

Del Microscopio a la Metrópolis: La influencia del Moho Limoso en el Diseño Urbano

Marcelo Fraile Narváez⁽¹⁾

Resumen: En el contexto de la planificación urbana, la biología ha emergido como una fuente invaluable de inspiración y generadora de soluciones creativas para abordar problemas complejos. La influencia de organismos como aves, termitas, hormigas y abejas ha sido objeto de estudio para enfrentar desafíos inherentes al entorno urbano. En esta línea de investigación, recientemente, se ha explorado la posibilidad de utilizar la estructura orgánica del moho limoso, *Physarum polycephalum*, como un modelo para proyectar y optimizar redes e infraestructuras urbanas. A pesar de su aparente simplicidad como organismo unicelular sin un cerebro central, el moho limoso ha evolucionado durante millones de años para desarrollar una sorprendente destreza en la planificación de su red tubular, lo que lo convierte en una fuente de inspiración relevante para la arquitectura y el urbanismo. La hipótesis central de esta investigación se enfoca en la idea de que la estructura orgánica del moho limoso puede proporcionar soluciones para mejorar la eficiencia y la resiliencia de las redes urbanas. El objetivo principal de este estudio es desentrañar los principios subyacentes que guían la formación de los tejidos de este organismo y aplicarlos en la optimización de entornos urbanos. Para lograrlo, se emplearán tecnologías digitales y sistemas de información que permitirán desarrollar modelos que emulen su crecimiento. Un componente clave en esta investigación es la incorporación de nodos atractores, que se ajustarán según la densidad de población y los flujos de personas, lo que posibilitará la creación de redes urbanas más inteligentes y resistentes. Para demostrar la viabilidad de estos conceptos en la práctica, este artículo desarrolla un modelo específico basado en el sistema de metro de la ciudad de Buenos Aires, con el objetivo de mejorar su eficiencia y sostenibilidad. Este enfoque innovador, que fusiona la biología con la arquitectura, representa una nueva frontera en el campo del urbanismo y ofrece aplicaciones significativas en diversos contextos urbanos.

Palabras clave: Bioinspiración - Moho limoso - Urbanismo - Redes urbanas - Optimización.

[Resúmenes en castellano y en portugués en las páginas 97-98]

⁽¹⁾ **Marcelo Fraile Narváez**, arquitecto (Universidad Nacional de Tucumán, Argentina). Doctor en arquitectura (Universidad de Buenos Aires, UBA). Especialista en diseño digital (UBA), Máster en Conservación y Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina). Ha impartido cursos de grado y posgrado en

diferentes instituciones entre las que se destacan la Universidad de Costa Rica, la Universitat Internacional de Catalunya y la Universidad de Oviedo. Fue Director Académico del Máster Universitario de Espacios Inteligentes, Coordinador Académico del Máster Universitario en Diseño y Producción Multimedia (Universidad Internacional de La Rioja, España) y Coordinador del proyecto Biomímesis (MediaLab Prado, Madrid). Becado por la Universidad Nacional de Tucumán y la Universidad de Buenos Aires en diversas oportunidades para desarrollar investigaciones relacionadas con el diseño biodigital y la prefabricación digital. Ha sido funcionario del Ministerio de Cultura del Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires desde el 2007 al 2015. Autor de numerosos artículos relacionados con la crítica arquitectónica, la historia de la arquitectura, y el diseño biodigital. Director de la revista y del colectivo de diseño TRP21. Actualmente es profesor de la Escuela de Ingeniería de Fuenlabrada, de la Universidad Rey Juan Carlos, y miembro del iBAG-UIC Barcelona (Institute for Biodigital Architecture and Genetics - Universitat Internacional de Catalunya).

