

El uso de la inteligencia de enjambre en el diseño urbano

Using Swarm Intelligence in Urban Design

Marcelo Fraile-Narvaez
marcelo.fraile@urjc.es
Escuela de Ingeniería de Fuenlabrada.
Universidad Rey Juan Carlos, España

DOI: <https://doi.org/10.18389/dearq37.2023.05>

Como resultado de la evolución de las tecnologías digitales y de las redes de información, la inteligencia de enjambre se ha implementado en diferentes perspectivas de la investigación. A partir de estos supuestos, el objetivo del artículo es desentrañar la importancia del diseño urbano basado en inteligencia de enjambre, una nueva frontera bajo un enfoque emergente, capaz de usarse en un sinnúmero de aplicaciones. Para su análisis, este artículo utilizó un estudio de caso, centrado en el proyecto Melbourne, del estudio Kokkugia, un programa que, aunque no construido, ha abierto el camino para nuevas exploraciones y maneras de entender el diseño urbano.

___ Palabras clave: urbanismo emergente, urbanismo de enjambre, inteligencia de enjambre, sistemas multiagentes, sistemas autoorganizados, optimización por enjambre de partículas.

As a result of the evolution of digital technologies and information networks, swarm intelligence has come to be implemented in a range of research perspectives. Building on the assumptions that characterize the approach, this paper aims to unpack the importance of swarm-based urban design, which is opening up a new frontier as part of an emerging approach and which lends itself to deployment in myriad situations. This article focuses on a case study of the Kokkugia studio's Melbourne Docklands project. Although this scheme has not been built, it has paved the way for new explorations and ways of understanding urban design.

___ Keywords: emerging urbanism, swarm urbanism, swarm intelligence, multi-agent systems, self-organizing systems, particle swarm optimization, swarm optimization.

INTRODUCCIÓN

Conceptualmente, la inteligencia de enjambre se considera una disciplina que centra sus estudios en el modo en que un grupo de agentes autónomos pueden trabajar juntos sin una supervisión centralizada. En esencia, se basa en la idea de que la división del trabajo, la autoorganización y la adaptación de los agentes individuales resultarían en soluciones más eficientes y efectivas que las proporcionadas por una sola entidad compleja.

La inteligencia de enjambre puede aplicarse a una amplia variedad de ámbitos, incluidas la robótica, la planificación urbana y la búsqueda de soluciones óptimas en sistemas complejos. A pesar de ser una disciplina relativamente nueva, la inteligencia de enjambre ha experimentado un avance significativo, impulsado por el desarrollo en la tecnología digital y la informática. Con la capacidad cada vez mayor de procesamiento y almacenamiento de datos, se han desarrollado algoritmos y modelos computacionales aptos para simular y optimizar el comportamiento de los agentes individuales, permitir la resolución de problemas complejos en tiempo real y mejorar sistemas en un extenso espectro de aplicaciones. Uno de los experimentos más conocidos al respecto es el estudio de enjambre de partículas, que demostró cómo un conjunto de agentes simples coopera para encontrar respuestas óptimas a dificultades que serían difíciles de resolver de manera individual. Este experimento ha sido la piedra angular en la evolución y comprensión de la inteligencia de enjambre y ha proporcionado una base sólida para su aplicación en una vasta gama de campos.

En el ámbito urbano, la inteligencia de enjambre se ha aplicado en el ordenamiento y el diseño de ciudades inteligentes y sostenibles. Un ejemplo interesante al respecto es el rediseño de los Docklands, Melbourne, en Australia, por el estudio Kokkugia. En este proyecto, la empresa utiliza la inteligencia de enjambre para simular y optimizar la forma, la estructura y la función de los edificios, que resulta en una mejor eficiencia de los espacios y una mayor sostenibilidad en la planificación urbana, lo que a su vez puede tener un impacto positivo en la calidad de vida de los habitantes.

LA LÓGICA DEL ENJAMBRE

En el interior de una colmena existe una rigurosa subdivisión del trabajo entre las abejas: desde las obreras, los zánganos o la abeja reina, cada una cumple una estricta función dentro de este perfecto engranaje de la naturaleza. Esta división les permite, en particular, optimizar la búsqueda de las flores necesarias para producir su alimento, ya que topográficamente toda colonia extiende sus dominios a través de un extenso territorio. Las primeras en intervenir en este proceso son las abejas exploradoras, que se encargan de encontrar alimento, buscando la mayor concentración de flores de un área, tarea que desarrollan instintivamente, en un refinado comportamiento aleatorio desarrollado a través del paso de millones de generaciones. Una vez encontrado el sitio, estas regresan al panal para informar de su hallazgo. Para esto, las exploradoras "bailan" en un extremo de la colmena. En esta danza, las obreras son atraídas a observar mediante un sonido emitido por las exploradoras.

Conceptualmente, esta danza configura un lenguaje corporal denominado *lenguaje de las abejas*, el cual fue descubierto en 1919 por el profesor vienés Karl von Frisch. Mediante movimientos vibratorios del abdomen, las exploradoras informan al resto de las abejas de la colmena dónde se encuentra la fuente de sustento. Finalizado el espectáculo, las obreras actuarán de acuerdo con la coreografía de la exploradora que más les impresionó, que coincide con el mejor alimento encontrado.

