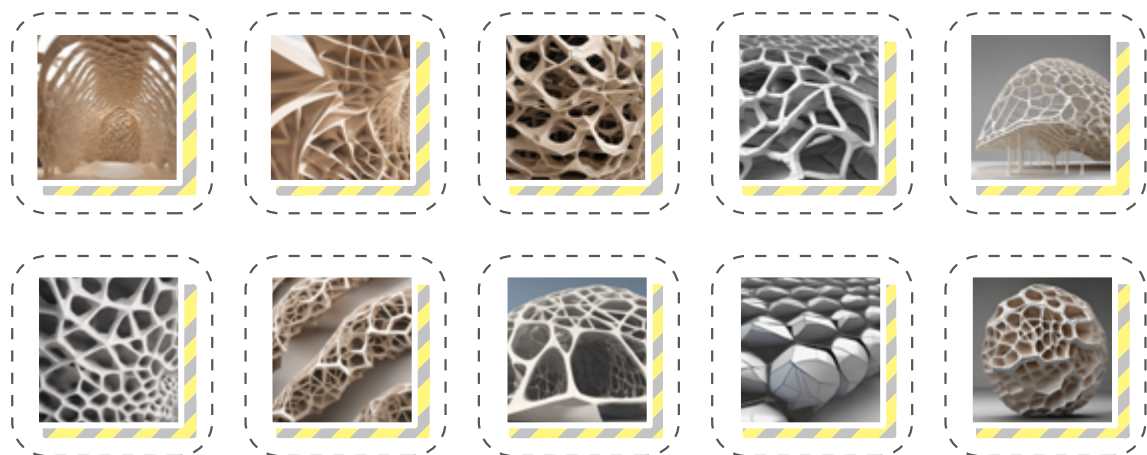
“Genera una imagen de una estructura arquitectónica porosa que incorpore patrones naturales como fractales o espirales, utilizando materiales sostenibles y tecnología de fabricación digital.”



Prompt 02_

Arquitectura paramétrica en entornos naturales

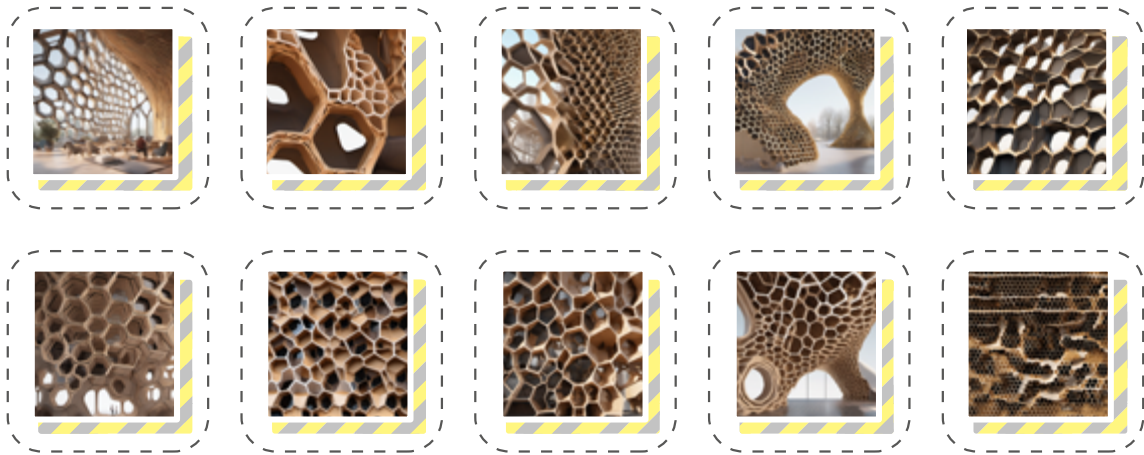
“Crea una imagen de un edificio paramétrico situado en un paisaje natural, donde la forma del edificio se integre armónicamente con el entorno, utilizando colores y texturas que reflejen la biodiversidad del lugar.”