Introducción

El fenómeno del crecimiento urbano a nivel global ha resultado en un aumento significativo de la población en las ciudades, siendo impulsado principalmente por migraciones en busca de una mejora en la calidad de vida. Estudios respaldados por la Organización de las Naciones Unidas señalan que, entre los años 2000 y 2015, los países de alto ingreso han recibido un flujo migratorio anual promedio de 4.1 millones de individuos procedentes de naciones con ingresos inferiores. Además, proyecciones indican que entre 2015 y 2050, se espera que aproximadamente 91 millones de personas migren hacia países de ingresos altos, lo que representará un 82% del crecimiento poblacional en estas áreas (United Nations, 2015). En este contexto, las grandes urbes se erigen como destinos cruciales debido a las oportunidades laborales y los niveles económicos más elevados que ofrecen en comparación con las zonas rurales. No obstante, este notable incremento de la población plantea desafíos considerables para los sistemas de transporte público. La expansión territorial de las ciudades ha generado una presión sobre las infraestructuras preexistentes, todo ello en consideración de la sostenibilidad y los límites presupuestarios, lo que constituye una tarea de alta complejidad que requiere su atención inmediata.

Como diseñadores, nuestra tarea será resolver estos problemas desde una mirada innovadora, en armonía con el medio ambiente y la comunidad en general, priorizando soluciones que integren tecnología, eficiencia energética y una planificación urbana sostenible. Buscando crear infraestructuras inteligentes y flexibles que se adapten a las necesidades cambiantes de una población en constante movimiento, promoviendo al mismo tiempo la equidad en el acceso a servicios básicos y la creación de espacios urbanos más habitables y amigables con el entorno.

Y es precisamente en este sentido en que la naturaleza ha emergido como una invaluable fuente de inspiración, para enfrentar los desafíos inherentes a la vida urbana. El estudio

de organismos como aves, termitas, hormigas y abejas ha sido fundamental para resolver complejas problemáticas en entornos urbanos. Estos estudios, que han encontrado aplicaciones en diversos campos, incluido el diseño de redes de transporte, han promovido el desarrollo de soluciones basadas en sistemas biológicos. Estas respuestas, apuntaladas por modelos paramétricos y algoritmos digitales, se configuran como un sendero prometedor para abordar de manera más eficaz los retos contemporáneos en el entorno urbano (García *et al.*, 2018).

En este sentido, recientemente, se ha explorado la viabilidad de emplear la estructura orgánica del moho limoso, *Physarum polycephalum*, como un modelo para proyectar y optimizar redes e infraestructuras urbanas. A pesar de su aparente simplicidad como organismo unicelular desprovisto de un centro cerebral, el moho limoso ha evolucionado durante millones de años, desplegando una destreza sorprendente en la configuración de su red tubular. Esta peculiaridad lo convierte en una fuente inspiradora y pertinente para la arquitectura y el urbanismo, desafiando las percepciones convencionales y sugiriendo enfoques innovadores para la planificación urbana del futuro.

Un ejemplo notable en esta línea de investigación se encuentra en el trabajo liderado en 2010 por Atsushi Tero, investigador de la Universidad de Hokkaido en Japón, quien en colaboración con expertos de diversas instituciones japonesas y del Reino Unido, llevó a cabo un estudio innovador que utilizó el moho limoso *Physarum polycephalum* como base para diseñar una red adaptativa eficiente, de inspiración biológica. En su exploración, se implementó una metodología que implicaba el uso de una placa de Petri, donde se dispuso una capa de Agar húmedo que emulaba la topografía de la ciudad de Tokio y sus alrededores. Posteriormente, se esparcieron copos de avena sobre la superficie húmeda, focalizándose en las áreas que requerían conexiones vitales en la circulación urbana. El moho limoso fue entonces colocado en el foco de la placa y se le permitió expandirse, desde el centro hacia afuera, en un entorno completamente oscuro durante aproximadamente un día. Esta expansión fue monitoreada mediante una cámara de video con iluminación infrarroja. Pasadas 26 horas, se iluminaron ciertas zonas del cultivo, simulando accidentes geográficos, ya que el organismo, siendo fotofóbico, evitaba la luz y, por lo tanto, no crecía en esas regiones. El resultado obtenido fue una red que demostró características comparables en términos de eficiencia, fiabilidad y costos, similares a la estructura real de la red ferroviaria de Tokio (Irving, 2022).