Ahora bien, la genialidad de este proceso radica en lo complejo del sistema utilizado, pese al reducido intelecto de sus agentes, es decir, un procedimiento en el cual una gran cantidad de individuos, con mínimas capacidades cognitivas, son capaces de resolver dificultosos problemas a través de seguir un

Para sus creadores, la preocupación de este proyecto no se encontraba en simular las condiciones actuales, sino en idear las operaciones y transformaciones que involucren una concepción emergente de las ciudades.

limitado número de simples reglas: cada abeja tiene solo noción de su posición y la de sus inmediatas compañeras, pero como parte del enjambre, cientos de abejas interactúan entre sí y pueden cambiar de actitud cuando la situación lo amerite de un modo uniforme, en cuestión de segundos. De esta conducta se desprende el concepto de *inteligencia de enjambre*, un término que procede originalmente del campo de la biología y que ha sido adoptado por diferentes ramas de la investigación de la inteligencia artificial para explicar el comportamiento colectivo de los sistemas descentralizados, exhibidos por animales de tamaño similar. Estructuras autoorganizadas, inspiradas "en la forma colectiva de actuar de sociedades muy poco complejas, compuestas por individuos muy poco sofisticados" (Duarte Muñoz, Pantrigo Fernández y Gallego Carrillo 2007, 101).

En la naturaleza, además de las abejas, existen numerosos ejemplos de este tipo de sociedades: banco de peces, colonias de hormigas o bandadas de pájaros, se trata de comunidades que se comportan como si fueran un único individuo (Duarte Muñoz, Pantrigo Fernández y Gallego Carrillo 2007). Una inteligencia que emerge de entidades elementales con intelecto reducido pero, en conjunto, como colonia, desarrollan una conducta colectiva que les permite resolver problemas con una gran creatividad: así emerge una inteligencia superior, cuya conducta es mayor a la suma de sus partes. Un comportamiento que, a diferencia de la configuración jerárquica humana, con directores o supervisores, en un enjambre no existe nadie que gobierne el sistema. Su producto es la consecuencia de una propiedad emergente, el concepto de caos de la escalabilidad, un funcionamiento no programado, sin una organización de control centralizada que dirija su proceder, en el que la interrelación local entre los elementos conduce hacia un comportamiento integral coherente (Duarte Muñoz, Pantrigo Fernández y Gallego Carrillo 2007). Una correlación del funcionamiento individual e independiente de cada parte, que al no existir una estructura central de monitoreo que determine la estrategia que se va a seguir, cada componente mantiene cierta independencia, salvo la cooperación entre componentes próximos: y "aunque los agentes sean simples, el resultado de su interacción global puede llegar a ser muy complejo (como la realización de movimientos prácticamente al unísono o estrategias de protección frente a depredadores)" (Duarte Muñoz, Pantrigo Fernández y Gallego Carrillo 2007, 101).

Actualmente, y como resultado de la evolución de la tecnología digital y de las redes de información, la inteligencia de enjambre se ha implementado desde diferentes perspectivas: la biología, la estructura social, la ingeniería, la informática y, por supuesto, la arquitectura y el urbanismo. A partir de estos supuestos, este artículo tiene como objetivo principal desentrañar la importancia del diseño urbano basado en la inteligencia de enjambre, una nueva frontera de investigación bajo un enfoque emergente, capaz de usarse en un sinnúmero de aplicaciones, desde el mapeo de datos, pasando por el modelado de comportamientos colectivos de los individuos en una evacuación, hasta el ensamblaje de elementos empleando nanorrobots. Para su análisis, este artículo utiliza un estudio de caso, centrado en el estudio del proyecto Melbourne, un proyecto del estudio Kokkugia, un ejercicio especulativo que permite abrir nuevas maneras de entender y abordar el diseño urbano en el siglo XXI.

Finalmente, el objetivo de este artículo es crear un marco teórico que sirva como punto de partida que anime a futuros trabajos que promuevan la discusión y el completamiento de este tema.

INTELIGENCIA DE ENJAMBRE

En las crónicas relacionadas con la inteligencia de enjambre se encuentran múltiples temas, a veces un tanto inconexos, que abarcan campos tan disímiles como la física, la biología o la robótica. En esta crónica sintética, podríamos considerar al filósofo y escritor británico William Olaf Stapledon como el primero en hablar de inteligencia de enjambre, quien en su libro titulado

Last and First Men: A Story of the Near and Far Future, publicado en 1930, describía la historia de la humanidad desde el presente hasta dos mil millones de años en el futuro. Bajo una dialéctica hegeliana, Stapledon, desarrollaba la idea de una serie de células individuales que se comunicaban entre sí por medio de ondas de radio.

Tiempo después, en 1986, y con la popularización de los computadores, el experto en gráficos por computador y vida artificial, Craig W. Reynolds, desarrolló Boids, un sistema digital que permitía visualizar una conducta emergente de una bandada de pájaros digitales (*boids*).¹ En el modelo, cada agente elegía su propio curso y navegaba en función de la percepción de un entorno dinámico que gobernaba su movimiento, el cual estaba regido por las tres reglas básicas de comportamiento de un enjambre. Es decir, que cada agente mantuviera una separación mínima con sus vecinos que, además, conservara una dirección coherente con la bandada y que estos se mantuvieran unidos. Finalmente, el comportamiento de un enjambre de *boids* era el resultado de la interacción de los comportamientos individuales: los agentes trataban de volar juntos, evitando colisionar entre ellos y con el marco cambiante que los rodeaba.

Más tarde, en 1989, inspirados por los fenómenos naturales, los profesores estadounidenses de ingeniería eléctrica, Gerardo Beni, Susan Hackwood y Wang Jing, introdujeron el concepto de *inteligencia de enjambre* dentro del contexto de los sistemas robóticos móviles, para referirse a un número elevado (aunque finito) de robots, sin control central, pero comunicados con otros *bots* próximos, que operan en un espacio n -dimensional, los cuales eran capaces de desarrollar interacciones locales y generar un procedimiento global que podían describir comportamientos colectivos emergentes (Beni y Wang 1993). Desde este punto de vista, para Beni y Wang (1993) la inteligencia de enjambre puede definirse como la propiedad de un sistema en que el comportamiento colectivo de agentes (poco sofisticados) que interactúan localmente con el entorno produce la aparición de patrones funcionales globales en el sistema.

