

rar y gestionar eficientemente los desplazamientos internos en zonas altamente habitadas (PETERS, 2015) (Ver Figura 2).



Figura 2. Trazado de la red de metros de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Rediseñando el Transporte Subterráneo de Buenos Aires con Tecnología Biodigital

El proyecto se enfoca en optimizar la red de transporte subterráneo de Buenos Aires mediante la implementación del algoritmo de Ma Yi Dong, inspirado en *Physarum polycephalum*. Este algoritmo, análogo al guarismo de colonia de hormigas, se basa en el enfoque desarrollado por el informático británico Jeff Jones en 2009, caracterizado por su sistema móvil de múltiples agentes con comportamientos individuales simples.

La metodología empleada por el algoritmo se desarrolla mediante la configuración de una estructura de cuadrícula que interactúa con el entorno. Para su implementación, se utilizó un mapeo detallado de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, focalizándose particularmente en sus barrios y estaciones de metro ya existentes. El análisis se inició trazando el límite perimetral de la ciudad, delineando así la zona de estudio. Las estaciones de metro

preexistentes se señalaron como puntos de referencia en el plano urbano (fuente de alimento), mientras que la Plaza de Mayo se seleccionó como lugar de origen para simular el desarrollo del sistema. Este enfoque conlleva la creación de una simulación computacional, un modelo propuesto para la red de transporte de Buenos Aires. Este modelo considera aspectos como la demanda de pasajeros y las distancias entre los diversos distritos, con el propósito fundamental de encontrar la combinación óptima de líneas de transporte. En la etapa inicial, el sistema presentaba una disposición específica de entidades digitales, manteniendo distancias predefinidas entre los agentes individuales. Según el algoritmo, cada entidad fijaba su posición con respecto a sus vecinos mientras buscaba alimento. Esta adaptabilidad permitía que, ante cualquier cambio en la ubicación de un agente, el sistema se reajustara acorde a este nuevo parámetro. A lo largo de las simulaciones, se llevaron a cabo ajustes sistemáticos en varios parámetros con el objetivo de lograr una red de conexiones equilibrada. Este proceso tenía como finalidad primordial inducir trayectorias más coherentes entre los agentes, evitando así la tendencia a una dispersión excesiva que pudiera derivarse de ajustes inapropiados de sus variables.

En el transcurso de este procedimiento, el objetivo primordial se centró en identificar los patrones más representativos en los resultados de la simulación, orientados hacia su confrontación posterior con la red de transporte existente. Con el fin de simplificar el modelo, se obviaron los obstáculos en el proceso y, a través de la experimentación, se procuró evitar conclusiones que condujeran al aislamiento de barrios. En este contexto, se priorizó la eficiencia de las soluciones que facilitarían el transporte de una mayor cantidad de pasajeros entre áreas, minimizando la distancia recorrida (*Ver Figura 3*).

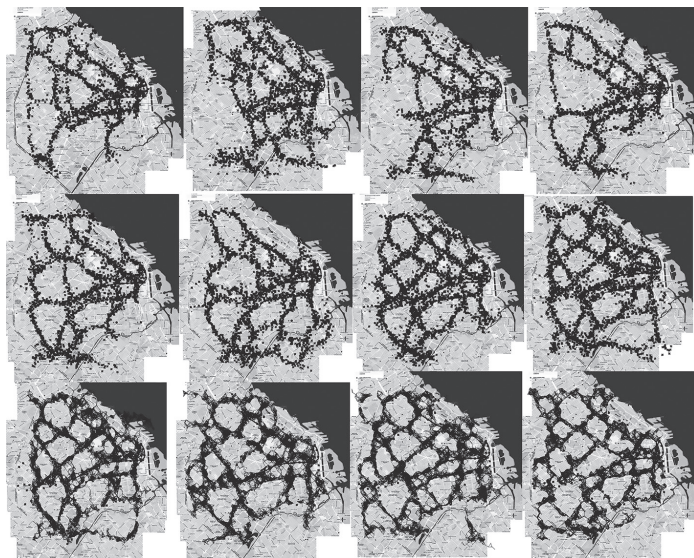


Figura 3.
Reconfiguración
dinámica de las rutas
de los agentes en la
búsqueda de una
solución efectiva.