En una instancia posterior, se emprendió un experimento análogo que buscaba evaluar las redes de transporte a escala global. A diferencia del estudio en Tokio, en este caso, en lugar de introducir luz para simular accidentes geográficos en el cultivo, se limitó el espacio disponible para el desplazamiento del plasmodio, recortando el papel de filtro que lo contenía. Esta ausencia de control ambiental en el proceso y la mayor duración de cada ensayo, alrededor de 80 horas, marcaron diferencias significativas respecto a la investigación tokiota. Estos hallazgos se documentaron en el libro *"Bioevaluation of world transport networks"* de Andrew Adamatzky publicado en 2012, por la University of the West of England. Estos experimentos han sentado las bases para investigaciones ulteriores en lo concerniente al diseño de sistemas de transporte urbanos que permitan a los diseñadores especificar un costo máximo o un tiempo mínimo de viaje, generando redes diseñadas para cumplir con estos criterios. De acuerdo con el investigador Raphael Kay, adscrito a la Facultad de

Ciencias Aplicadas e Ingeniería de la Universidad de Toronto, estas estructuras biológicas han acumulado una amplia experiencia en la resolución de problemas arquitectónicos a lo largo de su extensa evolución, lo que les confiere una perspectiva única en este ámbito (Irving, 2022). Estos organismos biológicos ofrecen valiosas lecciones para abordar cuestiones complejas en redes autoorganizadas, abarcando la planificación de carreteras, ferrocarriles y el enrutamiento de sensores inalámbricos a nivel urbano (Kay *et al.*, 2022). Con el avance en la capacidad de procesamiento de los sistemas digitales y la intención de replicar el comportamiento de los organismos biológicos mediante modelos computacionales, se han propuesto varios algoritmos matemáticos de optimización de redes inspirados en el modelo de crecimiento de este espécimen. Para el investigador británico Jeff Jones (2015), estos sistemas se dividen en dos enfoques principales: aquellos con un enfoque “*top-down*”, que parten de la observación del comportamiento de *Physarum* de manera global, y aquellos que adoptan una perspectiva “*bottom-up*”, centrados en los comportamientos locales del organismo, como la quimiotaxis. En esencia, la conceptualización formal de las redes urbanas mediante modelos matemáticos digitales establece analogías con sistemas biológicos, donde las vías y caminos se asemejan a venas y arterias por las cuales fluye el tránsito de vehículos, personas o bienes.

Basado en estos conceptos y partiendo de la premisa de que la estructura orgánica del moho limoso podría aportar soluciones para mejorar la eficiencia y la resiliencia de las redes urbanas, este trabajo se centra en desentrañar los principios fundamentales que rigen la formación de los tejidos de este organismo, con el fin de aplicarlos en la optimización de entornos urbanos. Para lograrlo, se emplearán tecnologías digitales y sistemas de información para desarrollar modelos que emulen su crecimiento.

Un elemento central en esta investigación es la inclusión de nodos atractores, los cuales se ajustarán según la densidad de población y los flujos de personas, permitiendo así la creación de redes urbanas más inteligentes y resilientes. Con el propósito de evidenciar la viabilidad de estos conceptos en la práctica, este artículo se enfocará en desarrollar un modelo algorítmico específico basado en el sistema de metro de la ciudad de Buenos Aires, con la intención de mejorar su eficiencia y sostenibilidad. Estos algoritmos, fundamentados en la evolución biológica, se vislumbran como una solución pertinente para abordar problemas complejos de optimización con múltiples variables. Este enfoque innovador, que fusiona la biología con la arquitectura, representa una frontera emergente en el ámbito del urbanismo y ofrece aplicaciones de gran relevancia en una variedad de contextos urbanos.