Posteriormente, en 2013, los físicos Maksym Romensky y Vladimir Lobaskin de la University College de Dublín (Irlanda), al estudiar la autoorganización dinámica y transición orden-desorden bajo un sistema bidimensional de partículas autopropulsadas, descubrieron nuevas propiedades colectivas de la mecánica de los enjambres. Utilizando simuladores digitales, a partir de modelos materiales, comenzaron a estudiar los parámetros de ordenación de las partículas en relación con sus vecinos. Los científicos estudiaron el proceder de 10 000 animales digitales individuales que se movían a una velocidad constante sobre una superficie plana. De acuerdo con estos estudios, Romensky y Lobaskin (2013) evaluaron la conducta de estos insectos dentro de un enjambre, comportamiento que dependía de la cantidad de individuos, de su posición topográfica en el modelo y de su proximidad con otros entes.

OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

El proceso de *optimización por enjambre de partículas* fue introducido en 1995 por los estadounidenses Russell Eberhart y James Kennedy mientras estudiaban un prototipo para describir el comportamiento social de los animales en grupo. Durante sus investigaciones, Eberhart y Kennedy descubrieron que este modelo era capaz de realizar diferentes optimizaciones. En esencia, se trata de un mecanismo de optimización numérica de variables, donde la cooperación entre agentes busca encontrar el valor mínimo global de una función, es decir, la solución a un problema.

El proceso de mejora comienza con una población de partículas (enjambre): una serie de componentes aleatorios uniformemente distribuidos, cuyo objetivo es obtener un valor óptimo (respuesta) frente a un determinado problema. Para esto, cada partícula ocupa una posición en el espacio de búsqueda, y en este lugar, además, es donde se encuentran las posibles soluciones a la optimización.

^{1.} Acrónimo de *bird-oid object*. Una referencia a un objeto parecido a un ave. Su pronunciación es similar a pájaro, pronunciado con estereotípico acento de Nueva York.

Cada partícula tiene conciencia total de todo lo que está sucediendo a su alrededor (esfera espacial) y puede recordar su mejor posición en el espacio y su mejor experiencia; sin embargo, es incapaz de observar lo que sucede fuera de esta esfera espacial.

De acuerdo con su alineación, cada partícula se traslada en el espacio según un vector de longitud que se desplaza en un espacio de n dimensión (universo de búsqueda) y que evoluciona en el tiempo, produciendo cambios en su velocidad, con el fin de mantener la distancia con otras partículas que se encuentren cercanas a ella, dentro de su esfera. Además, mantiene la dirección en que se mueve la bandada.²

De igual forma, al tratarse de un enjambre, cada partícula conocerá la mejor posición histórica de las partículas de su vecindad, y entonces aportará algún nuevo factor para moverse hacia esa ubicación y contribuirá a su experiencia global. Un principio de cohesión, donde toda la bandada se mueve junta como un grupo. De este modo, estos tres parámetros —dirección de la partícula, máxima experiencia individual y superior destreza del enjambre— describen el modelo matemático que definirá el sistema.

Iniciado el procedimiento, el sistema continuará iterando, cambiando la posición de las partículas hasta localizar un área donde converjan, aleatoriamente, en un verdadero valor mínimo global, agrupados. En esencia, se trata de un proceso de cooperación que intenta encontrar la óptima ubicación dentro del espacio de búsqueda, es decir, descubrir la mejor respuesta posible al problema de optimización.

URBANISMO EMERGENTE

En 2001, el escritor estadounidense Steven Johnson, en su libro *Emergence: The Connected Lives of Ants, Cities and Software*, describe a las ciudades como un conjunto de individuos que interactúan con sus vecinos siguiendo las leyes de los sistemas dinámicos adaptables. Una población compuesta por un gran número de pequeños elementos discretos que muestran un comportamiento sofisticado entre sus partes, una pauta emergente similar a la desarrollada por una colonia de hormigas o una bandada de pájaros. Y en este sentido, como cualquier estructura emergente, la ciudad puede considerarse un patrón en el tiempo que muestra una inteligencia colectiva ascendente, con una mayor sofisticación que la conducta de sus miembros, es decir, una forma de "inteligencia de enjambre" (Leach 2009, 56-63). Este es un proceso relativamente homogéneo donde los componentes individuales no se destacan, sino que estos se ajustan a la lógica dominante de su entorno.

Y aunque la complejidad de la ciudad supera con creces cualquier modelo digital existente en la actualidad, continúa Johnson (2001), es posible, mediante el uso de computadores, desarrollar metodologías computacionales que nos ayuden a entender las lógicas emergentes de los modos como la naturaleza se autoorganiza y emplearlas posteriormente para la simulación de los comportamientos colectivos en el interior de las ciudades y el diseño de formas urbanas, en sus diferentes escalas. Un proceso que nos ayuda a superar los procedimientos inspirados en fractales, sistemas L, autómatas celulares y otros métodos que operan en gran medida dentro de su propia lógica interna discreta. Debemos recordar que tanto los fractales como los sistemas L se hallan limitados para modelar patrones de crecimiento, porque están programados para comportarse de una manera particular y, en general, no pueden ajustar su comportamiento en respuesta a estímulos externos (Leach 2009). De igual forma, los autómatas celulares, si bien pueden responder a sus vecinos, estos se encuentran fijos espacialmente, vinculados a ciertas cuadrículas subyacentes.

Y aquí es cuando la inteligencia de enjambre se presenta como una etapa superadora, al tratarse de un sistema multiagente compuesto por diferentes elementos inteligentes que interactúan entre sí y pueden moverse espacialmente.