Prompt 03_

Gemelo digital de una estructura natural

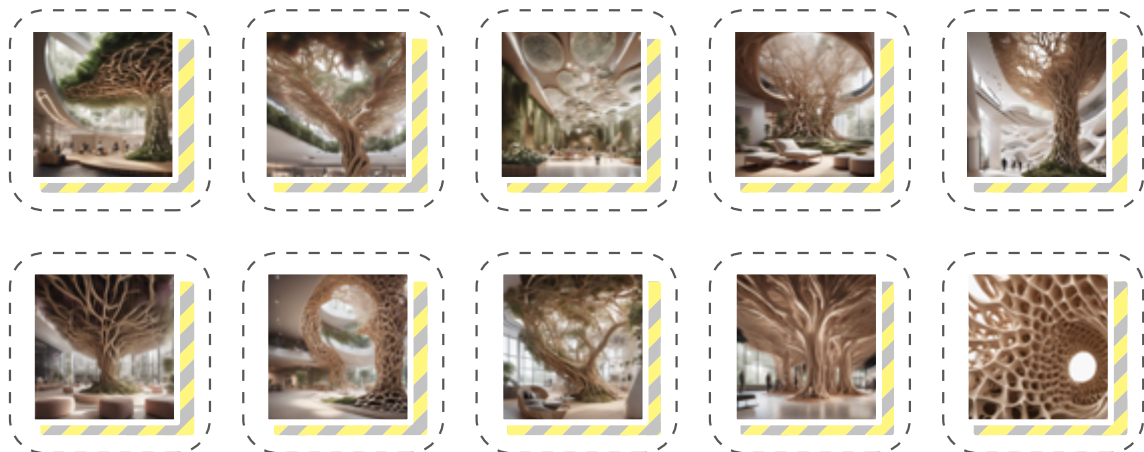
"Genera un gemelo digital de una estructura natural como una colmena o un panal, pero con un diseño paramétrico que incorpore elementos de la arquitectura moderna y materiales innovadores."



Prompt 04_

Diseño generativo de estructuras biomiméticas

"Crea una imagen de una estructura arquitectónica generada mediante algoritmos que imiten patrones biológicos, como la forma de una flor o la estructura de un caparazón de tortuga, utilizando técnicas de fabricación digital."



CONCLUSIONES

Esta investigación **persigue el objetivo de establecer un puente entre el análisis gráfico tradicional y las herramientas de diseño computacional contemporáneo**, tomando como hilo conductor una **selección de geometrías arquitectónicas complejas**.

Para ello, se ha diseñado una **metodología basada en dos fases complementarias**. La primera, **Geometría para comprender**, pide ampliar una antesala de más trabajo a mano, en especial sobre la planta de la *Capilla Güell*. Contar con una aproximación desde el gesto gráfico a mano alzada (y con instrumentos de dibujo) hace gala de la **filosofía sobre el mirar de las cosas**. Esto permite un espacio de **observación y reflexión** para que los **patrones y estructuras no aparentes a simple vista se tornen visibles**, apreciando conceptos tratados en el primer capítulo tales como la **proporción**, la **porosidad** o la **modularidad**.

En la segunda fase, **Geometría para generar**, se han trasladado estos aprendizajes al **entorno paramétrico** mediante **iteraciones controladas con Grasshopper**. El proceso de **codificación geométrica** no se entiende como una simple traducción digital, sino como una **síntesis progresiva** que parte de principios observados manualmente. Esta **relación directa entre análisis gráfico y generación computacional** ha permitido identificar **lógicas de diseño subyacentes**, ampliando así las **posibilidades de reinterpretación y evolución formal**.

La tercera fase aspira a desarrollar y explorar la **traslación de lo investigado hacia la práctica constructiva mediante fabricación digital**. Sin embargo, por cuestiones inherentes al marco temporal de un *Trabajo Final de Grado*, estas indagaciones han quedado acotadas al plano teórico. A pesar de ello, es precisamente este el territorio donde **las ideas toman cuerpo y se materializan**. De igual manera que sucede con el lenguaje, **investigar y poner en práctica nuevas vialidades constructivas** constituye una de las formas más enriquecedoras de **acompañar a los flujos de nuestro mundo** en sus **protocolos y maneras de generar vida**.

En la **era digital**, donde **percepción, lenguaje y práctica se transforman**, el arquitecto debe **redefinir su papel como agente cultural y técnico**. Aunque este trabajo no ofrece soluciones definitivas, **sí plantea una vía metodológica que integra pensamiento gráfico, análisis morfológico y diseño generativo**. Así, contribuye al **estudio instrumental de las geometrías arquitectónicas**, en diálogo con una **tradicción en constante renovación**.

En este sentido, resulta indispensable situar este trabajo dentro

del contexto del **giro digital**. Vivimos en una era donde la vida individual y social se desarrolla y comparte en lo digital. La **expansión de nuestras percepciones**, la **accesibilidad instantánea del conocimiento**, la **redefinición de los sentidos y de lo cotidiano** nos sitúan en una dimensión inconcebible para apenas dos generaciones atrás. Este cambio radical implica, para quien proyecta, un **reajuste profundo de su posición como agente cultural y técnico**. El reto es tan colosal como el que representó en su día la carrera espacial: **colonizar una nueva dimensión de lo real**.

Sin embargo, la arquitectura —y la práctica proyectual en general— **no puede reducirse a una interfaz tecnológica**. En un mundo cada vez más entrelazado con lo digital, **conectar con la naturaleza y con sus ritmos menos frenéticos** se vuelve un acto **político, poético y vital**. Esta conexión preserva en nosotros aquella **sensibilidad que nos hace humanos**, que nos permite **empatizar, habitar y cuidar**. Por eso, **repensar el lenguaje con el que proyectamos**, las formas en que lo aprendemos y las herramientas con las que lo practicamos, no es solo un gesto técnico, sino una **necesidad epistemológica**: una manera de **resistir a la banalización y recuperar el sentido profundo de proyectar como forma de conocimiento**.

La arquitectura, tal y como afirmaba *William Morris*, puede ser tan inerte como los desiertos donde se ausenta. No por ello carece de la capacidad de ser sensible, de **acompañar a las personas en sus momentos vitales**. En este contexto, la **fabricación digital** no representa únicamente un nuevo medio técnico, sino un **peldaño hacia métodos constructivos más versátiles, adaptables y conscientes del entorno material y social**. Ofrece la posibilidad de **proyectar desde la inteligencia geométrica, integrar sostenibilidad desde el diseño y construir no solo con precisión, sino también con propósito**.

Aunque este trabajo no ofrece soluciones definitivas ni herramientas funcionales cerradas, **sí plantea una vía metodológica para futuras investigaciones que busquen integrar pensamiento gráfico, análisis morfológico y diseño generativo**. En este sentido, se considera cumplido el propósito de **aportar una mirada instrumental al estudio de las geometrías arquitectónicas**, en sintonía con una tradición proyectual que se renueva constantemente mediante **nuevas técnicas y sensibilidades**.

Finalmente, este trabajo **aspira a ser útil para investigaciones posteriores** que deseen articular el potencial de las herramientas digitales desde una **base observacional y crítica**.

BIBLIOGRAFÍA

Libros (I)

Burry, M., & Burry, J. (2010). *The new mathematics of architecture*. London: Thames & Hudson.

Carpó, M. (2011). *The alphabet and the algorithm*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Carpó, M. (2017). *The second digital turn: design beyond intelligence*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Carpó, M. (2023). *Beyond digital: design and automation at the end of modernity*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Choma, J. (2015). *Morphing: a guide to mathematical transformations for architects and designers*. Londres: Laurence King Publishing.

Clark, R. H., & Pause, M. (2005). *Arquitectura: temas de composición*. Barcelona: Gustavo Gili.

Dunn, N. (2012). *Digital fabrication in architecture*. London: Laurence King Publishing.

Foelix, R. F. (2010). *Biology of spiders* (3rd ed.). Oxford: Oxford University Press.

Ghyka, M. C. (1977). *The geometry of art and life*. New York: Dover.

Gómez Pioz, E. J. (2018). *Arquitectura biónica: principios*. Madrid: Munilla-Lería.

Gómez Pioz, E. J. (2019). *Diccionario híbrido: diccionario de*

Libros (II)

terminología arquitectónica postmoderna. Madrid: Munilla-Lería.

Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (Eds.). (2017). *Fabricate: negotiating design & making*. London: UCL Press.

Grigoriadis, K., & Lee, G. (2024). *Construction and design manual: 3D printing and material extrusion in architecture*. Berlin: DOM Publishers.

Haeckel, E. (1974). *Art forms in nature*. New York: Dover.

Knippers, J., Schmid, U., & Speck, T. (2019). *Biomimetics for architecture: learning from nature*. Basel: Birkhäuser.

Litinetski, I. B. (1975). *Iniciación a la biónica*. Barcelona: Barral Editores.

Mandelbrot, B. B. (1983). *The fractal geometry of nature*. New York: W. H. Freeman.

Marble, S. (2012). *Digital workflows in architecture: design, analysis, fabrication*. Basel: Birkhäuser.

Otto, F. (2009). *Occupying and connecting: thoughts on territories and spheres of influence to human settlement*. Stuttgart: Axel Menges.

Otto, F., & Nerdinger, W. (2005). *Frei Otto: complete works, lightweight construction, natural design*. Basel: Birkhäuser.

Libros (III)

Pearce, P. (1978). *Structure in nature is a strategy for design*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Picon, A. (2010). *Digital culture in architecture: an introduction for the design professions*. Basel: Birkhäuser.

Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., & Kilian, A. (2007). *Architectural geometry*. Exton, PA: Bentley Institute Press.

Artículos, revistas, publicaciones

Gramazio, F., & Kohler, M. (2014). *Made by robots: challenging architecture at a larger scale*. London: John Wiley & Sons.

Schumacher, P. (2010). Parametricism 2.0: Rethinking architecture's agenda for the 21st century. *Architectural Design*, 80(2), 14–23. <https://doi.org/10.1002/ad.1027>