Explorando el Potencial del *Physarum Polycephalum* en la Planificación Urbana

El *Physarum Polycephalum*, un organismo unicelular que guarda similitud con una ameba, fue descubierto a mediados del siglo XIX, y desde la década de 1960 ha sido objeto de investigaciones para comprender su modo de vida. A pesar de su apariencia similar a la de los hongos durante su fase de esporangio, este organismo pertenece a la especie Physrales, subclase Myxogas-tromyceratae, clase Myxomicota, siendo ocasionalmente denomina-

do como moho del limo (Rodríguez López, 2023). Se han identificado más de 200 cepas de *Physarum polycephalum*, diferenciándose principalmente en términos de la cantidad de ADN nuclear, el número de cromosomas o la capacidad de fusión con plasmodios de genotipo diferente (Menéndez Ramos, 2021). A diferencia de organismos que presentan circuitos neuronales complejos, el *Physarum polycephalum* ha evolucionado a lo largo de cientos de millones de años, adoptando un enfoque fluido y descentralizado para construir una red interconectada como parte de su estrategia de búsqueda de alimentos, principalmente elementos en descomposición, en áreas frescas, sombrías y con una alta humedad (Irving, 2022).

Con una tasa de crecimiento notable que oscila entre 1 mm/h y 1 cm/h, este organismo no neuronal exhibe comportamientos sumamente sofisticados al conformar una red tubular descentralizada y eficiente de venas amarillo-verdosas, capaz de procesar información, tomar decisiones informadas y aprender, con el propósito de hallar la ruta más corta según las indicaciones del entorno nutricional (Kay *et al.*, 2022). Su citoesqueleto tubular y gelatinoso opera como un motor molecular con variabilidad espacial, compuesto por unidades oscilatorias distribuidas que generan contracciones ondulatorias. Estas contracciones, influenciadas por estímulos atractivos (por ejemplo, alimentos) y repulsivos en el ambiente (por ejemplo, luz), estimulan el flujo citoplasmático hacia áreas ricas en nutrientes (Kay *et al.*, 2022). Esta red primaria conecta múltiples fuentes de alimento repartidas de manera fragmentaria, minimizando la longitud total y reconfigurándose dinámicamente al encontrar nutrimentos, eliminando redundancias para optimizar el transporte de nutrientes. Esto da lugar a la formación de rutas directas e indirectas entre fuentes de nutrición, demostrando una significativa tolerancia a desconexiones accidentales, lo que lo posiciona como un modelo biológico excepcional (un árbol matemático mínimo) (Kay *et al.*, 2022). El ciclo vital del *Physarum* inicia con la formación de esporas a partir de un organismo mayor. Estas esporas germinan, originando nuevas amebas que se convierten en mixozoosporas haploides. Las mixozoosporas se dividen y producen cigotos ameboides, dando como resultado un plasmodio con múltiples núcleos diploides, fase predominante en su ciclo. El plasmodio se expande en búsqueda de alimento, desarrollando una estructura tubular que comprende secciones en forma de esponja y de tubo. En ausencia de nutrientes, se forman tallos de esporangios para la reproducción.

En condiciones desfavorables, el *Physarum* tiene la capacidad de ingresar a un estado conocido como esclerocio, caracterizado por la formación de paredes celulares robustas. El proceso de cultivo de *Physarum* implica una transición desde la fase esclerociada a la etapa plasmoidal, idealmente a alrededor de 25°C, aunque en ciertos contextos experimentales, este factor no ha sido considerado.