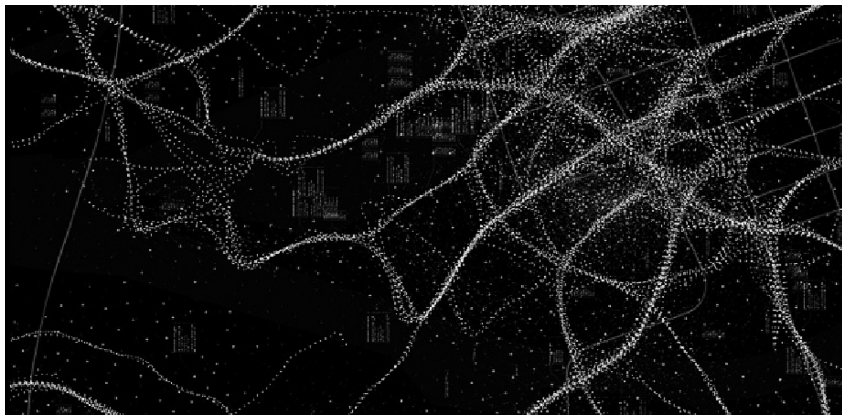
²_____

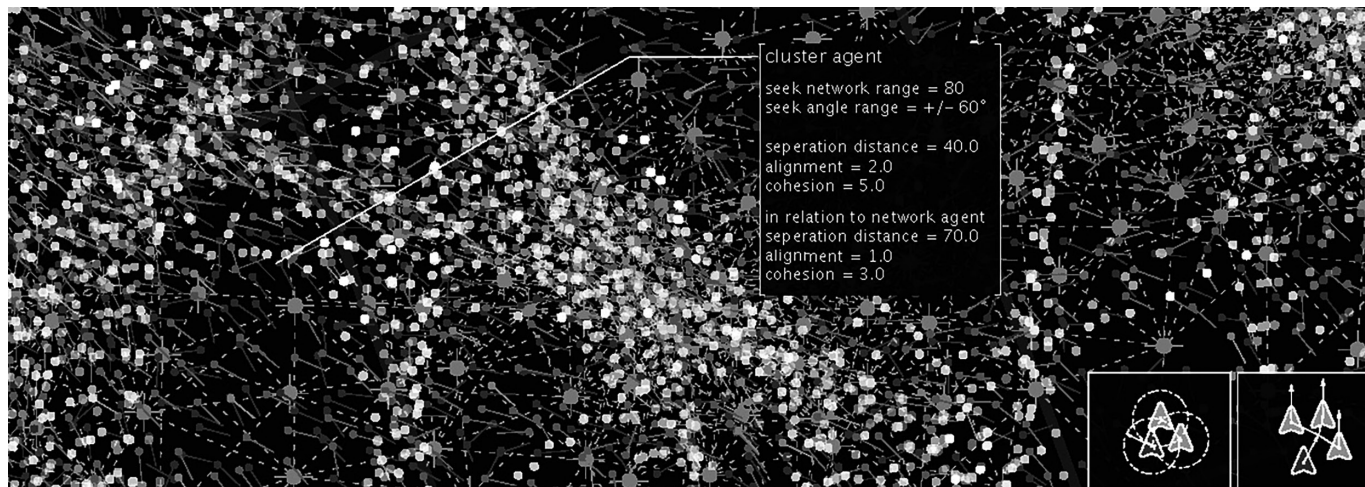
Sin embargo, al hacer zoom sobre las partículas, es posible observar un comportamiento complejo en el que todas las partículas se mueven en una dirección sutilmente diferente.

Es un sistema dinámico, adaptable, de interacción, capaz de optimizar un objetivo común, a través de una búsqueda colaborativa; una experimentación incipiente entre lo biológico y lo digital que confluye en un nuevo campo científico y tecnológico. Se trata de un método artificial, complejo, un proceso de diseño generativo que utiliza técnicas algorítmicas para el desarrollo de una metodología computacional basada en inteligencia de enjambre. Para Manuel DeLanda, estos modelos algorítmicos permiten generar multiagentes virtuales, capaces de tomar sus propias decisiones y de influir en las elecciones de otros, un procedimiento donde la autonomía emergente de cada individuo reemplaza la figura de un control centralizado (Leach 2009). Son formatos flexibles y adaptativos a las condiciones del contexto que pueden operar en diferentes escalas y que brindan la posibilidad de analizar, simular y evaluar múltiples opciones y variaciones.

Para este análisis urbano se utilizaron un gran número de entes virtuales, denominados *partículas*. En cada sistema, las partículas pueden representar personas, edificios, vehículos, vías de circulación o espacios públicos. Estas partículas se distribuyen sobre el espacio de exploración y se transforman en un enjambre informal de puntos de referencia, en proceso de construir relaciones entre sí: una colonia de nodos elementales que, al igual que las abejas, actúan como núcleos activos comunicándose con sus compañeros en tiempo real y siguiendo reglas básicas: moverse en la misma dirección que sus vecinos, permanecer cerca de estos y evitar colisionar con ellos. En consecuencia, cada agente sigue a su vecino inmediato, calculando estas reglas varias veces por segundo, pero sin tener conocimiento consciente del grupo general.

De esta manera, la posición de cada punto, determinada por coordenadas, representa los valores que toman las variables de decisión del problema. Cada partícula produce un resultado que estará en función de la posición actual y del emplazamiento esperado. En cada interacción, el algoritmo adoptado modifica la situación del individuo mediante un vector de velocidad asociado con la partícula (Duarte Muñoz, Pantrigo Fernández y Gallego Carrillo 2007), buscando encontrar caminos a través de un espacio de parámetros que representan posibles soluciones alternativas. Los puntos se transforman en una malla flexible que permite





Figuras 1 y 2_ Kokkugia: Roland Snooks & Robert Stuart-Smith Swarm Urbanism. Melbourne, Australia, 2009. <http://www.kokkugia.com/swarm-urbanism>

la inclusión de diferentes tipos de construcciones urbanas para generar redes de infraestructura y circulación, formas fluidas y densas, capaces de acoplar las nuevas estructuras a las configuraciones existentes, de un modo más eficiente.