La fase inicial de la simulación estableció parámetros de referencia que permitieran el movimiento fluido de los agentes a través de las diferentes estaciones existentes. A lo largo de las iteraciones del algoritmo, se ajustaron estos parámetros para optimizar su rendimiento. Los segmentos de ruta definidos variaron en diámetro en función de la frecuencia de uso, determinada en el proceso de establecer los tiempos de viaje más cortos entre puntos específicos. Esta variabilidad en la configuración de la red añadió una dimensión adicional, permitiendo abordar simultáneamente problemas de flujo y planificación de rutas.

Una vez consolidada una estructura fiable en el modelo, siguiendo las indicaciones del algoritmo, se definieron nuevos puntos de referencia simulando el progreso de la línea de metro y la inclusión de nuevas estaciones. Luego, sucesivas ejecuciones del algoritmo permitieron calcular estos avances y redefinir el modelo, buscando precisar su evolución. Finalmente, tras ejecutar los ajustes necesarios, quedó concretada la estructura del trazado, compuesta por nuevos segmentos de ruta que se adecuaban a las capacidades requeridas (Ver Figura 4).

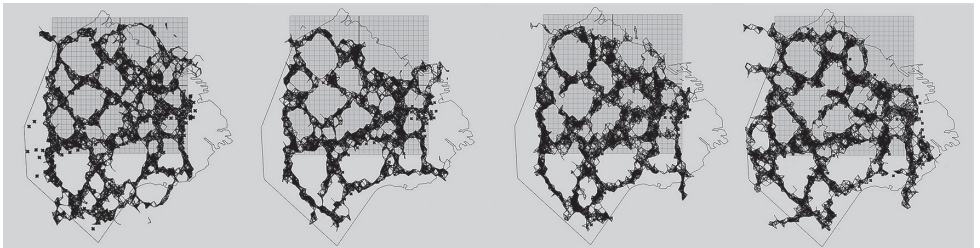


Figura 4. Reconfiguración dinámica de las rutas de los agentes en la búsqueda de una solución efectiva.

Como consecuencia de la aplicación de este modelo, se llevaron a cabo extensiones y creaciones significativas en el sistema de transporte subterráneo de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Los ajustes incluyeron:

- Extensión de la línea A hacia el Oeste, siguiendo la Avenida Rivadavia hasta el barrio de Liniers, y su expansión hasta la Avenida General Paz.
- Extensión de la línea B hacia el Norte, alcanzando el barrio de Saavedra.
- Extensión de la línea C hacia el Sur, ampliando su recorrido hasta el barrio de Barracas.
- Extensión de la línea D hacia el Norte por la Avenida Cabildo hasta el barrio de Núñez.
- Extensión de la línea E hacia el Suroeste, abarcando Villa Lugano.
- Extensión de la línea H hacia el Sur, llegando hasta Nueva Pompeya.
- Extensión del Premetro, hacia el Sur hasta Villa Riachuelo y hacia el Norte hasta Villa Pueyrredón / Villa Urquiza.

- Creación de una nueva línea G, de naturaleza circular, que conecta transversalmente las distintas líneas de metro.
- Creación de una nueva línea L, estableciendo una conexión entre el barrio de Versalles al Oeste y el barrio de Belgrano al Norte.
- Creación de una nueva línea I, conectando los barrios de Villa Real y Villa Devoto al Oeste, con Ciudad Universitaria al Norte (Ver Figuras 5a y b).

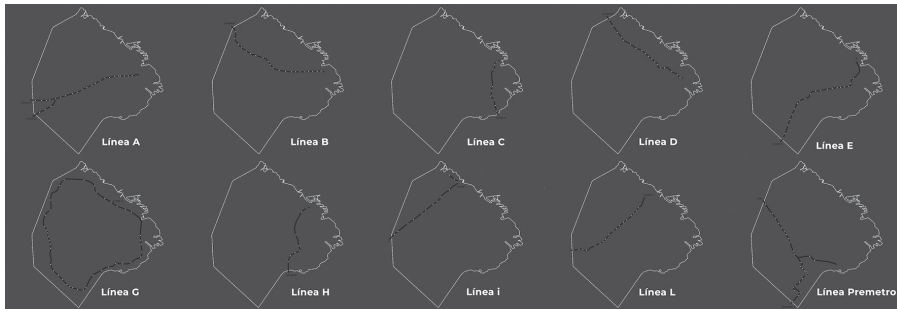


Figura 5. Expansión y creación de líneas de metro mediante una solución efectiva desarrollada por el algoritmo.

Discusión

Las redes urbanas, altamente complejas, representan un reto para las administraciones de gobierno, demandando sistemas especializados para garantizar la movilidad de la población, de los bienes y de los servicios. En entornos metropolitanos donde convergen múltiples redes, como el metro, ferrocarriles y carreteras, la conectividad efectiva entre las diversas estaciones se convierte en un desafío primordial para optimizar rutas, minimizar tiempos y distancias hacia el destino final, a la vez de reducir los costos operativos. En este sentido, la presente discusión se encuentra centrada en la creación de un sistema de transporte sostenible, destacando la importancia de la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental (Larrode Pellicer *et al.*, 2015).

Desde este punto de vista, el modelo bioinspirado ha demostrado un notable desempeño en diversas áreas evaluadas, dando como resultado una red que no solo es más eficiente, sino también es capaz de reducir los tiempos de transporte en comparación con sistemas preexistentes, al ampliar las opciones a través de rutas alternativas. Esencialmente, este método representa una práctica emergente en el ámbito del urbanismo, una herramienta analítica/proyectual con una interfaz gráfica que fomenta la interacción, la comunicación y la colaboración entre diversos elementos, permitiendo así el diseño de ciudades mediante herramientas tecnológicas de vanguardia.

Esta amalgama entre lo biológico y lo digital constituye un nuevo paradigma científico y tecnológico, caracterizado por su complejidad y artificialidad. Este método, en línea con la descripción de Manuel DeLanda, utiliza modelos algorítmicos para generar agentes virtuales capaces de tomar decisiones autónomas, prescindiendo de un control centralizado (Leach, 2009). Se trata de un enfoque basado en inteligencia de enjambre operando en diversas escalas, permitiendo análisis, simulaciones y evaluaciones de múltiples variantes a través de un conjunto extenso de entidades virtuales conocidas como “partículas”. Estas partículas representan diversos elementos urbanos, tales como personas, edificios, vehículos o espacios públicos, distribuyéndose en el espacio de estudio y conformando un enjambre informal de puntos de referencia.

El comportamiento de estas partículas, análogo a la dinámica observada en colonias de abejas, se manifiesta mediante interacciones mutuas, funcionando como nodos activos que se comunican en tiempo real y siguen reglas fundamentales de actuación. Estas interrelaciones, calculadas múltiples veces por segundo por cada agente, emergen sin un conocimiento consciente del comportamiento colectivo, evidenciando una similitud con los patrones emergentes presentes en sistemas biológicos.

La representación posicional mediante coordenadas define los valores de las variables de decisión en este modelo. Cada partícula, guiada por reglas predefinidas, genera resultados basados en su posición actual y su destino anticipado. Un algoritmo adaptable ajusta la ubicación de estas partículas utilizando vectores de velocidad, explorando un espacio de parámetros para identificar soluciones alternativas (Duarte Muñoz *et al.*, 2007). Estos puntos conforman una malla ajustable que integra distintas configuraciones urbanas, promoviendo la generación de redes de infraestructura y circulación más eficientes, complementando así las estructuras existentes.