El crecimiento de *Physarum* se desarrolla en dos fases distintas: una fase exploratoria, donde busca activamente fuentes de alimento, seguida por la retracción de ramificaciones superfluas para priorizar conexiones beneficiosas. Su desplazamiento es resultado de corrientes citoplasmáticas y contracciones regulares de su membrana exterior. Esta dinámica permite la absorción de nutrientes y la determinación de rutas óptimas hacia los recursos alimenticios, evitando áreas previamente exploradas y almacenando información en lo que podría describirse como una memoria externa. A través de este proceso, el *Physarum* optimiza sus redes y resuelve laberintos de manera eficiente. Además, demuestra habilida-

des de memoria y aprendizaje, evidenciadas por su capacidad para reducir la velocidad de movimiento como respuesta a condiciones adversas, incluso después de haber cesado el fenómeno. Esta habilidad está vinculada estrechamente con su aptitud para la navegación en ambientes complejos. Estos mecanismos adaptativos resaltan la condición de este organismo para ajustar su comportamiento en función de las circunstancias, lo que refleja una notable adaptabilidad en entornos cambiantes.

La Construcción Algorítmica de un Modelo Biológico

En el ámbito de la biología, los investigadores recurren frecuentemente a la construcción de modelos experimentales con el objetivo de estudiar sistemas naturales y así simular sus comportamientos. Esencialmente, un modelo se define como una abstracción teórica del mundo real, una representación simplificada de un sistema complejo (Dartnell, 2012). La creación de estos modelos permite el análisis, la descripción, la explicación y la simulación de fenómenos o procesos en estudio. La esencia fundamental de cualquier modelo reside en su habilidad para simplificar el problema planteado, capturando las características esenciales del sistema en estudio con el suficiente nivel de detalle para predecir de manera válida su comportamiento, obviando aquellos datos superfluos. Un modelo exitoso debe tener una estructura adaptable, capaz de abordar diversas escalas del problema y ajustarse dinámicamente para alcanzar los objetivos establecidos (Fraile, 2019).

El avance de los procedimientos científico-digitales ha multiplicado los métodos, técnicas y teorías disponibles para crear distintos tipos de modelos. Dentro del ámbito específico del diseño urbano, la utilización de una variedad de modelos ha demostrado su eficacia en la resolución de numerosos inconvenientes, siendo las infraestructuras relacionadas con el transporte una de las áreas más destacadas. Y si bien, está problemática no constituye un campo novedoso, su estudio ha sido motivo de preocupación durante décadas, evolucionando en consonancia con los avances en ingeniería informática, los cuales han permitido soluciones cada vez más efectivas. Este proceso de optimización se lleva a cabo mediante la aplicación de herramientas informáticas especializadas, como los “*scripts*”, programas diseñados para manejar un conjunto limitado de variables y ejecutar procesos repetitivos de manera automatizada. Estas herramientas proporcionan la capacidad para la construcción, modificación y análisis de modelos, abriendo así nuevas posibilidades para la obtención de múltiples respuestas que abarcan una amplia gama de problemas proyectuales y de planificación urbana.

No obstante, para que este proceso sea efectivo, es fundamental instruir a la máquina sobre las acciones a ejecutar. Se requiere una secuencia de rutinas que establezcan los pasos a seguir, una serie de comandos e instrucciones, un código programático que indique a la computadora qué variables procesar y cómo realizar dicho procesamiento. Es crucial distinguir cuáles son los procesos más congruentes con el entorno, qué puntos deben interconectarse y cómo alcanzar dichas conexiones. Como menciona Brady PETERS, no hay magia en la informática; la clave reside en comprender los parámetros de un proyecto y desglosarlos en reglas definidas (Freiberger, 2012). Una vez detectados estos elementos,

es factible establecer sus interrelaciones para poder evaluar el modelo resultante (Fraile, 2012).