Dentro de una planificación urbana por enjambre, la ciudad ha dejado de estar formada por objetos estáticos: los diseñadores consideran la ciudad y los edificios como un enjambre de instalaciones interactivas; un proceso de simulación digital de agentes en el espacio que define y determina sus limitaciones para llegar al equilibrio del sistema.

Tomemos un ejemplo: utilizando modelos de urbanismo de enjambre, intentaremos situar mil viviendas unifamiliares dentro de un área que se va a urbanizar de baja densidad. Inicialmente, el sistema se organizará de un modo específico, manteniendo ciertas distancias entre los agentes individuales. De acuerdo con el algoritmo, cada casa fijará su posición en relación con su vecina. Un comportamiento abierto que permite que, si uno de los agentes cambia de posición, el sistema responderá a este nuevo parámetro, redefiniéndose. Y dado que este tipo de diseño posibilita que diferentes enjambres interactúen al mismo tiempo durante el proceso, podremos crear un enjambre de calles, otros de plazas y otro de edificios públicos, que interactuarán entre ellos de forma conjunta hasta llegar a reproducir digitalmente la complejidad de una ciudad contemporánea.

Para Leach (2009), el reto de esta operación será establecer lo que él denomina *planificación del escenario*, un procedimiento que puede ayudar en la previsibilidad requerida para imitar los procesos urbanos, es decir, las normas más eficaces que permitan anticipar los procedimientos capaces de generar dicha complejidad: algunos códigos pueden producir vida, otros aburrimiento e, incluso otros, la muerte de la colmena. En esencia, se trata de un sistema de prueba y error, a alta velocidad, capaz de desarrollar millones de resultados posibles y un número infinito de versiones o variaciones (Kievid 2014). Y precisamente allí la tarea del diseñador será fundamental para definir las variables de interacción entre agentes. El proyectista deberá ajustar los parámetros y buscar las reglas para elaborar una estructura en equilibrio que optimice el enjambre y mantenga vivo el proceso. Para Manuel DeLanda es fundamental que estos modelos de comportamiento basados en agentes deban simularse como agentes individuales concretos y singulares, no como agentes abstractos que encarnan la inteligencia colectiva de toda una sociedad (Leach 2009).

EL REDISEÑO DE LOS DOCKLANDS

Para el italiano Bernardo Secchi (2014), el urbanismo como ciencia no puede catalogarse fácilmente; esto se debe a su carácter interdisciplinar, que se nutre en igual proporción tanto del pasado como del futuro. En este sentido, los urbanistas contemporáneos constantemente colaboran con otras disciplinas, en un proceso que suma las experiencias teóricas y prácticas desarrolladas a lo largo del tiempo (Salazar Ferro & Ariza Parrado 2022).

Desde este punto de vista, una propuesta interesante al respecto es el rediseño urbano de los Docklands (Melbourne, Australia), de 2009, desarrollado por el estudio Kokkugia.³ El enfoque de la propuesta consistió en transformar la red urbana actual a partir de la ampliación del distrito de negocios. Un enunciado especulativo que utiliza metodologías emergentes, aplicado en el campo del urbanismo como una herramienta de diseño, a través de un conjunto secuencial de decisiones a escala reducida. Esto implica la interacción local de agentes independientes sin una jerarquía de diseño secuencial: en lugar de elaborar un plan urbano, los diseñadores programaron un conglomerado de agentes autónomos (resoluciones micro o locales) que interactuaban (se autoorganizaban) para generar una estructura urbana compleja que condujera a un sistema capaz de responder de un modo flexible a las cambiantes condiciones del entorno.

