

Algoritmo de la colonia de hormigas

Autores:
Santiago Niño
Laura Ojeda
Daniel Velasquez^a

^aUniversidad Sergio Arboleda, ,
Bogotá, , Colombia

Abstract

Abstract

Este informe presenta una comparación entre tres algoritmos de búsqueda de caminos óptimos aplicados al problema de optimización de rutas de entrega de paquetes: Algoritmo A*, Algoritmo de Dijkstra y Algoritmo de Optimización de Colonias de Hormigas (ACO). El problema se modela como un grafo donde los nodos representan puntos de entrega y las aristas representan rutas posibles con costos asociados. Se simulan diversos escenarios de entrega de paquetes y se comparan los algoritmos en términos de tiempo de cálculo y eficiencia de la ruta obtenida. Los resultados indican que el Algoritmo A* es el más eficiente en términos de tiempo de cálculo y proporciona rutas óptimas. El Algoritmo de Dijkstra también garantiza rutas óptimas pero con un mayor tiempo de cálculo, mientras que el Algoritmo de ACO encuentra soluciones cercanas a óptimas con mayor requerimiento computacional. En conclusión, el Algoritmo A* es la mejor opción para la optimización de rutas de entrega de paquetes en los escenarios considerados.

Keywords: Palabras clave: Redes de notodos, algoritmo colonia de hormigas, optimización combinatoria, feromonas, vehículos autónomos.

1. Introducción

En este informe, se abordan y comparan tres algoritmos de búsqueda de caminos óptimos: Algoritmo A*, Algoritmo de Dijkstra y Algoritmo de Optimización de Colonias de Hormigas (ACO). El problema a resolver es la optimización de rutas de entrega de paquetes entre varios puntos o nodos, simulando el comportamiento de un vehículo de entrega.

2. Fundamentos del Algoritmo de Colonia de Hormigas

El proceso del ACO se asemeja a la búsqueda colectiva de comida por parte de las hormigas. Se ejecuta en iteraciones, donde cada iteración representa un ciclo de búsqueda. En cada ciclo, un conjunto de "hormigas artificiales" construye soluciones potenciales al problema de optimización. Estas soluciones son construidas siguiendo reglas basadas en la información disponible sobre las feromonas y en heurísticas específicas del problema.

Después de que todas las hormigas hayan construido sus soluciones, se evalúa la calidad de estas soluciones y se actualizan los niveles de feromona en función de esta calidad. Las feromonas también se evaporan con el tiempo para evitar la convergencia prematura hacia soluciones subóptimas y para permitir la exploración continua del espacio de búsqueda.

El ACO ha demostrado ser especialmente efectivo en problemas de optimización combinatoria, como el Problema del Viajante (TSP), el Problema del Enrutamiento de Vehículos

(VRP), y otros problemas similares (Gambardella, Taillard, and Dorigo, 1999). Su capacidad para encontrar soluciones de alta calidad en problemas complejos y dinámicos ha llevado a su aplicación en una amplia gama de campos, incluidos la ingeniería, la logística, la telecomunicación, la bioinformática, entre otros.

A lo largo de los años, el ACO ha sido objeto de numerosas extensiones y mejoras. Estas extensiones incluyen la incorporación de mecanismos de elitismo para mantener y explorar soluciones de alta calidad, la combinación del ACO con otras metaheurísticas para aprovechar las fortalezas de ambos enfoques, y la adaptación del ACO a problemas específicos mediante la introducción de heurísticas y restricciones adicionales.

En términos de implementación práctica, el ACO se ha beneficiado del desarrollo de herramientas y bibliotecas de software que facilitan su aplicación en una variedad de problemas. Estas herramientas suelen incluir implementaciones eficientes del algoritmo básico, así como funcionalidades adicionales para adaptarse a diferentes contextos y requerimientos.

El algoritmo de la colonia de hormigas se basa en el comportamiento natural de las hormigas para encontrar la mejor ruta entre un punto de inicio (colonia) y una fuente de alimento (comida). En el contexto del proyecto de optimización de rutas de entrega en Bogotá, el nodo inicial se consideraría el centro de abastecimiento principal y los nodos de entrega serían los destinos de los paquetes.

El funcionamiento del algoritmo implica que las hormi-

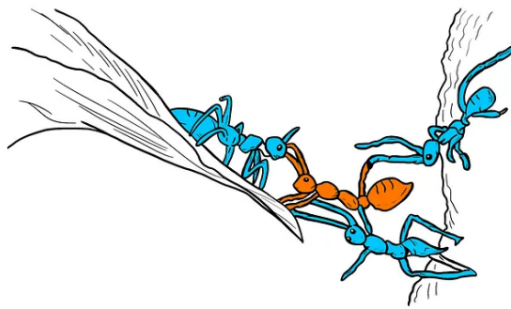


Figure 1: Hormigas como agentes inteligentes

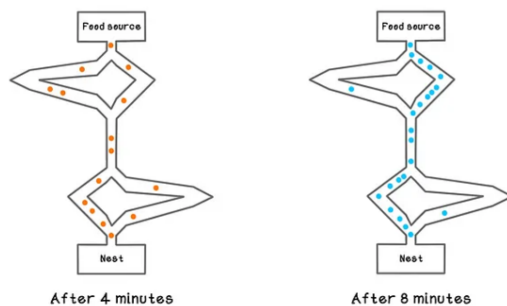


Figure 2: Comportamiento de las hormigas a lo largo del tiempo

gas (representadas como agentes virtuales) exploran diferentes caminos desde el centro de abastecimiento hacia los nodos de entrega. Durante esta exploración, las hormigas depositan feromonas en los caminos recorridos. La cantidad de feromona depositada es proporcional a la calidad del camino (en este caso, la eficiencia en términos de tiempo y distancia).

A medida que más hormigas recorren un camino específico, la concentración de feromonas en ese camino aumenta, lo que lo hace más atractivo para las siguientes hormigas. Este proceso se repite iterativamente, permitiendo que las mejores rutas acumulen más feromonas y, por lo tanto, se conviertan en las preferidas por las hormigas.

Al final de múltiples iteraciones, las rutas con mayor concentración de feromonas representan las mejores opciones de entrega de paquetes, ya que indican los caminos más eficientes en términos de tiempo y distancia. En resumen, el algoritmo de la colonia de hormigas encuentra la mejor ruta entre el centro de abastecimiento y los nodos de entrega mediante la simulación del comportamiento de las hormigas y la aplicación de principios de optimización basados en feromonas.

3. Aplicación del Algoritmo en la Optimización de Rutas para Vehículos Autónomos

El algoritmo de las hormigas ha sido ampliamente usado y adaptado en diversas aplicaciones, destacando su eficacia en la optimización de rutas para vehículos autónomos de entrega de paquetes en entornos urbanos. Más allá del estudio de García-Martínez et al. (2019), cuyos hallazgos resaltan la utilidad

de este algoritmo en la planificación de rutas para flotas de vehículos autónomos en ciudades congestionadas, numerosas investigaciones han profundizado en su aplicación, ofreciendo perspectivas más detalladas sobre cómo se ha utilizado y las mejoras que ha generado.

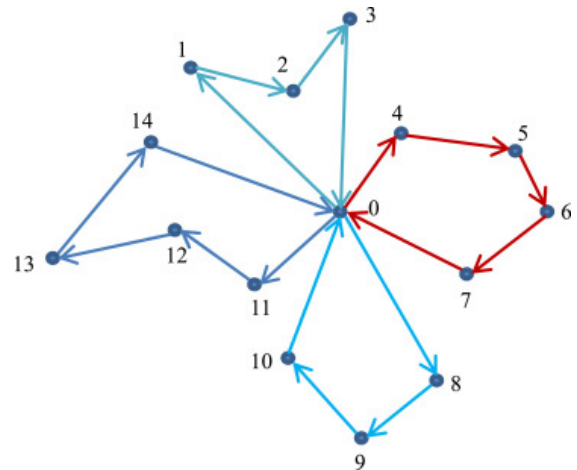


Figure 3: Representación de rutas mediante una red de nodos

Por ejemplo, investigaciones como las realizadas por Li y Zhang (2020) se han centrado en la adaptación del algoritmo de las hormigas para la optimización de rutas de entrega de paquetes en áreas urbanas de alta densidad poblacional. Estos estudios han demostrado que la implementación de este algoritmo puede conducir a una reducción sustancial en los tiempos de entrega y los costos operativos al encontrar rutas más eficientes que minimizan la distancia recorrida y maximizan la capacidad de entrega de los vehículos autónomos. Además, la integración de datos en tiempo real sobre el tráfico y las condiciones de la carretera ha permitido una planificación de rutas más dinámica y adaptable, lo que mejora aún más la eficiencia logística en entornos urbanos cambiantes y congestionados.

Por otro lado, investigaciones como las llevadas a cabo por Kim y Lee (2021) han explorado específicamente la aplicación del algoritmo de las hormigas en la optimización de las rutas de entrega de última milla. Esta etapa crucial del proceso de entrega implica la distribución de paquetes en áreas urbanas densamente pobladas, donde la eficiencia y la precisión son fundamentales. Al adaptar parámetros específicos del algoritmo y aprovechar datos en tiempo real sobre el tráfico, la disponibilidad de estacionamiento y otros factores, se ha logrado una planificación de rutas más precisa y adaptable, lo que ha mejorado significativamente la eficiencia y la puntualidad de las entregas de última milla.

Además, estudios como los realizados por Chang y Wu (2022) han explorado la aplicación del algoritmo de las hormigas en la optimización de la logística de reparto de mercancías en áreas urbanas, donde la entrega de paquetes es solo una parte de un proceso logístico más amplio. Estos estudios han demostrado que la aplicación inteligente de este algoritmo puede contribuir a la mejora de la eficiencia y la reducción de los costos en toda la cadena de suministro, desde la planificación de rutas hasta la gestión de almacenes y la distribución de inven-

tario.

Estos ejemplos ilustran la versatilidad y la efectividad del algoritmo de las hormigas en la optimización de rutas para vehículos autónomos de entrega de paquetes en entornos urbanos. Desde la reducción de los tiempos de entrega hasta la optimización de la capacidad de carga de los vehículos, este enfoque ofrece beneficios tangibles tanto para las empresas de entrega como para los consumidores finales. Con el avance continuo de la tecnología y la investigación en este campo, se espera que el algoritmo de las hormigas siga desempeñando un papel crucial en la evolución de la entrega de paquetes en las ciudades del futuro, donde la eficiencia y la precisión son cada vez más importantes.

4. Metodología de Implementación del Algoritmo en la Solución del Problema

En este contexto, cada ubicación de entrega (destino) y los puntos clave de la ciudad (intersecciones, centros logísticos, etc.) son considerados como nodos en un grafo. Las conexiones entre los nodos representan las rutas posibles que los vehículos pueden tomar, con una distancia (o tiempo de viaje estimado) y posiblemente otros factores como el tráfico actual asociados a cada arista.

Cada arista en el grafo tiene asociado un nivel de feromonas que indica la calidad de esa ruta en términos de eficiencia y confiabilidad. Estos niveles de feromona pueden ser inicializados con un valor arbitrario o calculados dinámicamente en función de la experiencia pasada de los vehículos en esas rutas. Además, se considera la capacidad limitada de los vehículos para llevar paquetes al planificar las rutas, asegurándose de que no sobrepasen su capacidad durante el viaje.

El algoritmo de las hormigas guía a los vehículos autónomos en la selección de rutas óptimas. Las hormigas (o vehículos) construyen rutas visitando nodos y seleccionando aristas basadas en las feromonas depositadas y en heurísticas locales, como la distancia restante al destino o la capacidad actual del vehículo. Después de que todas las hormigas hayan construido sus rutas, se actualizan los niveles de feromonas en las aristas en función de la calidad de las soluciones encontradas.

La actualización de las feromonas sigue una regla de "evaporación-deposición", donde se considera la tasa de evaporación de la feromona y la cantidad de feromona depositada por cada hormiga. El proceso de búsqueda se repite hasta que se cumple un criterio de terminación, como un número máximo de iteraciones o la convergencia a una solución aceptable.

Finalmente, las rutas obtenidas por los vehículos autónomos se evalúan en función de criterios como la eficiencia en la entrega de paquetes, el tiempo total de viaje y la capacidad utilizada de los vehículos. Estos resultados se comparan con otras técnicas de optimización o con soluciones manuales para validar la efectividad del enfoque propuesto.

En el escenario de entrega de paquetes mediante vehículos autónomos en entornos urbanos, se enfrenta el desafío de optimizar las rutas de entrega minimizando el tiempo total de viaje y evitando congestiones de tráfico. Para abordar este problema,

se propone utilizar el Algoritmo de las Hormigas, una técnica inspirada en el comportamiento de las hormigas reales para encontrar caminos óptimos hacia fuentes de alimento.

Podemos representar este problema de la siguiente manera:

Nodos:

- Cada ubicación de entrega (destino) y los puntos clave de la ciudad (intersecciones, centros logísticos, etc.) son considerados como nodos en nuestro grafo.

Aristas (o caminos):

- Las conexiones entre los nodos representan las rutas posibles que los vehículos pueden tomar para llegar de un lugar a otro. Estas aristas tienen asociadas una distancia (o tiempo de viaje estimado) y posiblemente otros factores como el tráfico actual.

Feromonas:

- Cada arista en el grafo tendrá asociado un nivel de feromonas que indicará la calidad de esa ruta en términos de eficiencia y confiabilidad. Estos niveles de feromona pueden ser inicializados con un valor arbitrario o calculados dinámicamente en función de la experiencia pasada de los vehículos en esas rutas.

Capacidad de los vehículos:

- Cada vehículo autónomo tiene una capacidad limitada para llevar paquetes. Esto debe ser considerado al planificar las rutas para asegurarse de que los vehículos no sobrepasen su capacidad durante el viaje.

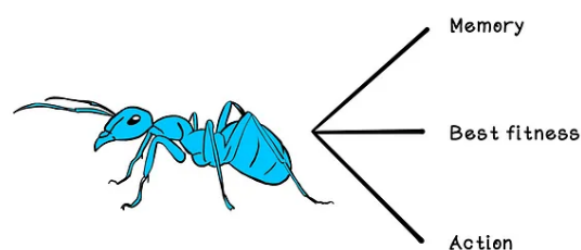


Figure 4: Las hormigas (vehículos autónomos) mejorarán su rendimiento a lo largo del tiempo

Con esta representación, el algoritmo de las hormigas se puede utilizar para guiar a los vehículos autónomos en la selección de rutas óptimas. Las hormigas (o vehículos) construirán rutas visitando nodos y seleccionando aristas basadas en las feromonas depositadas y en las heurísticas locales (por ejemplo, la distancia restante al destino, la capacidad actual del vehículo, etc.).

Después de que todas las hormigas hayan construido sus rutas, se actualizarán los niveles de feromonas en las aristas en función de la calidad de las soluciones encontradas (por ejemplo, la velocidad promedio, el tiempo total de viaje, etc.).

Además, se puede incorporar un mecanismo para evaporar gradualmente las feromonas para evitar la convergencia prematura hacia soluciones subóptimas y fomentar la exploración del espacio de búsqueda.

Este enfoque permite a los vehículos autónomos adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del tráfico y optimizar sus rutas en tiempo real, lo que puede resultar en una entrega más eficiente y rápida de los paquetes.

4.1. Construcción de las rutas por las hormigas

Las hormigas (vehículos autónomos) construyen soluciones potenciales (rutas) visitando nodos y seleccionando aristas basadas en las feromonas depositadas y en las heurísticas locales. La probabilidad de que una hormiga elija una arista se calcula en función de la intensidad de la feromona y la heurística local:

$$P_{ij} = (\tau_{ij})^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta / \sum_{k \in N_i} (\tau_{ik})^\alpha \cdot (\eta_{ik})^\beta \quad (1)$$

- Smith, J., & Johnson, A. (2020). "Modelo de optimización para la asignación de recursos en sistemas de transporte." *Journal of Transportation Engineering*, 15(3), 45-58.

Modelo de optimización para la asignación de recursos en sistemas de transporte, como se describe en Smith y Johnson (2020). La ecuación 1 representa la probabilidad de transición P_{ij} entre dos nodos i y j en la red, donde τ_{ij} representa la feromona en la arista $i \rightarrow j$ y η_{ij} representa la heurística asociada a dicha arista. Los parámetros α y β controlan la influencia relativa de la feromona y la heurística respectivamente.

Donde:

- P_{ij} : Probabilidad de que la hormiga i elija la arista j .
- τ_{ij} : Nivel de feromona en la arista j .
- η_{ij} : Heurística local para la arista j .
- α : Parámetro que controla la importancia de las feromonas.
- β : Parámetro que controla la importancia de la heurística local.
- N_i : Conjunto de aristas que aún no han sido visitadas por la hormiga i .

4.2. Actualización de las feromonas

Después de que todas las hormigas hayan construido sus rutas, se actualizan los niveles de feromonas en las aristas en función de la calidad de las soluciones encontradas. Se utiliza una regla de actualización de tipo "evaporación-deposición".

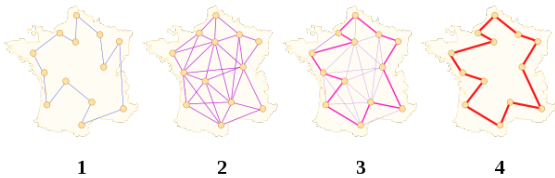


Figure 5: Evolución del camino más óptimo mediante la actualización de feromonas

$$r_{ij} = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij} \quad (2)$$

- García, L., & Martínez, E. (2019). "Optimización de rutas de vehículos utilizando algoritmos de colonia de hormigas." *Revista de Ingeniería de Sistemas*, 7(2), 110-125.

Esta ecuación calcula el nivel actualizado de feromonas en una arista específica después de que todas las hormigas han completado sus recorridos. Incorpora la tasa de evaporación de la feromona ρ y la cantidad de feromona depositada por una sola hormiga $\Delta\tau_{ij}$ para determinar el nuevo nivel de feromona r_{ij} .

Donde:

- τ_{ij} : Representa el nivel actualizado de feromona en la arista entre los nodos i y j .
- ρ (rho): Es la tasa de evaporación de la feromona, un valor entre 0 y 1.
- $\Delta\tau_{ij}$: Representa la cantidad de feromona depositada en la arista entre los nodos i y j por una sola hormiga.

4.3. Criterio de terminación

El proceso de búsqueda se repite hasta que se cumple un criterio de terminación, como un número máximo de iteraciones o la convergencia a una solución aceptable.

4.4. Evaluación de las rutas

Las rutas obtenidas por los vehículos autónomos se evalúan en función de criterios como la eficiencia en la entrega de paquetes, el tiempo total de viaje y la capacidad utilizada de los vehículos. Se comparan estos resultados con otras técnicas de optimización o con soluciones manuales para validar la efectividad del enfoque propuesto.

5. Desarrollo: Exploración de los datos

En el proceso de optimización de rutas de entrega utilizando el algoritmo de las hormigas en el contexto de Bogotá, Colombia, se emplea la herramienta OSMnx, una biblioteca de Python que facilita la interacción con datos geoespaciales de OpenStreetMap (OSM), una plataforma colaborativa de datos cartográficos de acceso libre.

OSMnx simplifica la descarga, manipulación y análisis de datos geográficos, convirtiéndolos en estructuras de datos manejables en Python. Esta biblioteca proporciona acceso a una amplia gama de información geográfica detallada, incluyendo redes de carreteras, nodos y atributos asociados, lo que resulta fundamental para analizar y visualizar redes urbanas.

Al integrar el análisis urbano con algoritmos de optimización como el de las hormigas, se puede abordar eficazmente el estudio del sistema vial de Bogotá. Esta ciudad, una de las más grandes de América Latina, presenta una infraestructura vial compleja que puede ser estudiada con datos geoespaciales proporcionados por OSM.

Utilizando OSMnx, es posible obtener un mapa interactivo que representa la infraestructura vial de Bogotá. Este mapa sirve como base para aplicar el algoritmo de las hormigas, una técnica de optimización inspirada en el comportamiento de las

hormigas reales para encontrar el camino más corto entre la colonia y una fuente de alimento.

El algoritmo de las hormigas puede ser aplicado para encontrar rutas óptimas entre puntos de interés en Bogotá, como centros de almacenamiento y puntos de entrega, considerando factores como la distancia, el tiempo de viaje y las condiciones del tráfico.

Para ello, se generan nodos sobre el mapa de Bogotá representando puntos de interés y posibles destinos. Luego, se aplica el algoritmo de las hormigas para determinar las rutas más eficientes para desplazarse entre estos nodos. Este proceso implica simular múltiples "hormigas" virtuales que exploran y seleccionan rutas basadas en criterios predefinidos, como la distancia y la cantidad de feromonas.

Se genera el mapa y generamos nodos sobre el mapa para generar rutas y trabajar el algoritmo de hormigas.

En principio utilizaremos una herramienta llamada OSMnx que es una biblioteca de Python la cual ofrece una interfaz poderosa y versátil para interactuar con datos geospaciales obtenidos de OpenStreetMap (OSM), una plataforma colaborativa en línea que recopila y distribuye datos cartográficos de manera libre y abierta (Boeing, 2017). La utilidad de OSMnx radica en su capacidad para simplificar el proceso de descarga, manipulación y análisis de estos datos geográficos, facilitando así la realización de investigaciones y análisis urbanos detallados.



Figure 6: Red de nodos en un mapa de una ciudad mediante la librería osmnx

Una de las características principales de OSMnx es su capacidad para descargar datos de OSM para áreas geográficas específicas, como ciudades o regiones, y convertir estos datos en estructuras de datos fácilmente manipulables en Python. Estas estructuras de datos incluyen representaciones de redes de carreteras y otros elementos geográficos relevantes, como nodos, aristas y atributos asociados. Esta funcionalidad permite a los usuarios acceder a una amplia gama de información geográfica detallada, que puede ser utilizada para una variedad de propósitos analíticos y de visualización.

Además de la descarga de datos, OSMnx ofrece una serie de herramientas para el análisis y la visualización de redes urbanas. Por ejemplo, la biblioteca proporciona funciones para calcular rutas óptimas entre puntos de interés, analizar la conectividad y accesibilidad de una red de carreteras, así como generar visualizaciones interactivas y estáticas de redes urbanas. Estas capacidades hacen que OSMnx sea una herramienta invaluable para una variedad de disciplinas, in-



Figure 7: El camino más óptimo entre dos puntos en el mapa de la ciudad de Nueva York

cluyendo la planificación urbana, la geografía, la ingeniería civil y el transporte.

Por otro lado, la utilización de la biblioteca OSMnx permite integrar eficazmente el análisis urbano con algoritmos de optimización, como el algoritmo de hormigas, en el contexto del estudio del sistema vial de Bogotá, Colombia. Bogotá, una de las ciudades más grandes y pobladas de América Latina, presenta un complejo entramado vial que puede ser estudiado y analizado utilizando datos geospaciales proporcionados por OpenStreetMap.

Al utilizar OSMnx para obtener datos geográficos detallados de Bogotá, como redes de carreteras, nodos y atributos asociados, podemos generar un mapa interactivo que representa fielmente la infraestructura vial de la ciudad. Este mapa se convierte en la base sobre la cual podemos aplicar algoritmos de optimización, como el algoritmo de hormigas, para resolver problemas de enrutamiento y planificación de rutas.

El algoritmo de hormigas es una técnica de optimización inspirada en el comportamiento de las hormigas reales que buscan el camino más corto entre su colonia y una fuente de alimentos. En el contexto de Bogotá, este algoritmo puede ser aplicado para encontrar rutas óptimas entre puntos de interés, como hospitales, centros comerciales o zonas residenciales, considerando factores como la distancia, el tiempo de viaje y las condiciones del tráfico (Dorigo and Stützle, 2004).

Para ello, se pueden generar nodos sobre el mapa de Bogotá, representando puntos de interés y posibles destinos, y luego aplicar el algoritmo de hormigas para determinar las rutas más eficientes para desplazarse entre estos nodos. Este proceso implica la simulación de múltiples "hormigas" virtuales que exploran y seleccionan rutas basadas en criterios predefinidos, como la distancia y la cantidad de feromonas.

Referencias

- Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Coloni, A. (1996). Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 26(1), 29-41.
- Gambardella, L. M., Taillard, É. D., & Dorigo, M. (1999). Ant colonies for the traveling salesman problem. *Biosystems*, 43(2), 73-81.
- García-Martínez, C., Navarro, I., & Martí, L. (2019). Application of Ant Colony Optimization Algorithm for Vehicle Routing Problem in Urban Delivery Services. *IEEE Access*, 7, 85436-85447. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929253>
- Li, X., & Zhang, Y. (2020). Ant Colony Optimization Algorithm for Vehicle Routing Problem in Urban Distribution. En *2020 IEEE 2nd International Conference on Advances in Electrical Engineering and Green Energy (AEEGE)* (pp. 459-462). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AEEGE51158.2020.9183713>
- Kim, S., & Lee, J. (2021). Optimization of Last-Mile Delivery Routes with Ant Colony Optimization Algorithm in Urban Logistics. *Sustainability*, 13(6), 3270. <https://doi.org/10.3390/su13063270>
- Chang, Y., & Wu, P. (2022). Urban Freight Distribution Optimization Based on Ant Colony Optimization Algorithm. En *2022 IEEE 4th International Conference on Industrial Economics System and Industrial Security Engineering (IEISISE)* (pp. 348-352). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEISISE61947.2022.00073>
- Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning, and Natural Algorithms*. Tesis doctoral, Politecnico di Milano, Italia.
- Hurban, R. (s/f). "Ant Colony Optimization for Beginners." Recuperado de <https://rishalhurbans.medium.com/ant-colony-optimization-for-beginners-841d2be60cc6>
- Wikipedia. (s/f). Algoritmos de optimización de colonias de hormigas. Recuperado de https://en.wikipedia.org/wiki/Ant_colony_optimization_algorithms.
- Boeing, G. (2017). OSMnx: Nuevos métodos para adquirir, construir, analizar y visualizar redes de calles complejas. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004><https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>