En una exposición más detallada de la problemática abordada en este documento, los algoritmos destinados a simular el comportamiento del moho limoso pueden categorizarse en tres tipos principales, cada uno con características distintivas y aplicaciones específicas en la optimización de redes y la generación de patrones proyectuales urbanos. En primer término, los algoritmos basados en el modelo de conductividad de flujo, como el propuesto por Atsushi Tero (2007), que replica la estructura tubular del *Physarum* al modelar el flujo variable en sus tubos mediante la aplicación de la ecuación de flujo de Poiseuille. Este enfoque considera algunos nodos como emisores (fuentes de alimento) y otros como receptores (posición original del plasmodio), estableciendo una diferencia de presión que regula el flujo en el tubo correlacionado con la concentración de nutrientes. No obstante, su eficacia se encuentra limitada al presuponer una red preexistente, evitando la complejidad inherente a la creación de redes y la consideración de diferentes factores que influyen en este proceso. En segundo término, los algoritmos inspirados en el modelo celular, desarrollado según la propuesta de Yukio-Pegio Gunji (2008), estos algoritmos tienen en cuenta el crecimiento y el movimiento del plasmodio, reflejando las distintas fases de su desarrollo y búsqueda de alimento. Este modelo contempla estados en el espacio que van desde la ausencia de *Physarum* hasta su presencia inmóvil o móvil, y la existencia de una fuente de alimento, conduciendo a la colonización del espacio por parte del organismo. Finalmente, los algoritmos desarrollados mediante modelos multi-agente, introducidos por Jeff Jones (2015), este modelo involucra el desplazamiento de múltiples agentes que interactúan con el entorno, representando el flujo citoplasmático de *Physarum*. La estructura de red resultante surge de la interacción colectiva de estos agentes, coordinada a través de los rastros dejados en el ambiente, análogo al mecanismo de expansión observado en colonias de hormigas. Este tipo de algoritmo ha sido adaptado con éxito en el software de diseño tridimensional *Physarealm* (Rodríguez López, 2023).

El Algoritmo Multi-agente de Jeff Jones

El algoritmo desarrollado por Jones representa un hito en el ámbito de los algoritmos estigmérgicos multi-agente. Su dinámica, se concibe a través del movimiento de estos agentes dirigidos por vectores de fuerza, compuestos por un componente estocástico y otro determinista. La relación entre la magnitud de la fuerza (F) ejercida por la presencia de alimento sobre el agente, la distancia (D), y una constante de fuerza (c) que describe la fuerza producida por una fuente de nutrientes sobre un agente, permite modelar esta acción, y queda definida mediante una ecuación detallada y precisa (Kay *et al.*, 2022).

Este proceso sensorial se articula a través de un mecanismo detallado: cada agente, situado en un cuadrado verde, cuenta con antenas sensoriales (F , FR y FL). Si la antena F detecta una concentración superior de quimioatrayentes en comparación con FL o FR , el agente prosigue su trayectoria actual. No obstante, si FL o FR detectan una intensidad mayor, el agente gira en la dirección correspondiente. Durante este proceso, se ajustan parámetros

como SA (Ángulo del Brazo Sensorial), SO (Desplazamiento del Sensor) y SW (Ancho del Sensor). Además, variables como el tamaño de la población inicial (%p), la longitud del paso del agente (SS, Longitud de Paso), el ángulo de rotación del agente (RA, Ángulo de Rotación) y la tasa de deposición de rastros (depT, Tasa de Deposición de Rastros) se configuran para incidir de manera significativa en las estrategias de navegación y el comportamiento de los agentes en este contexto algorítmico (Ver Figura 1).

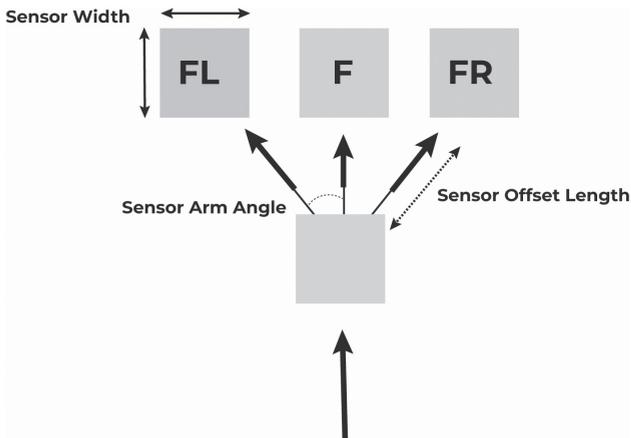


Figura 1.
Morfología del sensor desarrollado por Jeff Jones.