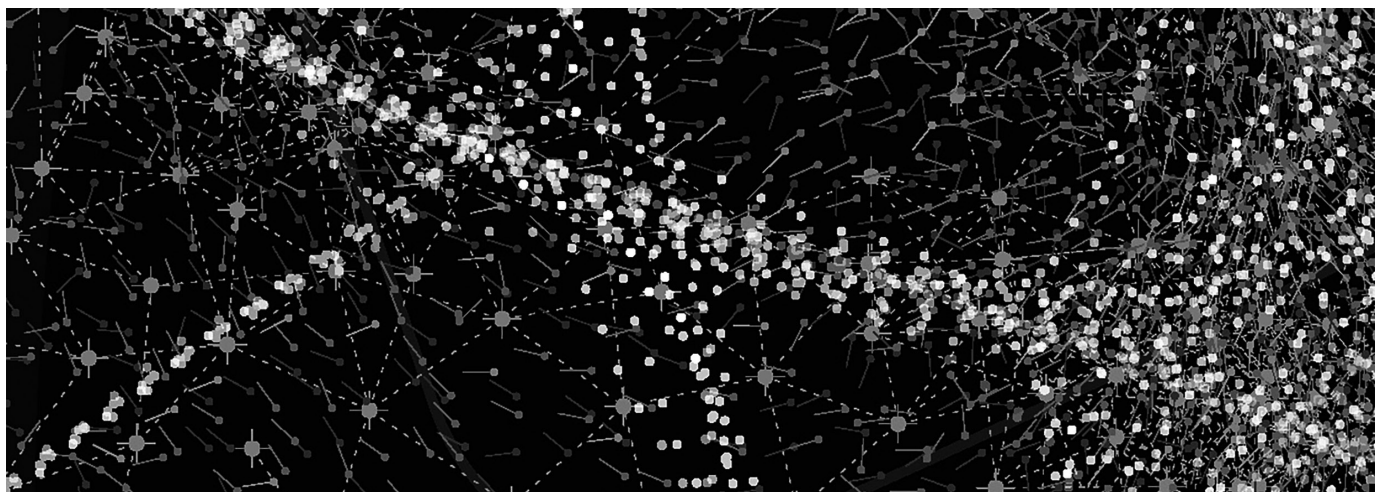
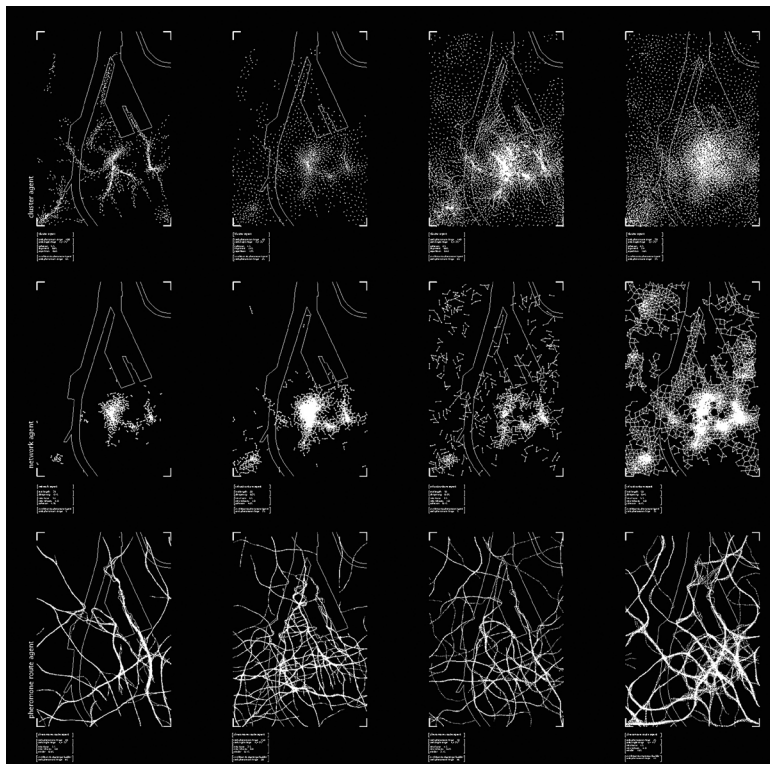
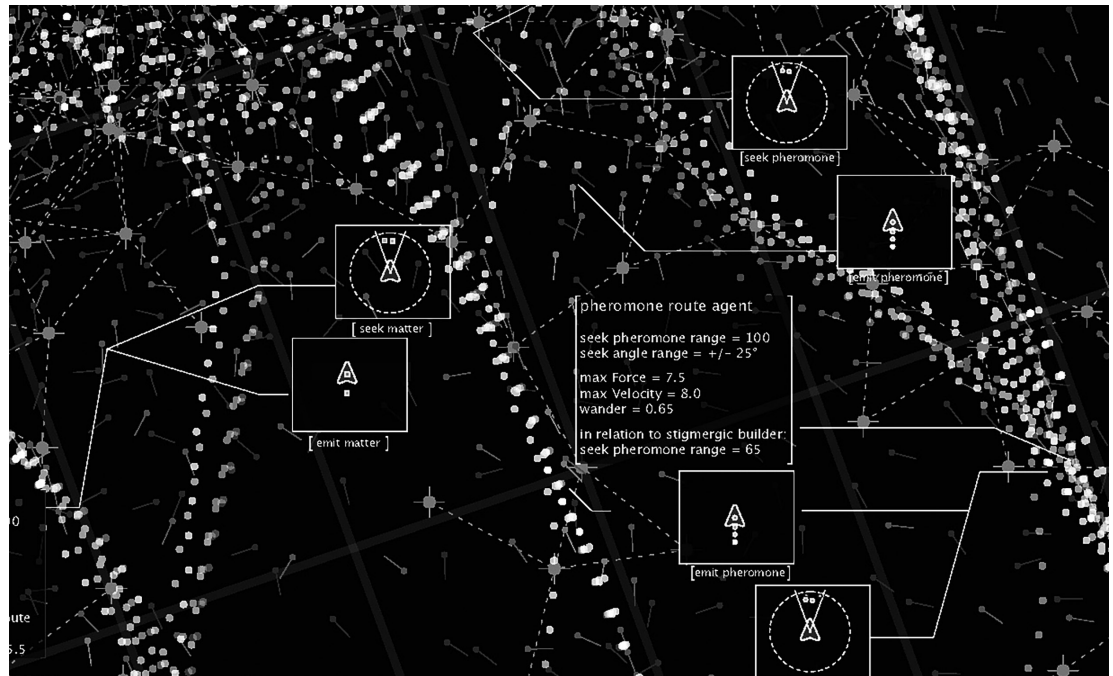
Se trataba de una metodología de simulación, un enfoque algorítmico, basado en inteligencia de enjambre, con capacidad para generar relaciones programáticas y respuestas arquitectónicas bajo un proceso generativo de retroalimentación no lineal; capaz de formar, a través de un procedimiento lógico de adaptación, un diseño emergente de autoorganización, tal como lo haría una colonia de hormigas o un enjambre de abejas. Un sistema que utilizaba algoritmos basados en eventos, a fin de obtener los resultados deseados. En esencia, implica una propuesta innovadora, una herramienta analítica/proyectual que permite prever en un futuro inmediato la posible evolución de una ciudad y, posteriormente, convertirse en un instrumento planificador, con la amplitud para adaptarse a las necesidades cambiantes del entorno y dar respuesta a los impulsos, interacciones y factores imprevisibles de sus habitantes mediante herramientas de última generación.

