

Morfogénesis. Experimentaciones proyectuales devenidas de extrapolaciones algorítmicas

María Jimena Escoriaza, Beatriz Ojeda y
Facundo Lerda ⁽¹⁾

Resumen: El presente artículo indaga sobre las relaciones entre fenomenología, experimentación y diseño generativo, proponiendo una lectura contemporánea de los procesos de generación morfológica en arquitectura a partir del pensamiento de Gastón Bachelard. Desde una perspectiva proyectual y experimental, el trabajo explora mecanismos biomorfológicos —algoritmos genéticos, sistemas-L y autómatas celulares— como procedimientos capaces de transferirse desde las ciencias naturales hacia los procesos de diseño arquitectónico.

La investigación se desarrolla en el marco de la Cátedra de Proyecto Final y del Instituto de Diseño y Experimentación Arquitectónica (IDEA), entendiendo la experimentación como una herramienta de búsqueda y construcción de conocimiento disciplinar. En este sentido, el diseño generativo es abordado no sólo como una técnica computacional, sino como un campo intermedio entre lo concreto y lo abstracto, donde la observación sensible, la imaginación y la representación geométrica se entrelazan.

A partir de la lectura de *La formación del espíritu científico* y *La poética del espacio*, el artículo propone comprender los procesos algorítmicos como mecanismos de abstracción capaces de traducir fenómenos biológicos en operaciones proyectuales. Las experimentaciones desarrolladas mediante herramientas digitales como Grasshopper, Processing y simulaciones físicas permiten analizar cómo determinados sistemas autoorganizativos producen configuraciones morfológicas complejas, adaptativas y evolutivas.

Finalmente, la investigación aplica autómatas celulares al desarrollo de un proyecto arquitectónico en Puerto Madero, explorando relaciones entre radiación solar, densidad urbana y crecimiento formal. Las lecturas entrelazadas entre biología, matemática, fenomenología y arquitectura permiten concluir que los mecanismos generativos constituyen instrumentos sensibles y experimentales para el rediseño constante del proceso proyectual, articulando intuición, abstracción y experiencia en la construcción contemporánea de la forma arquitectónica.

Palabras clave: diseño generativo - algoritmo - experimentación proyectual - innovación

[Resúmenes en inglés y portugués en las páginas 155-156]

⁽¹⁾ Ver CVs en pp. 156-157

1. Introducción

Experimentación como herramienta de búsqueda de nuevas operaciones de generación morfológicas hacia el diseño arquitectónico, es entre otros, el objeto de la Cátedra de Proyecto Final, FAUD Sede San Rafael, parte del Instituto de Diseño y Experimentación Arquitectónica (IDEA).

Experimentación, basada en el diseño generativo (algorítmico), inspirado en mecanismos bio-morfológicos (matemáticos o computacionales) que pudieran ser utilizados como insumos para el accionar softwares (inteligencias artificiales) que aporten al estudio de la generación morfológica en procesos de diseño arquitectónico, es el objeto del Trabajo Final de grado: Morfogénesis.

Entendemos que el uso de algoritmos para generar, simular y optimizar formas está en un estado de expansión en el campo del diseño y la investigación. El presente trabajo permitiría realizar un aporte al conocimiento disciplinar en términos de innovación proyectual a partir de los enfoques planteados. Más allá de la exposición de las indagaciones conceptuales y experimentaciones del Trabajo Final de grado, la propuesta apunta en principio a reflexionar dónde, cómo y a través de qué, las extrapolaciones algorítmicas van de una disciplina hacia otra. Por otro lado, se trata de adoptar de alguna manera, la capacidad de observación y experimentación de las ciencias naturales como herramienta de interpretación de fenómenos arquitectónicos, eso que sucede entre lo concreto y lo abstracto. Y finalmente, dar luz desde la mirada del filósofo Gastón Bachelard en línea con el eje planteado en el presente cuaderno.

2. Marco Conceptual (Bachelard + diseño generativo)

Oportuno es citar las primeras líneas del apartado de las “Palabras preliminares” del texto “La formación del espíritu científico” del filósofo: “

Tornar geométrica la representación, vale decir dibujar los fenómenos y ordenar en serie los acontecimientos decisivos de una experiencia, he ahí la primera tarea en la que se funda el espíritu científico. En efecto, es de este modo como se llega a la cantidad representada, a mitad camino entre lo concreto y lo abstracto, en una zona intermedia en la que el espíritu pretende conciliar las matemáticas y la experiencia, las leyes y los hechos”. (Bachelard, 1938)

Y... ¿Cómo interpretan las disciplinas del diseño esas relaciones de ida y vuelta *entre* lo concreto y lo abstracto ?

Se considera como abstracta una cosa sustraída de la realidad tal como se da intuitivamente, de modo que, apartada de lo sensible se concibe como algo para el entendimiento, para el pensamiento. Por el contrario, es concreto el mundo sensible de la intuición inmediata. Podríamos decir que el momento

principal de lo abstracto es lo general, apartado de la referencia particular, singular o individual de lo concreto. (Compendio de epistemología, 2000)

La abstracción es la consideración aislada de las cualidades esenciales de un objeto, o del mismo objeto en su pura esencia o noción; podría explicarse como la concentración del pensamiento: idealización, conceptualización. Lo concreto es lo dicho de un objeto, considerado en sí mismo, que resulta de un proceso material; particularmente en oposición a lo abstracto y general, con exclusión de cuanto pueda serle extraño o accesorio.

Se podría decir que Bachelard entendía ese *entre*, posicionando a la observación sensible de lo vivo y a lo experimental como punto de inicio hacia la representación geométrica, alejándose de los métodos rigurosos de investigación científica. Hoy, ese *entre* en el diseño puede tomar el mismo punto de partida y arrojar esas representaciones geométricas resultantes de acciones digitales (IA). Esto sería, en ejemplos del texto “La poética del espacio”: la concha, el nido, objetos concretos, de la realidad física, que pasan por el tamiz sensible, imaginario, intuitivo, experimental del diseñador para convertirse en mecanismos experimentales de generación de la forma proponiendo una abstracción que permita a partir de ella, la reconstrucción un nuevo modelo concreto que es devuelto al plano real.

Estas posturas *experimental* y *bachelardiana* fundan el camino en la manera de generar conocimiento en las disciplinas del diseño partiendo de casos o experimentaciones particulares que van hacia lo general tejiendo una teoría para perfeccionar la técnica.

Respecto a la postura *experimental*, encontramos un anclaje en dos características de la disciplina: anticipatoria y proyectual. La arquitectura es una disciplina anticipatoria, donde intervienen razón e intuición. Su carácter anticipatorio plantea una tarea determinante: la actividad de proyectar (en la acepción de *lanzar, dirigir hacia delante en el tiempo; idear o proponer un plan y los medios para la ejecución de algo*), que involucra a su vez la noción de proceso. Si bien la disciplina se basa en teorías, prácticas y técnicas establecidas académicamente, la actividad proyectual introduce una dimensión personal y creativa con variables particularmente subjetivas que son determinantes de su producción.

Esta postura podría plantearse como un método de aproximación a los modos de hacer y de pensar en la disciplina, que incluya instrumentos apropiados para operar entre la complejidad exterior y creatividad interior. En ambas líneas, la creativa y la técnica, se trata de un conocimiento que se construye desde la experiencia, desde el hacer; teniendo como marco conceptual el método fenomenológico.

La experiencia, como proceso de conocimiento, va ligada a un proceso inductivo del que proviene de las sensaciones (capacidad de retener impresiones sensibles) más la capacidad de sistematizarlas a través de la memoria (acumulación y condensación de impresiones sensibles particulares) que resulta en una única experiencia. Es la supervivencia de lo general, de lo uno en lo múltiple, de lo que hay en común entre los múltiples objetos percibidos. Esto constituye a su vez el principio de la *téchne*, en el conocimiento práctico y de la *episteme*, en el teórico.

Se trata de un proceso que inicia con experimentaciones prácticas, amplias e intensas, y que se consolida en un abordaje conceptual, integral y riguroso. Las experiencias prácticas, el hacer, se convierten en conocimiento solo por medio de la reflexión que las acompaña, por el pensamiento que les construye sentido. Son operaciones mentales que

transitan desde lo específico y particular de una experiencia, hacia lo general y amplio del conocimiento. De este modo, las prácticas inician con la indagación de lo concreto, de lo real; para discurrir hacia lo abstracto, en términos de extraer valores y representaciones de lo real; y de enfrentar el plano del pensamiento y la construcción de sentido para aportar a una transferencia y aplicación proyectual.

Para iniciar el recorrido, planteamos unas definiciones concisas de los conceptos principales, que no pretenden ser definitivas, sino que procuran un punto de partida para seguir construyendo argumentaciones en las líneas planteadas.

- **Diseño.** El diseño es una actividad intelectual y práctica, configuración mental preliminar, que antecede a la búsqueda de soluciones para que un objeto resulte útil, atractivo y significativo para la vida de las personas y las comunidades. La imaginación de un objeto, es decir, su concepción, atiende a aspectos como forma, materialidad, funcionalidad, operatividad y la vida útil.

- **Generativo.** De generación (acción de generar) o relacionado con ella. la capacidad de generar, producir, crear o reproducir algo, refieren a procesos que originan nuevos elementos —como datos, arte o ideas— en lugar de solo analizarlos y clasificarlos.

3. Marco metodológico

La organización de tareas para el desarrollo del trabajo deviene del método fenomenológico enunciado en el marco conceptual, en lo que se refiere al conocimiento que se construye desde la experiencia. Experimentación como método o sistema de reglas que trascienden el ámbito subjetivo y proporciona un conocimiento objetivo. El desarrollo del trabajo se organiza en tres apartados:

- Presentación y análisis de tres casos donde el diseño generativo (algorítmico) se puede dar en el campo de exploración de procedimientos transferidos desde la biología. Esto se puede dar a través de mecanismos naturales, computacionales matemáticos o lógicos observando si son capaces de aprender, adaptarse y evolucionar como sistemas adaptables y autoorganizables y cuál podría ser su incidencia en la generación morfológica arquitectónica.
- Experimentaciones de diseño generativo (algorítmico) a partir de los mecanismos anteriormente expuestos soportados por herramientas como Grasshopper, Processing IA y otras simulaciones físicas tendientes a estudiar su aplicabilidad en la generación morfológica de los procesos de diseño arquitectónicos. Se busca extraer una metodología de diseño basada en principios de autoorganización.
- Aplicación del mecanismo de diseño generativo más en un proyecto arquitectónico concreto.

Posteriormente, las lecturas entrelazadas intentan desde una mirada metodológica, fenomenológica, crítica y proyectual construir aportes al conocimiento disciplinar. Lecturas entrelazadas que dan lugar a la discusión de los resultados, y a definir aportes y conclusiones del trabajo.

4. Casos

4.1 [Algoritmo genético]

Los algoritmos genéticos (Genetic Algorithms: GA) fueron popularizados por John Holland y desarrollados por él y sus estudiantes y colegas. Esto llevó a su hoy ya clásico libro Adaptación en Sistemas Naturales y Artificiales (*Adaptation in Natural and Artificial Systems*) publicado en el año 1975.¹

Un algoritmo genético es una técnica de búsqueda y optimización basada en la idea de la evolución biológica. Funciona creando una población de soluciones posibles que evolucionan a lo largo de generaciones, mejorando en cada iteración.

La selección natural se basa en la selección de los individuos más aptos de una población, estos producen descendencia que hereda características de los padres y será añadida a la siguiente generación. Si los padres tienen buenas características, sus hijos serán mejores y tendrán mayores posibilidades de sobrevivir. El propósito final es encontrar la mejor solución posible que maximice o minimice la función objetivo, dependiendo del problema a resolver. Charles Darwin utilizó el cuello de la jirafa como ejemplo de evolución y selección natural. Darwin dijo que el cuello del animal había crecido en longitud por millones de años, lo que le permitía alcanzar las ramas más altas de los árboles para alimentarse. (Darwin, Charles 1859)



Figura 1. Algoritmo Genético basado en Selección Natural. Imagen del autor.

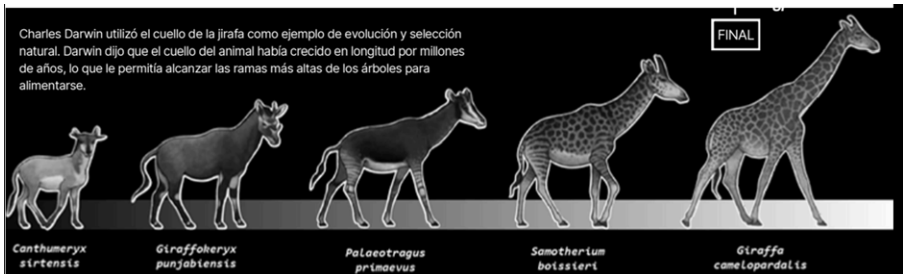


Figura 2. Evolución de las jirafas.²

Ejemplo: “Galápagos” (1997) Karl Sims / Evolución artificial interactiva

La obra se instaló en el NTT Inter Communication Center [ICC] de Tokio de 1997 a 2000 y se exhibió en el Museo DeCordova de Lincoln, Massachusetts, como parte de Make Your Move: Arte Informático Interactivo y el Festival de Ciberartes de Boston de 1999.³

Galápagos es una evolución darwiniana interactiva de “organismos” virtuales. Doce computadoras simulan el crecimiento y el comportamiento de una población de formas abstractas animadas y las muestran en doce pantallas dispuestas en arco. (Fig.3)

- Funcionamiento: Se muestra una población inicial de criaturas 3D. El espectador selecciona sus favoritas. El sistema aplica cruce y mutación para generar nuevas criaturas. Cada generación evoluciona con las decisiones del público.

- Concepto clave: El público actúa como “naturaleza”, guiando un proceso evolutivo. La estética final surge del algoritmo + participación humana.

- Elementos: 1. Gen: Parámetros de forma y movimiento; 2. Cromosoma: Configuración total de la criatura; 3. Recombinación: combinación de criaturas seleccionadas; 4. Mutación: Cambios aleatorios en los genes; 5. Final: Preferencia subjetiva del espectador.

Las dos imágenes (Fig. 4) muestran un “progenitor” en la esquina superior izquierda, y los 11 restantes son “descendientes” de ese progenitor. Las mutaciones causan diversas diferencias entre los descendientes y sus progenitores.

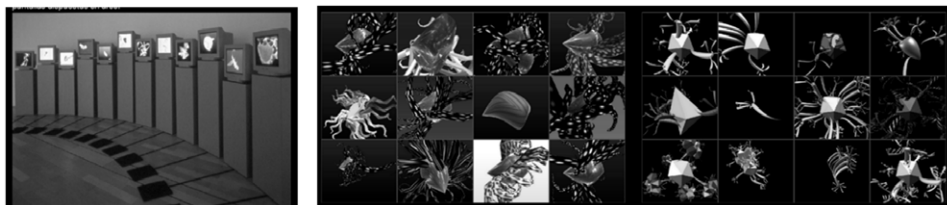


Figura 3. Galápagos. 1997. **Figura 4.** Organismos digitales evolutivos.

4.2 [L-systems]

Los sistemas de Lindenmayer, o sistemas “L”, fueron concebidos en 1968 por el biólogo húngaro Aristid Lindenmayer como una teoría matemática del desarrollo vegetal. Se trata de un lenguaje formal compuesto por un conjunto de reglas y símbolos, utilizado principalmente para modelar el proceso de crecimiento de las plantas, aunque también puede representar la morfología de una amplia variedad de organismos. Están compuestos por:

1. Variables: (el alfabeto) Es un conjunto de símbolos que contiene elementos que pueden ser reemplazados.

2. Constantes: Es un conjunto de símbolos que contiene elementos que se mantienen fijos.

3. Axioma: Cadena de símbolos que definen el estado inicial del sistema.
4. Reglas: Definen la forma en la que las variables pueden ser reemplazadas por combinaciones de constantes y otras variables.



Figura 5. Escena modelada digitalmente utilizando L-systems.⁴

Ejemplo: l-system: ramificado simple. Cladophora [cladophoraceae]

Cladophora es un alga filamentososa se caracteriza por una estructura jerárquica compuesta por células que se ramifican de manera regular, formando redes tridimensionales. El sistema de reglas adoptado para este ejemplo es: $F \rightarrow F[+F]F[-F]F$ que representa un modelo de ramificación simple que guarda similitud con el patrón de crecimiento.

Este tipo de crecimiento fue una de las motivaciones originales de Aristid Lindenmayer en 1968 al formular su teoría, buscando describir con precisión los procesos morfogenéticos de organismos simples. El uso de L-Systems permitió representar no solo la estructura externa de estas algas, sino también las reglas internas que rigen su desarrollo.⁵

Elementos utilizados:

Axioma (estado inicial) F

Variables (símbolos que pueden ser reemplazados) F

Constantes (símbolos fijos) $+, -, [,]$

Reglas (forma en que las variables pueden ser reemplazadas) $F \rightarrow F[+F]F[-F]F$

Iteraciones:

0) F

1) $F[+F]F[-F]F$

2) F[+]F[-]F[+][+]F[-]F[+]F[-]F[-][+]F[-]F[+]F[-]F

[illegible]

Símbolos:
 F: dibuja una línea hacia adelante
 ±: gira a la derecha (ej. 25°)
 -: gira a la izquierda (ej. 25°)
 [: guarda posición y ángulo (inicio de rama)
]: restaura posición y ángulo (fin de rama)



Figura 6. Ramificado simple GIF.
 Secuencia del autor.



Figura 7.
 Cladophora 1⁶
 Cladophora 2⁷

4.3 [Autómatas celulares]

Los autómatas celulares fueron desarrollados inicialmente en la década de 1940 por John von Neumann, cuando intentaba modelar una máquina que fuera capaz de autorreplicarse, llegando así a un modelo matemático de dicha máquina con reglas complicadas sobre una red rectangular.

Inicialmente fueron interpretados como conjunto de células que crecían, se reproducían y morían a medida que pasaba el tiempo. Su nombre se debe a esta similitud con el crecimiento de las células. Más tarde, fueron estudiados y popularizados por Stephen Wolfram, y ampliados en el campo de la vida artificial por Chris Langton. Los AC son sistemas computacionales discretos que modelan cómo evoluciona un conjunto de celdas (generalmente organizadas en una grilla) en el tiempo, según reglas locales.

Los elementos que los constituyen son: 1. Célula: Unidad que cambia de estado; 2. Región: Espacio donde evoluciona, dividido en un número homogéneo de subespacios que forman las células. 1D, 2D, 3D; 3. Estado inicial: Configuración de las células al principio; 4. Vecindad: Conjunto de células cercanas a la célula inicial. Existen diferentes vecindades: V. de Von Neuman / V. de Moore; 5. Reglas de transición: Definen cómo evolucionan las células según su vecindad.

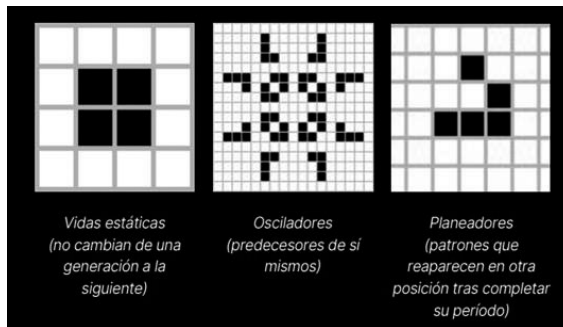
Ejemplo: Juego De La Vida - John Conway

El Juego de la vida es un autómata celular diseñado por el matemático británico John Horton Conway en 1970. Es un juego de cero jugadores, en el que su evolución es determinada por un estado inicial, sin requerir intervención adicional. Se considera un sistema Turing completo que puede simular cualquier otra Máquina de Turing.⁸ (Figura 8)

Ejemplo: Regla 30 (1983) Stephen Wolfram

La Regla 30 es un autómata celular binario unidimensional presentado por Stephen Wolfram en 1983. Wolfram la describió como su “regla favorita de todos los tiempos” y da detalles en su libro ‘A New Kind of Science’. Según el esquema de clasificación de Wolfram, la regla 30 es una regla de Clase III, que muestra un comportamiento aperiódico y caótico. Wolfram cree que la Regla 30 y los autómatas celulares en general, son la clave para comprender cómo las reglas simples producen estructuras y comportamientos complejos en la naturaleza, aparentemente aleatorios, resultantes de reglas simples y definidas.

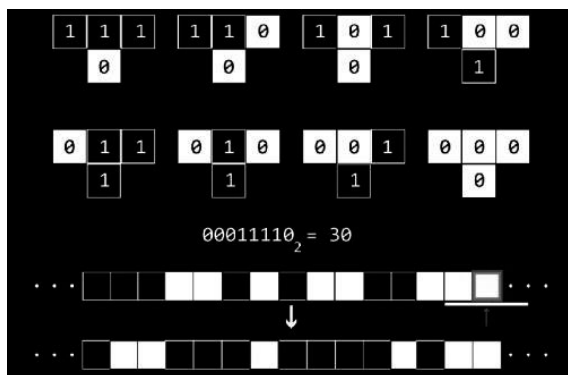
La Regla 30 se denomina así porque 30 es el código Wolfram más pequeño que describe su conjunto de reglas. La imagen especular, el complemento y el complemento especular de la Regla 30 tienen códigos Wolfram 86, 135 y 149 respectivamente. (Figuras 9 y 10)



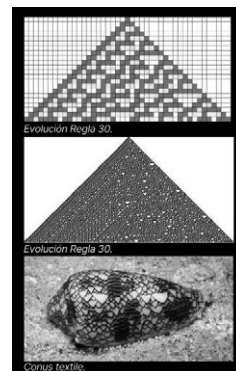
8

Figura 8. GIF osciladores y planeadores.⁹

Figura 9. Esquema de evolución de la Regla 30. [00011110 en binario = 30 en decimal] Imagen del autor. **Figura 10.** Una concha similar en apariencia a la regla 30.¹⁰



9



10

5. Experimentaciones. De bio-morfológicos a arquí-morfológicos

En esta etapa se ponen en práctica los mecanismos de diseño generativo bio-morfológicos expuestos en la fase de anterior a través de pruebas iterativas apoyados en Grasshopper a fin de experimentar el mecanismo en su aplicación arquitectónica y las diversas configuraciones formales y estructurales que podrían derivar de ello. El objetivo no es obtener un resultado final, sino comprender el comportamiento emergente de cada mecanismo y su potencial para definir una lógica de crecimiento o una lógica generativa aplicada a diferentes estrategias de crecimiento.

Por decisión del proyectista, el objeto a diseñar es un elemento lineal (vertical u horizontal) que permita a lo largo de éste visibilizar los resultados morfológicos a fin de poder evaluarlos. Se requiere que la torre esté inserta en un contexto de alta densidad urbana de modo que las edificaciones vecinas puedan otorgar condiciones (datos) a utilizar en los diversos mecanismos.

5.1 [Algoritmo genético]

Las torres se generan a partir de un conjunto de parámetros geométricos y evaluativos que definen su forma y comportamiento urbano, inspirados en la lógica estructural de tubos agrupados de la Sears Tower de Chicago. El parámetro principal es la altura individual de cada uno de los tubos verticales que componen la torre, definida mediante valores discretos que permiten múltiples combinaciones volumétricas. A partir de esta variación se construye la morfología general del edificio, produciendo distintos perfiles, escalonamientos y relaciones entre llenos y vacíos. Complementariamente, el sistema incorpora parámetros de evaluación, como el área total construida y la proyección de sombras sobre el entorno, que no modifican directamente la geometría, pero condicionan la selección y filtrado de las configuraciones resultantes. De este modo, la forma final emerge de la interacción entre reglas formales simples y criterios de desempeño urbano.

Se evalúa una población de 30 individuos y su impacto en el entorno. Cada torre generada es analizada según la sombra proyectada sobre el parque y la vivienda vecina. El objetivo es generar poblaciones de variantes morfológicas, evaluar su rendimiento (fitness) y seleccionar las configuraciones óptimas. La torre resultante no es un diseño final, sino un ejemplo del potencial de este método para equilibrar las condiciones del contexto urbano y guiar decisiones de diseño posteriores.

Parámetros de evaluación: Área total: cuantificación de la superficie edificada generada por cada individuo; Área de sombra proyectada: medición del impacto lumínico en superficie urbana, Sombra en el parque: reducción del sombreado sobre el espacio público; Sombra en la vivienda vecina: minimización del impacto sobre edificaciones adyacentes. (Figuras 11 a 14)

El sistema permite ordenar y filtrar las configuraciones según criterios de desempeño (como área construida o impacto de sombras), dejando la decisión final en manos del diseñador. En este sentido, el proceso es generativo y asistido por métricas, pero no constituye un método de optimización evolutiva o automática.

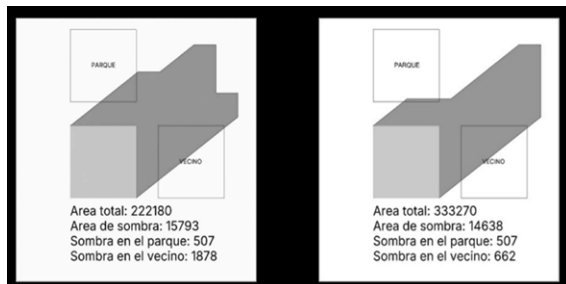


Figura 11. Análisis Comparativo de individuos. Imagen del autor en base a tutorial Digital design unit.

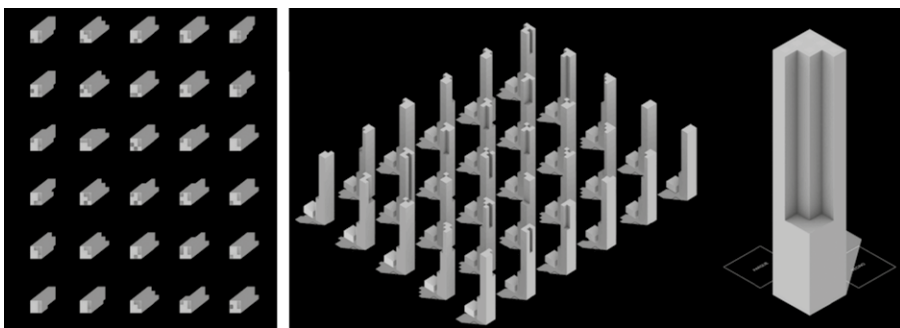


Figura 12. Población analizada (planta). **Figura 13.** Población analizada (axonométrica). **Figura 14.** Individuo óptimo según criterios de diseño. Imágenes del autor.

5.2 [Experimentación L-Systems]

El presente caso, basado en procesos de reescritura simbólica que generan estructuras ramificadas a partir de reglas internas, no requieren de parámetros contextuales como los son los algoritmos genéticos y los autómatas celulares, por lo que, los resultados no logran contenerse en la “línea o torre” planteada. Cada arista F se reemplaza por una nueva secuencia. En este caso, se reemplaza por una línea con un desvío triangular, trazada por la secuencia F+F--F+F. Cada generación todas las F son reemplazadas nuevamente.

Elementos:

Axioma (estado inicial): F

Variables (símbolos que pueden ser reemplazados): F

Constantes (símbolos fijos): +, -,

Reglas (forma en la que las variables pueden ser reemplazadas): $F \rightarrow F+F--F+F$

Generaciones: 6

Ángulo: 60°

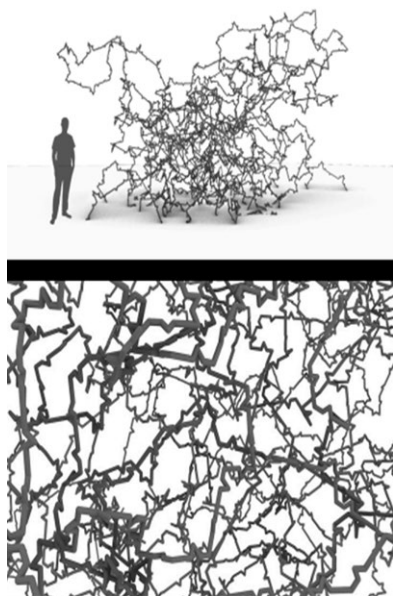


Figura 15. Evolución tridimensional L-systems
Imagen del autor.

5.3 [Experimentación autómatas celulares. experimentación]

Se desarrolló un experimento de autómatas celulares tridimensionales aplicado a un terreno urbano ubicado en la ciudad de San Rafael (Mendoza). El modelo se estructuró mediante una discretización espacial en voxes de $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ m, incorporando como parámetros predefinidos el archivo climático EPW de San Rafael, la orientación según norte geográfico, la geometría del entorno construido y los límites del terreno. Asimismo, se establecieron parámetros definidos por el usuario o diseñador: una altura objetivo de 18 iteraciones del autómata (equivalentes a aproximadamente 9 m, es decir, tres niveles arquitectónicos) y un porcentaje de volumen construido del 50%, lo que permitió definir un marco de control global sobre el crecimiento del sistema. Las configuraciones resultantes no responden a una forma predeterminada, sino que emergen del comportamiento iterativo del autómata celular, evidenciando el potencial de este enfoque para la exploración morfológica en contextos urbanos reales.

Parámetros predefinidos: Archivo climático (EPW-San Rafael); Norte geográfico; Geometría del contexto, Límites del terreno.

Parámetros definidos por el usuario: Tamaño vóxel: $0,5\text{m} \times 0,5\text{m} \times 0,5\text{m}$; Altura deseada: 3 niveles – 9 metros; Porcentaje de volumen objetivo: 50%

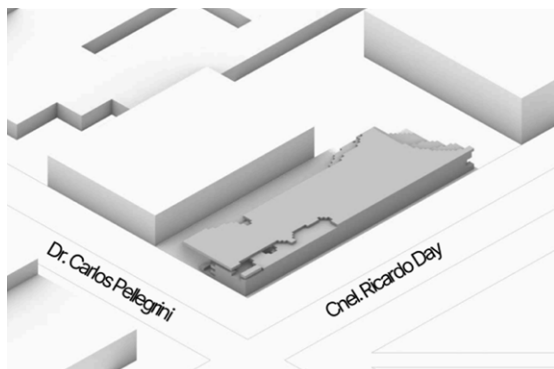


Figura 12.
Video del autor.¹¹

6. Aplicaciones. De autómatas celulares a proyecto arquitectónico

El presente apartado intentará poner en práctica el sistema de diseño generativo elegido. Este se concibe como un ecosistema artificial donde la forma no se impone, sino que evoluciona a partir de las condiciones del entorno.

Al igual que en la ciencia, donde un organismo desarrolla su estructura en función de un contexto óptimo para su adaptación, aquí el modelo interpreta los parámetros urbanos, climáticos y morfológicos de Puerto Madero como el hábitat que orienta su desarrollo. La arquitectura emerge, así como un fenómeno evolutivo: un equilibrio dinámico entre las reglas internas del sistema y las fuerzas externas del contexto.

La narrativa del proyecto va desde el **contexto** a través del **mecanismo** hacia la **morfología** arquitectónica.

6.1 [Herramienta: GRASSHOPPER]

Grasshopper 3D es un lenguaje y entorno de programación visual que funciona dentro del software de modelado CAD Rhinoceros 3D. Fue desarrollado por David Rutten de Robert McNeel & Associates y se utiliza principalmente para crear algoritmos generativos aplicados al diseño.

En este proyecto se lo concibe no sólo como una herramienta de modelado paramétrico, sino como un organismo artificial capaz de interpretar y responder a las condiciones del hábitat urbano, en este caso, Puerto Madero. A través de reglas, iteraciones y simulaciones, el sistema evoluciona en función de parámetros externos como la radiación solar, la densidad del entorno o la estructura portante, generando una forma arquitectónica que emerge del equilibrio entre contexto y algoritmo.

El sistema pertenece al campo de la inteligencia artificial generativa basada en reglas. A diferencia del aprendizaje automático, no aprende de datos, sino que genera soluciones a partir de reglas predefinidas.

6.2 [Herramienta: SDCA]

El SDCA (Solar Driven Celular Automata = Autómatas celulares impulsados por energía solar) fue creado por Seth Luitjohan (SIU Carbondale), Mehdi Ashayeri (SIU Carbondale) y Narjes Abbasabadi (UTA). Se considera una forma de inteligencia artificial aplicada al diseño generativo que utiliza autómatas celulares como sistema de reglas locales que generen soluciones emergentes, vinculadas con simulaciones ambientales, para producir formas arquitectónicas que responden de manera inteligente al contexto (Luitjohan, 2022). Se propone un framework de optimización que integra simulación solar (ladybug + epw) + Autómatas celulares (ac) como sistema generativo + Grasshopper + anemone + rabbit para la iteración. El objetivo es generar formas arquitectónicas en entornos urbanos densos que maximicen la radiación solar incidente (sri) en fachadas. En síntesis es IA **generativa** basada en **reglas simples**.

La hipótesis proyectual entiende la forma como un resultado evolutivo, donde el sistema generativo actúa como un organismo que se adapta al medio urbano mediante procesos de simulación y ajuste continuo.

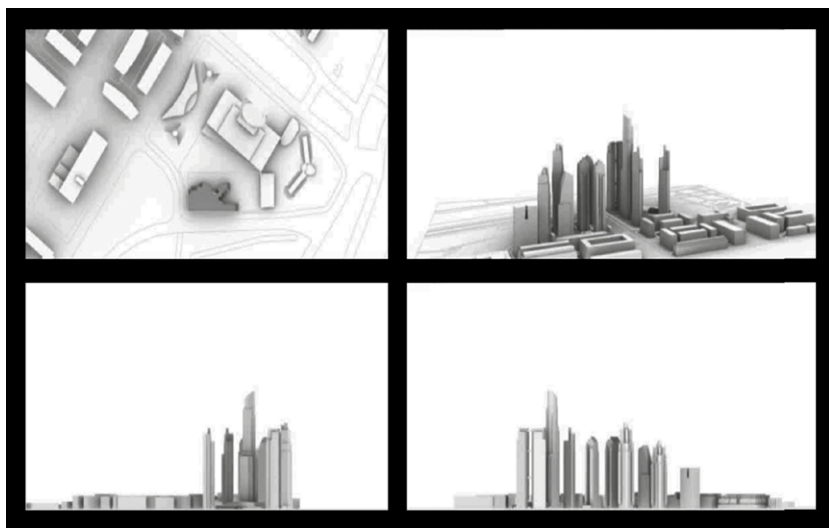


Figura 17. Crecimiento del sistema SDCA aplicado a Puerto Madero VIDEO del autor.¹²

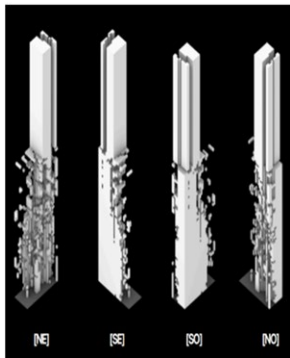
6.3 [Procedimiento]

Paso 1: [Construcción de forma paramétrica]

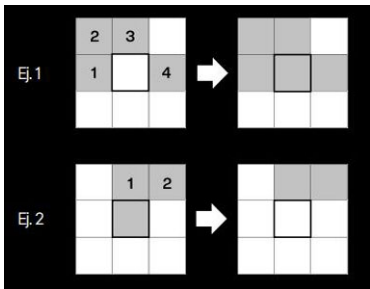
Parámetros predefinidos: Archivo climático (EPW- Buenos Aires,); Norte geográfico: XX° (según archivo/proyecto); Geometría del contexto; Límites del terreno.
Parámetros definidos por el usuario: Tamaño de la cuadrícula (vóxels); Periodo de análisis; Altura deseada (niveles); Porcentaje del volumen objetivo
El resultado es un poliedro 3d optimizado según criterios de radiación y altura, cuya forma presenta imperfecciones, ruido y elementos faltantes y sobrantes. (Figura 18)

Paso 2: [Mejora de forma mediante autómatas celulares]

Parámetros: Poliedro 3d (resultado paso1); Reglas para definir el autómata celular (AC).
Reglas AUTÓMATA CELULAR: Se utiliza un vecindario de Moore: 8 vecinas, 4 en cada lado y 4 en cada esquina; Una celda vacía se activa cuando tiene 4, 5, 6,7 u 8 celdas vecinas ocupadas; Una celda ocupada se desactiva cuando solo tiene 0, 1 o 2 celdas vecinas ocupadas. (Figuras 19, 20 y 21)



18



19

Figura 18. Generación de forma paramétrica. Imagen del autor.
Figura 19. Reglas del Autómata Celular.

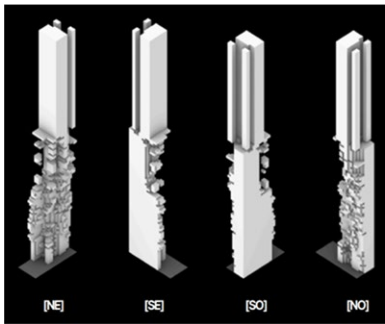


Figura 20. Optimización de forma paramétrica mediante AC. Imágenes del autor

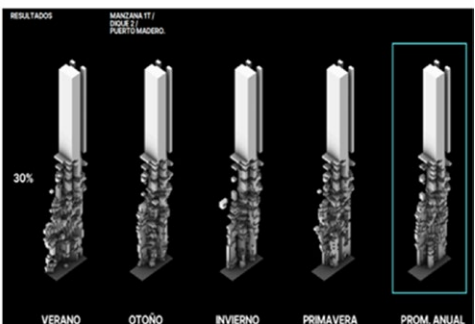


Figura 21. Configuraciones morfológicas según radiación estacional. Imágenes del autor

Paso 3: [Dimensiones variables]

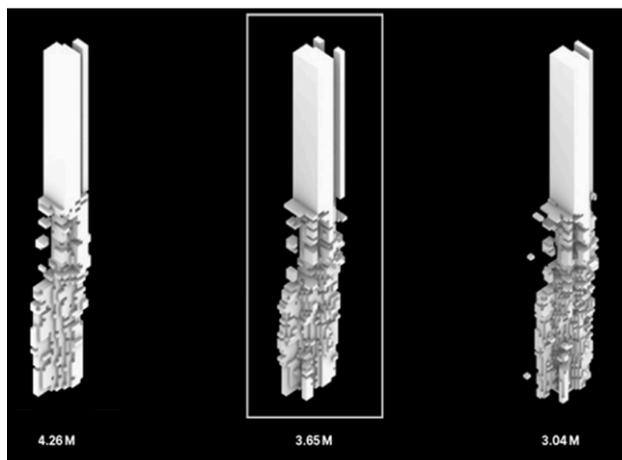
Una vez ejecutado el autómatas celular en su contexto, se ensayaron tres tamaños distintos de voxel. En este sistema, cada capa horizontal de voxels constituye un nivel habitable. Por lo tanto, la dimensión del voxel afecta directamente la altura entre niveles y la proporción general de la torre. Se seleccionó la escala intermedia por ofrecer un equilibrio entre habitabilidad y riqueza morfológica.

Asimismo, se observa que en los niveles inferiores la cantidad de voxels disminuye debido a las sombras proyectadas por el contexto inmediato. A medida que la torre supera estas interferencias y deja de recibir condicionantes externos, el crecimiento se estabiliza y continúa de manera más recta y continua. (Figura 22)

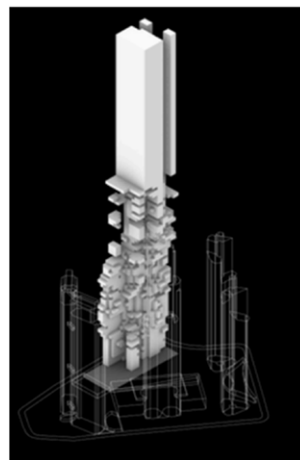
Paso 4: [Condiciones finales de diseño]

Clima, altura y densidad son los parámetros que estructuran las condiciones finales del modelo. La cuadrícula establece la resolución del sistema, el análisis anual incorpora el comportamiento climático, la altura fija el límite vertical y el volumen objetivo regula la densidad construida.

- Tamaño de la cuadrícula: 3.65×3.65×3.65m
- Período de análisis: anual
- Altura: 110 niveles
- Porcentaje del volumen objetivo: 30%



22



23

Figura 22. Variación formal según tamaño de voxel Imagen del autor.

Figura 23. Resultado formal del proceso generativo. Imagen del autor.

Paso 5: [VALIDACIÓN: radiación incidente]

El mapa de radiación incidente valida el comportamiento del sistema. Se observa que en los niveles inferiores, donde el contexto proyecta mayores sombras, la incidencia solar es menor y coincide con una reducción en la cantidad de voxels. La morfología resultante tiende a retraerse en estas zonas de conflicto y a consolidarse en sectores con mayor exposición, evidenciando una adaptación espacial coherente con las condiciones ambientales

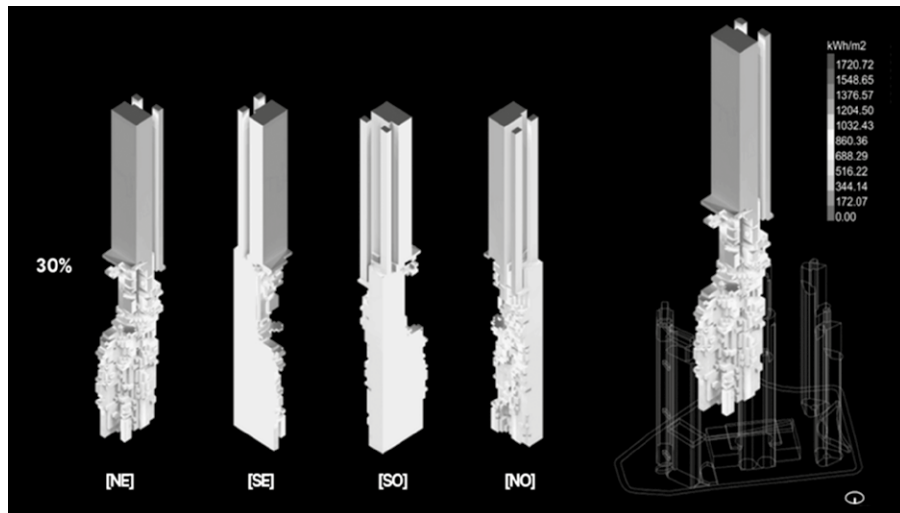


Figura 24. Correlación entre radiación solar incidente y forma arquitectónica resultante. Imagen del autor

7. Discusión y aportes. Observaciones experimentales

Los procesos de diseño generativo a partir de los casos analizados pueden entenderse desde un mismo principio: la generación de formas a partir de reglas, comportamiento y evolución. En particular, los **algoritmos genéticos** simulan la evolución biológica a través de mecanismos genéticos/hereditarios; los **L-systems** describen procesos de crecimiento recursivo a través de mecanismos geométricos y los **autómatas celulares** exploran la morfogénesis a través de mecanismos lógicos a fin de interpretar estructuras morfológicas complejas, cualquiera de ellos de manera natural o computacional.

A la concha le corresponde un concepto tan rotundo, tan seguro, tan duro que, no pudiendo simplemente dibujarla, el poeta se ve reducido a hablar de ella y se encuentra al principio falto de imágenes. Queda detenido, en su evasión hacia los valores soñados, por la realidad geométrica de las formas. Y las formas son tantas, frecuentemente tan nuevas, que la imaginación es vencida por la realidad. Aquí, la naturaleza imagina y la naturaleza es sabia. (Bachelard, 1957)

Cornus textile, elemento concreto, del plano real, de naturaleza compleja, observado, soñado, interpretado por los mecanismos de autómatas celulares alcanzan una **abstracción geométrica** capaz de interpretar morfologías en 2 y 3 dimensiones. Los resultados de las experimentaciones arrojaron que tales abstracciones geométricas permitieron instrumentar las extrapolaciones como mecanismos generativos. es decir, articular algunos recursos abstractos para aplicarse en los procesos de diseño proyectual, promoviendo la generación y **materialización de modelos de arquitectura** evolutiva, adaptable y autoorganizada

Las experimentaciones con **algoritmos biomorfológicos** realizadas en los tres casos se organizaron a partir de sistemas de reglas diseñadas (mecanismo) que, trascendiendo el ámbito subjetivo, proporcionaron un conocimiento lógico-racional. Ese conocimiento, como resultado de la experimentación develó como en cualquier laboratorio, aciertos, errores, coincidencias, disidencias que sentaron criterios para ajustar nuevas experimentaciones a fin de perfeccionar el mecanismo o procedimiento.

No obstante, como el campo del diseño apunta al goce estético, esta construcción de conocimiento también estuvo ligada a los procesos inductivos provenientes de las sensaciones (capacidad de retener impresiones sensibles) incorporándolas a través de la memoria (acumulación y condensación de impresiones sensibles particulares) como insumos sensibles que ayudaron a ajustar el diseño de las reglas con fines morfológicos y concretar así una transferencia **de modelos biológicos al diseño arquitectónico**.

Así, la supervivencia de lo general, de lo uno en lo múltiple, de lo que hay en común entre los múltiples objetos percibidos, constituyó a su vez el principio de la *téchne*, en el conocimiento práctico y de la *episteme*, en el teórico.

Si bien se observó que los tres casos lograron materializar modelos de arquitectura, se optó por **autómatas celulares** debido a su capacidad para integrar parámetros arquitectónicos clave (variables, ambientales y sensibles) como la radiación solar, la orientación y el contexto urbano, dentro del proceso de diseño. La **integración de parámetros generativos dentro del proceso proyectual arquitectónico**, permitió que la morfología resultante sea más dinámica, adaptable y responsiva a los aspectos ambientales y a las necesidades del proyecto. El sistema de generación de torres compartió con los algoritmos genéticos la lógica de explorar múltiples alternativas morfológicas y evaluarlas mediante criterios de desempeño. Sin embargo, a diferencia de los procesos evolutivos, no incorporó mecanismos de selección, cruce o mutación, sino que se basó en una exploración combinatoria del espacio de diseño y en la posterior clasificación de resultados por parte del diseñador.

8. Conclusiones. Lecturas entrelazadas, entrelíneas

Grato es llegar al final del texto y con una lectura retrospectiva, entrelazar resultados, procesos y preguntas de ida y vuelta. Observar el tránsito desde el plano físico y real, hacia el plano abstracto, para volver al real con una nueva propuesta, una y otra vez en trabajo de laboratorio proyectual.

Es sugerente evidenciar el entrelazamiento nacido en la bio.morfología y materializado en arqui.morfología, en proyecto arquitectónico. La transferencia de los mecanismos de

una disciplina a la otra, encuentra ese punto exacto donde se produce la extrapolación, el punto (mecanismo, algoritmo) que es abstracción pura, que no es ni de esta ni de la otra disciplina, sino de ambas. El diseñador puede manipular y entrelazar lo que hay en común entre las múltiples experimentaciones, perfeccionando la técnica en el conocimiento práctico a través del razonamiento. Así, el resultado, esa ecuación abstracta, no es metodológicamente dogmática, sino uno de los miles caminos posibles; constituyendo un instrumento creativo, sensible y flexible que aporta al re.diseño constante del proceso. Es interesante también, descubrir coincidencias que se entrelazan a través de la imagen visual, sensible y poética. Cornus textile, la **ejemplificación del mecanismo** de diseño generativo (autómata celular); la **imagen de la portada** de la 23ra edición del texto de Bachelard de 1938, y el **capítulo sobre La Concha** en el texto del autor de 1957. Bachelard utiliza la concha en la portada de 1938 como una ilustración del obstáculo sustancialista, para mostrar que el espíritu científico debe repensar la experiencia básica (la observación simple y fascinada) para alcanzar el pensamiento abstracto y matemático.

Expresa

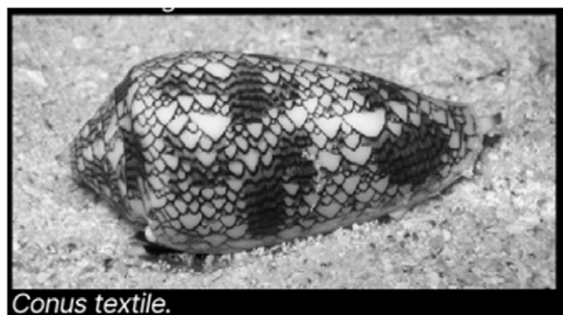
Poco a poco se advierte la necesidad de trabajar debajo del espacio, por así decir, en el nivel de las relaciones esenciales que sostienen los fenómenos y el espacio. El pensamiento científico es entonces arrastrado hacia “construcciones” más metafóricas que reales, hacia “espacios de configuración” de los que el espacio sensible, en definitiva, no es sino un mísero ejemplo. El papel de las matemáticas en la física contemporánea sobrepasa pues, notablemente la simple descripción geométrica. El matematismo no es ya descriptivo, sino formativo. La ciencia de la realidad no se conforma ya con el cómo fenomenológico: ella busca el por qué matemático. (Bachelard, 1938)

En el texto de 1957 inicia el capítulo señalando: “A la concha le corresponde un concepto tan rotundo, tan seguro, tan duro que, no pudiendo simplemente dibujarla, el poeta se ve reducido a hablar de ella y se encuentra al principio falto de imágenes. Queda detenido, en su evasión hacia los valores soñados, por la realidad geométrica de las formas. Y las formas son tantas, frecuentemente tan nuevas, que la imaginación es vencida por la realidad. Aquí, la naturaleza imagina y la naturaleza es sabia”. (Bachelard, 1957)

Más adelante valorando las apreciaciones de Paul Valéry sobre la inteligibilidad de la geometría animal solidificada expresa que: “Es la formación y no la forma lo que es misterioso. Pero en el momento de tomar forma ¡qué decisión de por vida en la elección inicial, que consiste en saber si la concha se enrollará hacia la derecha o hacia la izquierda!” (Bachelard, 1957).

Esta mirada poética sobre la capacidad del animal de diseñar la geometría plasmada encuentra la **posible explicación generativa** en los mecanismos aportados por los autómatas celulares, superando la observación simple y alcanzando la abstracción a partir del orden matemático. Algoritmos traducidos a geometría, ordenadores de fenómenos que develan mecanismos desde de generación morfológica en biología hacia la generación morfológica del diseño arquitectónico.

Y al decir del espacio habitado, para cerrar, Bachelard concibe la imagen poética de la concha como el deseo humano de protección, intimidad y ensoñación funcionando como un cuarto secreto para el alma: “Vamos a dar un ejemplo de una idea-sueño que toma a la concha como el testigo más claro del poder de la vida para constituir formas. Todo lo que tiene forma ha conocido una ontogénesis de concha. El primer esfuerzo de la vida es elaborar conchas”. (Bachelard, 1957)



25



26

Figura 25. Una concha similar en apariencia a la Regla 30. **Figura 26.** Imagen de Portada Bachelard 1938.

Notas

1. <https://www.britannica.com/technology/genetic-algorithm>
2. <https://www.behance.net/gallery/65911719/Evolution-Series/modules/385774431>
3. <https://www.karlsims.com/galapagos/index.html>
4. <https://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop.pdf> Página 190
5. <https://paulbourke.net/fractals/lsys/>
6. <https://es.wikipedia.org/wiki/Cladophora>
7. <https://www.reef2reef.com/threads/algae-id-cladophora-treatment-successes-failures.1052903/>
8. Las reglas que organizan el juego son: NACE: Si una célula muerta tiene exactamente 3 células vecinas vivas “nace” (es decir, al turno siguiente estará viva); MUERE: una célula viva puede morir por uno de 2 casos: Sobrepoblación (si tiene más de tres vecinos alrededor) o Aislamiento (si tiene solo un vecino alrededor o ninguno); VIVE: una célula se mantiene viva si tiene 2 o 3 vecinos a su alrededor.
9. https://es.wikipedia.org/wiki/Juego_de_la_vida
10. <https://es.wikipedia.org/wiki/regla30>
11. <https://youtu.be/B1yMfw4PiFs>. Experimentación
12. https://youtu.be/xXV_Oyway3Y

Referencias

- Bachelard, G. (1938) *La formación del espíritu científico*. México D.F.: Siglo XXI Editores.
- Bachelard, G. (1957) *La poética del espacio*. México D.F.: FCE Editores.
- Darwin, Ch. (1859). El origen de las especies. Londres: Editor John Murray.
- Luitjohan, S., Ashayeri, M., & Abbasabadi, N. (2022). *An optimization framework and tool for context-sensitive solar-driven design using cellular automata*.
- Muñoz, J. y Velarde, J. (2000). Compendio de epistemología. Madrid: Editorial Trotta.

Abstract: This article investigates the relationships between phenomenology, experimentation, and generative design, proposing a contemporary interpretation of architectural morphogenetic processes through the thought of Gaston Bachelard. From a projective and experimental perspective, the work explores biomorphological mechanisms — genetic algorithms, L-systems, and cellular automata — as procedures capable of being transferred from the natural sciences into architectural design processes.

The research is developed within the framework of the Final Project Studio and the Institute of Architectural Design and Experimentation (IDEA), understanding experimentation as a tool for exploration and the construction of disciplinary knowledge. In this sense, generative design is approached not merely as a computational technique, but as an intermediate field between the concrete and the abstract, where sensitive observation, imagination, and geometric representation intertwine.

Drawing upon readings of *The Formation of the Scientific Mind* and *The Poetics of Space*, the article proposes understanding algorithmic processes as mechanisms of abstraction capable of translating biological phenomena into projective operations. The experiments developed through digital tools such as Grasshopper, Processing, and physical simulations make it possible to analyze how certain self-organizing systems produce complex, adaptive, and evolutionary morphological configurations.

Finally, the research applies cellular automata to the development of an architectural project in Puerto Madero, exploring the relationships between solar radiation, urban density, and formal growth. The interwoven readings between biology, mathematics, phenomenology, and architecture lead to the conclusion that generative mechanisms constitute sensitive and experimental instruments for the constant redesign of the projective process, articulating intuition, abstraction, and experience in the contemporary construction of architectural form.

Keywords: Generative design - algorithm - project experimentation - innovation

Resumo: O presente artigo investiga as relações entre fenomenologia, experimentação e design generativo, propondo uma leitura contemporânea dos processos de geração morfológica na arquitetura a partir do pensamento de Gaston Bachelard. A partir de uma perspectiva projetual e experimental, o trabalho explora mecanismos biomorfológicos —

algoritmos genéticos, sistemas-L e autómatos celulares — como procedimientos capaces de ser transferidos das ciências naturais para os processos de projeto arquitetônico.

A pesquisa desenvolve-se no âmbito da Cátedra de Projeto Final e do Instituto de Design e Experimentação Arquitetônica (IDEA), compreendendo a experimentação como uma ferramenta de investigação e construção do conhecimento disciplinar. Nesse sentido, o design generativo é abordado não apenas como uma técnica computacional, mas como um campo intermediário entre o concreto e o abstrato, onde observação sensível, imaginação e representação geométrica se entrelaçam.

A partir da leitura de A formação do espírito científico e A poética do espaço, o artigo propõe compreender os processos algorítmicos como mecanismos de abstração capazes de traduzir fenômenos biológicos em operações projetuais. As experimentações desenvolvidas por meio de ferramentas digitais como Grasshopper, Processing e simulações físicas permitem analisar como determinados sistemas auto-organizativos produzem configurações morfológicas complexas, adaptativas e evolutivas.

Por fim, a pesquisa aplica autómatos celulares ao desenvolvimento de um projeto arquitetônico em Puerto Madero, explorando relações entre radiação solar, densidade urbana e crescimento formal. As leituras entrelaçadas entre biologia, matemática, fenomenologia e arquitetura permitem concluir que os mecanismos generativos constituem instrumentos sensíveis e experimentais para o redesenho constante do processo projetual, articulando intuição, abstração e experiência na construção contemporânea da forma arquitetônica.

Palavras-chave: design generativo - algoritmo - experimentação projetual - inovação

[Las traducciones de los abstracts fueron supervisadas por el autor de cada artículo.]

María Jimena Escoriaza Nasazzi. Magister en Diseño de Procesos Innovativos (UCC Cba 2016) Especialista Actualización Proyectual (UBA BsAs 2005) Arquitecto (FAUD UM 2002); Co-Dirección Dpto. Investigación (d/2025) Dirección Dpto. Extensión y Vinculación (2016-2022) Co-Director Instituto IDEA (d/2006) Comisión seguimiento Plan estudios (d/2022) Investigador DIUM: PIUMO Pertinencia social del currículo (2025/2026) La IA en procesos proyectuales (FAUD 2025/2026) Generación y sistematización procedimientos proyectuales (FAUD 2017-2019) Director Trabajos Finales (d/2022), Adj. a/c Diseño Arquitectónico (d/2021) Adj. Arquitectura IV (d/2020) JTP Diseño Arquitectónico (2004-2024) formación RRHH (d/2012) Enseñanza de la arquitectura (2017-2018) Fractales (2018-2019) Regeneración de objetos reciclados (2022/2023); Evaluador: Proyectos Finales de grado y maestría, de extensión e investigación; Publicaciones Y Disertaciones en CyT; miembro en redes; dirige su propio Taller-Estudio (d/2003); Dirige Revista Digital 3x3 (d/2015).

Beatriz Ojeda. Master en Arquitectura, crítica y proyecto, Universidad Politécnica de Cataluña (2000); Arquitecta, Universidad Nacional de Córdoba (1998). Docente de grado en Morfología e investigadora en la UNC y la UCC desde 2003. Profesora, tutora y miembro

del Comité Académico de la Maestría en Diseño de Procesos Innovativos, FA- UCC desde 2007. Dicta talleres y conferencias en seminarios a nivel nacional e internacional. Es coautora de libros y autora de artículos publicados en revistas especializadas que incluyen colaboraciones regulares y estables para la revista 30-60 cuaderno latinoamericano de arquitectura, desde 2004; para la revista digital de arquitectura 3x3, desde 2015; y para el blog Un día/una arquitecta, desde 2015.

Facundo Lerda. Arquitecto (FAUD UM 2025). Workshops internacionales en Digital FUTURES: Autómatas Celulares + IA Generativa (2023) y Arquitectura Espacial (2024). Curso Bestia Digital – Instituto de Arquitectura (IA) (2023). Investigador en IDEA: Instituto de Diseño y Experimentación Arquitectónica (FAUD UM Sede San Rafael). La IA en procesos proyectuales (FAUD 2025/2026 Sede San Rafael). Dirige: Área de Arquitectura en Utopía Desarrollos Urbanos.