Redefiniendo el Algoritmo de Jones

Basándose en el concepto de estigmergía¹, introducido por Jones para modelar sistemas multiagentes a través de comportamientos individuales simples, el diseñador Ma Yi Dong de la Universidad Tsinghua en China ha ideado un algoritmo que replica el comportamiento del *Physarum polycephalum* en términos de formación, crecimiento y optimización. El mecanismo de detección se basa en sensores dispuestos en esferas alrededor de cada agente, cuyas posiciones se definen mediante diversos parámetros:

- **Emitter:** Punto, curva o superficie de origen de los agentes iniciales.
- **Food:** Puntos o superficies hacia los cuales los agentes son atraídos.
- **Environment:** Medio en el que interactúan los agentes.
- **Core:** Simula el comportamiento del *Physarum*, recopila datos y controla el crecimiento a través de los agentes.

Además, se pueden definir parámetros que regulan el crecimiento de la simulación:

- **Vertical Guide Factor (VGF):** Afecta el movimiento vertical de los agentes.
- **Initial Velocity (IV):** Determina la velocidad de los agentes iniciales.
- **Probability of Escape (EscP):** Establece la probabilidad de que los agentes eviten obstáculos.
- **Speed Setting:** Define la velocidad máxima de los agentes.
- **Death Distance Setting:** Determina la distancia a la cual un agente muere si está aislado.
- **Sensor Setting:** Controla el ángulo y alcance de las antenas sensitivas (SA), el ángulo de rotación de los agentes (RA) y la máxima distancia a la que los agentes perciben los atrayentes (SO).
- **Detect Direction Setting:** Define la dirección de detección.
- **B/D Setting:** Determina el radio de detección para la creación y eliminación de agentes.

Estos parámetros confieren a los agentes del programa la capacidad de manifestar comportamientos como reinicio, disgregación, dispersión, reproducción, evasión de obstáculos y degradación, facilitando así la simulación de procesos complejos similares a los observados en el comportamiento biológico del *Physarum polycephalum*.

El Sistema de Subterráneos de Buenos Aires: Evolución, Retos y Desafíos Futuros

El 1° de diciembre de 1913 se erigió como un hito histórico con la inauguración del primer sistema de transporte subterráneo en Buenos Aires, consolidando a la ciudad como pionera en Hispanoamérica y el hemisferio sur en esta innovación.

La construcción inicial de la primera línea, conocida hoy como la Línea A, fue llevada a cabo por la Compañía de Tranvías Anglo Argentina, tras recibir una concesión en 1909. Cuatro años después, los primeros vagones de madera de la empresa belga La Brugeoise surcaban por este innovador sistema subterráneo. En su fase primigenia, esta línea conectaba las estaciones Plaza de Mayo y Plaza 11 de septiembre (actualmente Miserere). Su expansión se materializó al año siguiente, alcanzando Río de Janeiro y luego Caballito. Paralelamente, en 1912, la compañía Lacroze Hermanos obtuvo la licencia para edificar la Línea B, que se abrió al público en 1930. Durante ese mismo período, la Compañía Hispano Argentina de Obras Públicas y Finanzas (CHADOPyF) inició las obras de la Línea C, abierta en 1936; seguida por la Línea D, entre 1937 y 1940; y el comienzo de la Línea E, operativa para el público en 1944 gracias a la Corporación de Transportes de la Ciudad de Buenos Aires. En ese año, el gobierno nacional asumió la administración del subte, conformando una estructura que abarcaba 30 kilómetros y 53 estaciones. La más reciente adición, la Línea H, fue inaugurada por Subterráneos de Buenos Aires Sociedad del Estado (SBASE) en 2007 (PETERS, 2015).

Con el transcurso del tiempo, el flujo cotidiano de residentes y visitantes que convergen en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires resalta la importancia vital del sistema de transporte

público, particularmente el servicio subterráneo, debido a su combinación inherente de rapidez, eficiencia, seguridad y sostenibilidad ambiental.

En el momento inaugural de la primera línea del sistema de subterráneos de Buenos Aires, la población de la ciudad y su Área Metropolitana se estimaba en dos millones de habitantes. No obstante, con la implementación de la quinta línea, la Línea E, esta cifra se había duplicado, alcanzando casi cinco millones de habitantes. A pesar de este persistente aumento demográfico², la expansión del sistema subterráneo no mantuvo la misma cadencia, fenómeno atribuido, entre otros factores, a la irrupción de los autobuses a principios de la década de 1930.

Según el análisis de PETERS (2015) el microcentro de la ciudad, delimitado en una zona de un kilómetro y medio cuadrado por las avenidas Belgrano, Paseo Colón-Leandro N. Alem, Córdoba y 9 de Julio, aloja aproximadamente 13 estaciones, de las cuales cuatro operan como terminales. Este conjunto representa alrededor de una sexta parte del total de estaciones dentro de la red, ocupando tan solo el uno por ciento del área construida de la ciudad. Antes de la apertura de la Línea H, el microcentro disponía únicamente de cuatro puntos de transbordo. A pesar de que el sistema de subterráneo abarca el 16 por ciento del espacio edificado en la ciudad, estos puntos no ofrecían una alternativa significativamente más eficiente que el transporte en automóvil. La expansión de la Línea H, operativa parcialmente desde 2007, abordó esta deficiencia al establecer tres nuevos puntos de conexión con las líneas A, B y E, ubicados fuera del microcentro. Aunque las expansiones en curso de esta línea han añadido más centros de empalmes al sistema subterráneo, los centros de transbordo necesitan mejoras en comodidad y funcionalidad, especialmente los nodos del Obelisco y del Cabildo, que son triples, lo que enmaraña las soluciones técnicas para los movimientos de transbordo y reduce su atractivo para los pasajeros. A pesar de la complejidad y coste asociado, la mejora de estos puntos resulta imprescindible.

Tras más de un siglo desde sus primeras concesiones, el desarrollo y la modernización del sistema de subterráneos emergen como prioridades fundamentales para la Ciudad. Esto destaca la necesidad imperiosa de un plan estratégico que se ajuste a los requerimientos actuales [3]. En un primer plano, la red requiere una visión holística que vaya más allá del enfoque original del siglo pasado, adaptándose a las demandas contemporáneas. El desafío principal radica en la configuración de la red, concentrada en el microcentro, específicamente en la Plaza de Mayo, sin haber logrado extender sus trazados de manera óptima para una cobertura y conectividad interna más amplia en el Área Central y los barrios de la periferia. En segundo lugar, los puntos de intercambio han sido escasamente considerados en sus diseños originales, generando complejas y saturadas interacciones debido al alto flujo de pasajeros, lo que demanda inversiones eficientes en proyectos de gran envergadura para solventar esta situación (PETERS, 2015).

La estrategia primordial consiste en situar el sistema de subterráneos en áreas críticas, tales como corredores densamente poblados, el núcleo central urbano y los barrios de la periferia, donde la demanda de movilidad es alta y se requiere una respuesta ágil. Una táctica adicional estriba en establecer una red interconectada con múltiples puntos de intercambio, con el propósito de minimizar las distancias recorridas por los usuarios. La introducción de nuevas líneas transversales se percibe como una oportunidad para captu-