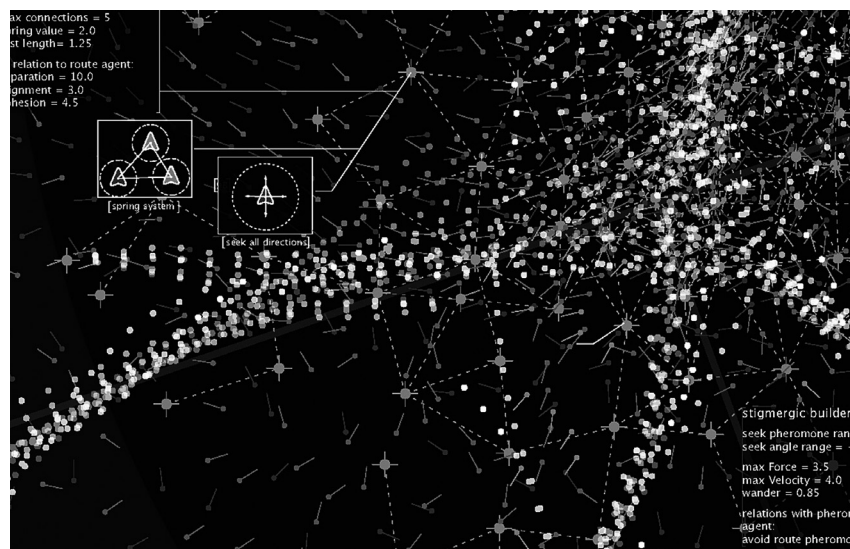
Desde la ciudad al edificio, un modelo basado en el comportamiento de agentes elementales digitales que interactúan en un espacio predefinido, calculado en tiempo real, en un proceso de miles de millones de pasos de cálculo. Un prototipo ideal, colaborativo, con una interfaz gráfica que permite la interacción, la comunicación y la colaboración entre los diferentes elementos. Una exploración de los beneficios del uso de sistemas de enjambres centrados en la infraestructura a partir del uso de algoritmos paramétricos para su optimización analítica, abriendo la puerta a infinitos resultados.

Para Roland Snooks y Robert Stuart-Smith (2009), Docklands implica la comprensión de la naturaleza emergente en los espacios públicos, centrándose en el comportamiento, en tiempo real, de insectos sociales digitales que actúan de acuerdo con reglas previamente establecidas. Un diseño optimizado de conformidad con la conducta de sus vecinos y de las huellas dejadas por estos en el entorno. Una adaptación comunitaria que se modifica en virtud de las fuerzas exteriores del medio ambiente, a través de dos etapas de acción: en la primera, los agentes autoorganizan el programa mediante un proceso de crecimiento estigmérgico, un proceder colectivo similar a la lógica de las colonias de termitas, donde estas agregan material para formar montículos (la materia urbana); en la segunda, los agentes codifican los elementos y la topología urbana, siguiendo un comportamiento similar a los procesos de autoorganización de las células del moho mucilaginoso, que resulta en sistemas de caminos mínimos. En el proyecto del estudio Kokkugia, estos agentes generan una inteligencia colectiva para crear redes de infraestructura y de circulación, sistemas tridimensionales complejos. Un desarrollo de continuas retroalimentaciones que favorecen las mejoras y eliminan los desajustes.

Para sus creadores, la preocupación de este proyecto no se encontraba en simular las condiciones actuales, sino en idear las operaciones y transformaciones que involucren una concepción emergente de las ciudades: un cambio de pensamiento que reemplaza los planes maestros por algoritmos-maestros, un proceso flexible que sincroniza las decisiones micro y macro producidas durante el diseño urbano. Es lo que Leach considera, "idear procesos operativos y niveles mucho mayores de abstracción que implican sembrar la intención del diseño en un conjunto de agentes proyectuales autónomos capaces de autoorganizarse en formas urbanas emergentes" (2009, 56-63).

^{3.} Fundado en 2004, Kokkugia es una plataforma de investigación y desarrollo fundada por Jonathan Podborsek, Roland Snooks y Rob Stuart-Smith, tres egresados de la Royal Melbourne Institute of Technology, con sede en Londres, Nueva York y Melbourne.





CONCLUSIONES

La planificación urbana tradicional tiende a percibir la evolución de la ciudad como un proceso lineal y previsible, que se basa en estadísticas y proyecciones. Sin embargo, los procesos que impulsan la transformación urbana son complejos y dinámicos, y enfrentan futuros inciertos marcados por fluctuaciones en las fuerzas y flujos de energía que la ciudad comparte, genera e intercambia con su entorno (Aquilué Junyent y Ruiz Sánchez 2021). Esencialmente, estas fluctuaciones podrían ser previsibles, dado que hay un número finito de opciones. A pesar de esto, no es posible predecir cuál de estas fluctuaciones se manifestará y se amplificará (Wagensberg 2003). El cambio es un proceso no lineal, lo que significa que a medida que el sistema se desvía del equilibrio, aumenta la complejidad, entendida como la cantidad de soluciones posibles y accesibles para el sistema (Aquilué Junyent y Ruiz Sánchez 2021).

En este sentido, el desarrollo de una tecnología digital de avanzada ha permitido a científicos y urbanistas estudiar la inteligencia de enjambre para enfrentar los constantes y no predecibles cambios de la ciudad. Eventos como desastres naturales, incendios o terrorismo pueden analizarse con algoritmos basados en el comportamiento colectivo de grupos de agentes, como los utilizados en inteligencia de enjambre, lo que permitirá interpretar el proceder común de las personas durante una evacuación y determinar las rutas de salida más eficientes con precisión. Con ayuda de metodologías metaheurísticas estos algoritmos exploran la conducta de sus individuos y, de este modo, obtienen soluciones óptimas para diversos problemas.

Una de sus ventajas más representativas es su organización descentralizada, o de múltiples agentes, donde no existe un control centralizado ni una lógica jerárquica. Los procesos del sistema, por consiguiente, trabajan para optimizar objetivos individuales y locales, con el fin de lograr un rendimiento general óptimo. Para esto, cada componente puede modelarse como un agente autónomo, capaz de tomar decisiones particulares. Estos agentes colaboran en un sistema multiagente para mejorar su desempeño y la capacidad de resolución de problemas en diferentes escalas (Herrera et al. 2021).

En el caso de Melbourne, todos los elementos del tejido urbano se concibieron como agentes autónomos, es decir, piezas que puedan interactuar y tomar decisiones de acuerdo con una jerarquía de intensidades y sin una categoría de diseño secuencial. Estos agentes se comportan como unidades autónomas con información y aspiraciones propias, y están programados para interactuar entre sí en un proceso autoorganizado que se asemeja a la selección natural descrita por Charles Darwin. En lugar de concebir la ciudad como una masa compacta, se la concibe a modo de una estructura dendrítica, basada en la interacción de los principios de proximidad y espacio (Batty 2009).

Figuras 7 y 8_ Kokkugia: Roland Snooks & Robert Stuart-Smith Swarm Urbanism. Melbourne, Australia, 2009.
<http://www.kokkugia.com/swarm-urbanism>

El uso de modelos digitales bioinspirados en el urbanismo brinda una perspectiva de exploración sugerente e inspiradora para examinar el comportamiento de las ciudades: el procesamiento de información en masa, a partir del uso de algoritmos, puede conducirnos a predecir y analizar los problemas antes de que estos sucedan.

En este sentido, una técnica de optimización mejorada es el algoritmo desarrollado por Meirelles et al. (2020), denominado *algoritmo grand tour* (GTA), basado en la física de enjambres. Utiliza la metáfora del comportamiento de un grupo de ciclistas para calcular las soluciones óptimas. Sus características incluyen la resistencia, definida por la distancia al ciclista líder (que representa la mejor solución), y la velocidad, que se determina a partir de la diferencia entre dos evaluaciones consecutivas de la función objetivo. Estos dos elementos determinan los coeficientes de recorrido de cada ciclista. Al final, el grupo buscará seguir al ciclista más cercano a la meta, lo que simboliza la solución óptima, pero también seguirá al ciclista más rápido en un punto específico. En consecuencia, el rendimiento de GTA es superior al de otros algoritmos clásicos, y dada su facilidad de uso, sumado a su rapidez de convergencia, lo transforma en una respuesta confiable, con una capacidad para manejar hasta 20 000 variables de decisión, sin necesidad de ajustar los parámetros iniciales para lograr una buena optimización (Meirelles et al. 2020).

Actualmente, las herramientas basadas en inteligencia de enjambre, en combinación con sistemas de inteligencia artificial, están transformando la planificación urbana hacia un sistema dinámico y variable, capaz de crear nuevas formas arquitectónicas, revalorizar los centros históricos, optimizar las vías de circulación, renovar las áreas verdes e implantar nuevos equipamientos urbanos. Un proceso que se espera conduzca al desarrollo de ciudades más sostenibles para las generaciones venideras.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aquilué Junyent, Inés y Javier Ruiz Sánchez. 2021. "Ciudad, complejidad y cambio: Fundamentos para el análisis de la incertidumbre en sistemas urbanos". *Revista INVI* 36, n.º 101: 7-34. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582021000100007>
2. Batty, Michael. 2009. "A Digital Breeder for Designing Cities". *Architectural Design* 79, n.º 4: 46-49. <http://www.complexcity.info/files/2011/06/batty-ad-2009.pdf>
3. Beni, Gerardo y Jing Wang. 1993. "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems". En *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?*, 703-712. Berlín: Springer.
4. Duarte Muñoz, Abraham, Juan José Pantrigo Fernández y Micael Gallego Carrillo. 2007. *Metaheurísticas*. Madrid: Dykinson.
5. Gerber, David Jason y Rodrigo Shiordia López. 2013. *Context-Aware Multi-Agent Systems: Negotiating Intensive Fields*. Los Ángeles: University of Southern California.
6. Herrera, Manuel, Marco Pérez-Hernández, Ajith Kumar Parlikad y Joaquín Izquierdo. 2021. "Control and Optimization of Multi-Agent Systems and Complex Networks for Systems Engineering". *Processes* 9, n.º 11: 2070. <https://doi.org/10.3390/pr9112070>
7. Johnson, Steven. 2001. *Emergence: The Connected Lives of Ants, Cities, and Software*. New York: Scribner.
8. Kievid, C. 2014. *Swarm Architecture: Space is a Computation*. Delft, Holland: Technical University of Delft.
9. Leach, Neil. 2009. "Swarm Urbanism: Power to the Parametric". *Architectural Design* 79, n.º 4: 56-63.
10. Meirelles, Gustavo, Bruno Brentan, Joaquín Izquierdo y Edevar Luvizotto. 2020. "Grand Tour Algorithm: Novel Swarm-Based Optimization for High-Dimensional Problems". *Processes* 8, n.º 8: 980. <https://doi.org/10.3390/pr8080980>
11. Romensky, Maksym y Vladimir Lobaskin. 2013. "Statistical Properties of Swarms of Self-propelled Particles with Repulsions Across the Order-Disorder Transition". *European Physical Journal B*, n.º 86: 91. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2013-30821-1>
12. Salazar Ferro, Camilo y Lucas Ariza Parrado. 2022. "Urbanismo: La ciudad como archivo de lo posible". *Dearq*, n.º 32: 4-5. <https://doi.org/10.18389/dearq32.2022.01>
13. Secchi, Bernardo. 2014. *Primera lección de urbanismo*. Lima: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
14. Snooks, Roland y Stuart-Smith, Robert. 2009. "Swarm Urbanism". <https://www.kokkugia.com/filter/research/swarm-urbanism> (Consultado el 1-3-2023).
15. Stapledon, William Olaf. 1930. *Last and First Men: A Story of the Near and Far Future*. London: Methus.
16. Wagensberg, Jorge. 2003. *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets.