

Aplicación del Algoritmo de Colonia de Hormigas al Problema de Rutas

Application of the Ant Colony Algorithm to the Routing Problem

Edilma Judith Díaz¹ , Julio Trujillo-González^{1, 3*} , Noriel Cosme^{1, 3} , Daniel Sánchez Díaz¹ , Abraham De Sedas² 

¹ Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Naturales, Exacta y Tecnología, Universidad de Panamá, Panamá

² Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias Naturales, Exacta y Tecnología, Universidad de Panamá, Panamá

³ Programa de Doctorado en Matemática Aplicada, Facultad Regional Multidisciplinaria de Chontales, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Nicaragua.

*Autor por correspondencia: Julio Trujillo, julio.trujillo@up.ac.pa

Recibido: 21 de julio de 2025

Aceptado: 31 de octubre de 2025

Resumen

El objetivo principal de este artículo es determinar una ruta turística en la Ciudad de Panamá mediante la implementación de un algoritmo de colonia de hormigas. Este problema se enmarca en la Teoría de Grafos, específicamente en el desafío clásico de encontrar un camino que pase por varios puntos de interés, cumpliendo con la restricción de visitar cada punto solo una vez y finalizar en un lugar determinado. Si además se agrega la restricción de buscar la ruta más corta posible, el problema se convierte en un TSP (Problema del Agente Viajero). A través de este estudio, se ha concluido que el algoritmo de colonia de hormigas proporciona soluciones eficientes en un tiempo relativamente corto. Por lo tanto, se recomienda su implementación en otros tipos de problemas de optimización. La capacidad del algoritmo genético para adaptarse y explorar el espacio de soluciones de manera inteligente ha demostrado ser altamente efectiva en la resolución de este problema de la ruta turística en la Ciudad de Panamá.

Palabras clave: Grafo, camino hamiltoniano, problema del agente viajero, algoritmo de colonia de hormigas, turismo.

Abstract

The main objective of this article is to determine a tourist route in Panama City through the implementation of an ant colony algorithm. This problem falls within the realm of Graph Theory, specifically in the classical challenge of finding a path that passes through multiple points of interest, complying with the restriction of visiting each point only once and ending at a specific location. If we add the additional constraint of seeking the shortest route possible, the problem becomes a Traveling Salesman Problem (TSP). Through this study, it has been concluded that the ant colony algorithm employed provides efficient solutions within a relatively short timeframe. Therefore, its implementation in other types of optimization problems is strongly recommended. The ant colony algorithm's ability to adapt and intelligently explore the solution space has proven to be highly effective in solving this tourist route problem in Panama City.

Keywords: Graph, Hamiltonian path, Traveling Salesman Problem, ant colony algorithm, tourism.

Introducción

Los problemas de optimización de rutas en todas sus múltiples variantes han sido objeto de estudio del campo de la Investigación Operativa durante décadas. Con la expansión del comercio internacional gracias a la globalización, en parte por la aparición y consolidación de Internet y por el fomento de acuerdos comerciales entre los distintos bloques económicos del planeta, la mejora y optimización de las redes de transporte de mercancías son esenciales para la disminución de costos de transporte y el incremento de la satisfacción del cliente.

Nos podemos plantear el problema de crear una ruta turística en la Ciudad de Panamá con la condición de distancia mínima de recorrido, pasando por todos los puntos sólo una vez.

Una particularización al problema anterior es el conocido como *Traveling Salesman Problem* (TSP), o Problema del Agente Viajero en español.

Dichos problemas se engloban dentro de la categoría de problemas NP-Hard, lo que implica que no pueden ser resueltos en tiempo polinómico por algoritmos conocidos. Así, estos problemas tienen una gran dificultad computacional.

A partir de un cierto tamaño de nodos es muy difícil de resolver con programas de optimización básicos. Por lo tanto, se aplicará el algoritmo de Dorigo & Maniezzo (1991, 1992) “Colonia de hormigas” para buscar la mejor solución posible.

1. Colonia de hormigas

El Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO por sus siglas en inglés, *Ant Colony Optimization*) es una metaheurística introducida por primera vez en 1992 por Marco Dorigo. Este algoritmo, que se inspiran en el comportamiento de las colonias de hormigas como indica su nombre, se encuentran dentro del ámbito de los basados en la inteligencia de enjambre. Esta es una disciplina emergente que ha dado lugar al estudio de la robótica de enjambres, una innovadora metodología para investigar el comportamiento colectivo y la interacción entre grupos de robots y su entorno.

La inteligencia de enjambre, surgida de la conducta de entidades individuales actuando en conjunto, es un concepto esencial en el campo de la inteligencia artificial. Este tipo de inteligencia engloba el comportamiento colectivo de sistemas descentralizados que se organizan autónomamente sin una dirección externa, ya sean estos naturales o artificiales.

Los sistemas fundamentados en la inteligencia de enjambre constan de una multitud de individuos que interactúan a nivel local entre sí y con su entorno, sin la intervención de un agente externo que los dirija. Estos individuos siguen reglas sencillas y no existe un control centralizado que guíe el comportamiento del grupo. Los miembros del grupo actúan de manera aleatoria, sin embargo, sus interacciones mutuas y con el entorno provocan la emergencia de un fenómeno de comportamiento colectivo inteligente, un hecho que los individuos del grupo desconocen, pero sin embargo originan, aunque de forma no deliberada.

La hormiga es un organismo eusocial, término derivado de la combinación de la palabra griega *eu*, que significa bueno o real, y social. La eusocialidad representa el nivel más alto de organización social en ciertas especies animales, como las hormigas y las abejas. Para los animales que poseen esta estructura social, la supervivencia del grupo o colonia tiene mayor importancia que la del individuo. Así, a pesar de la aparente simplicidad de los individuos, su comportamiento colectivo es altamente sofisticado.

Un aspecto destacado del comportamiento de estos animales, incluyendo las hormigas, es su reacción colectiva ante estímulos externos. El entomólogo Pierre Paul Grassé (1959) propuso que ciertos estímulos específicos, que él llamó estímulos significantes, desencadenan una respuesta en estos animales. Esta reacción está codificada genéticamente y no solo afecta a los individuos que directamente perciben el estímulo, sino que también son capaces de transmitir este estímulo al resto de la colonia, provocando una respuesta colectiva.

Los experimentos llevados a cabo por Grassé y otros científicos permitieron descubrir la existencia de un sistema de comunicación entre los individuos de colonias de ciertos insectos, incluyendo las hormigas. Esta habilidad para comunicarse y colaborar a través de su entorno físico recibió el nombre de estigmergia.

En el caso de las hormigas, la estigmergia se facilita a través de una sustancia llamada feromona, cuyo nombre proviene de las palabras griegas *fero* (llevar) y *ormona* (estímulo), y que posee una composición química única para cada especie animal.

Las hormigas producen feromonas en diversas glándulas, y un solo individuo cuenta con alrededor de 50 de estas. Existen distintos tipos de feromonas que las hormigas pueden secretar, dependiendo del propósito de la comunicación que el individuo busque: feromonas de atracción sexual, de dispersión, de alarma o de rastro.

Las feromonas de rastro son utilizadas por las hormigas para indicar el camino hacia un lugar apropiado para construir un nido para la colonia o hacia una fuente de alimento. Cuando un individuo descubre una ruta hacia un recurso alimenticio, segregá feromonas a lo largo del camino para que otros miembros puedan seguir esa ruta. No obstante, la feromona es volátil, por lo que con el tiempo se disipa y se vuelve indetectable para el resto de los individuos. Sin embargo, cada vez que nuevos individuos siguen esta ruta, secretan más feromonas que refuerzan el rastro dejado por aquellos que pasaron anteriormente.

Deneubourg et al (1986) fue el primero en observar este comportamiento a través del experimento del puente binario. En este estudio, conectó una colonia de hormigas con una fuente de alimento mediante dos puentes de igual longitud. Inicialmente, las hormigas elegían aleatoriamente uno de los dos puentes para llegar a la comida y retornar al nido, dejando un rastro de feromonas a su paso. A medida que el número de hormigas que escogían un puente superaba al otro, la retroalimentación positiva generada por la segregación de feromonas inducía a más hormigas a cruzar el puente más transitado, hasta que todas las hormigas terminaban eligiendo el mismo camino.

En un experimento similar, Goss dispuso de dos puentes con longitudes diferentes. Aunque las hormigas inicialmente eligieron su camino de manera aleatoria, aquellos individuos que seleccionaron el camino más corto regresaban más rápidamente y, al hacer el recorrido nuevamente, fortalecían el rastro de feromonas en esa ruta. A causa de esto, el rastro de feromonas en el camino más corto se mantenía más fuerte, lo que finalmente llevaba a que todas las hormigas eligieran el camino más corto. Notablemente, la convergencia hacia la ruta más corta se producía en un tiempo menor que el observado en el experimento de Deneubourg con puentes de igual longitud.

2. Pasos del algoritmo de colonia de hormigas

Para el desarrollo de nuestra metodología, nos basamos en los pasos propuestos por Dorigo (1992) y complementamos con insights derivados de la literatura sobre enjambres, incluyendo trabajos de Bonabeau et al. (1999), Dorigo et al. (2006), Panigrahi et al. (2011) y Yang et al. (2013).

- Inicialización: En este paso, se inicializa la matriz de feromonas. Esta matriz representa la cantidad de feromonas depositadas en cada arista del grafo que representa el problema. Las feromonas se pueden inicializar a un valor constante, o se pueden calcular con base en una solución heurística.
- Construcción de soluciones: En este paso, cada hormiga construye una solución. Comienza en un nodo seleccionado al azar y se mueve a otros nodos de acuerdo con una regla de transición probabilística que depende de la cantidad de feromonas y la visibilidad (generalmente el inverso de la distancia) de los nodos. En el caso del Problema del Agente Viajero, la regla de transición suele ser la siguiente:

$$p_{ij}^h = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N^h} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, & \text{si } j \in C_i^h \\ 0, & \text{si } j \notin C_i^h \end{cases}$$

Donde:

p_{ij}^h es la probabilidad de que una hormiga pase del nodo i al nodo j.

τ_{ij} es la intensidad de las feromonas en la arista que une el nodo i con el nodo j.

η_{ij} es la visibilidad del nodo j desde el nodo i.

α y β son parámetros que controlan la importancia relativa de las feromonas y la visibilidad, respectivamente.

La suma en el denominador es sobre todas las ciudades que aún no han sido visitadas.

- Actualización de feromonas: Despues de que todas las hormigas han construido sus soluciones, las feromonas en las aristas se actualizan. En general, las feromonas se evaporan (se reduce su intensidad) y las hormigas depositan más feromonas en las aristas que forman parte de su solución. La regla de actualización suele ser la siguiente:

$$\tau_{ij} = (1 - p)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}$$

Donde:

τ_{ij} es la intensidad de las feromonas en la arista que une el nodo i con el nodo j.

p es el coeficiente de evaporación de las feromonas.

$\Delta\tau_{ij}$ es la cantidad de feromonas depositadas, que puede ser constante o dependiente de la calidad de la solución (por ejemplo, inversamente proporcional a la longitud de la ruta en el problema del viajante de comercio).

- Terminación: El algoritmo se repite durante un número fijo de iteraciones, o hasta que se cumpla un criterio de terminación (como un tiempo límite o una condición de estancamiento).

Es importante notar que existen varias variantes del algoritmo de colonia de hormigas que difieren en los detalles de los pasos anteriores. Además, los parámetros del algoritmo (como α , β y ρ) deben ser ajustados de acuerdo con el problema específico a resolver.

Método

Objetivos

El objetivo del presente estudio es encontrar la ruta turística más corta por 15 sitios en la Ciudad de Panamá, visitando cada lugar solo una vez.

Población y Muestra

En este estudio, la población está compuesta por los centros turísticos en Panamá. Para seleccionar una muestra representativa, hemos elegido convenientemente 15 sitios, que son los siguientes: 1. Multicentro, 2. Casco Viejo, 3. Cinta Costera, 4. Centro de Visitantes de Miraflores, 5. Panamá Vieja, 6. Albrook Mall, 7. Centro de Visitantes del Parque Natural Metropolitano, 8. Centro Natural Punta Culebra, 9. Isla Flamenco, 10. Biomuseo, 11. Mirador de las Américas, 12. Cerro Ancón, 13. Calzada de Amador, 14. Museo del Canal Interoceánico de Panamá, 15. Parque Municipal de Summit.

Instrumento

Para garantizar la eficiencia del recorrido y evitar repeticiones, hemos utilizado Google Maps para calcular las distancias entre los puntos, lo cual puede ser una limitante porque las rutas pueden variar un poco por las obras en las calles, y además en ocasiones existen sólo una ruta de ida y regreso. De esta manera, hemos construido la tabla 1, que muestra las distancias en kilómetros entre los diferentes sitios.

Tabla 1. *Datos de las distancias entre los nodos turísticos de la Provincia de Panamá*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	4.1	3.1	12.4	6.1	5.3	4.7	13.8	14.9	11.5	10.6	5.6	13.5	4.4	22.1
4.1	0	2.3	10.2	11.1	5.6	5.1	10.7	11.9	7.7	7.5	2.8	10.5	0.29	27.5
3.1	2.3	0	10.8	8.8	6.2	5.7	12.1	13.3	9.9	8.9	4	11.9	2.8	20.2
12.4	10.2	10.8	0	19.7	8.6	12.4	16.4	17.6	14.2	13.2	8.7	16.2	12	11.2
6.1	11.1	8.8	19.7	0	9.8	8	17.5	18.6	15.2	14.2	11.2	17.2	10.1	22.2
5.3	5.6	6.2	8.6	9.8	0	1.6	12	13.2	9.8	8.8	4.3	11.8	7.6	18.3
4.7	5.1	5.7	12.4	8	1.6	0	12.2	13.3	9.9	9	7.4	11.9	7.7	21.8
13.8	10.7	12.1	16.4	17.5	12	12.2	0	2.1	3.2	8	8.4	0.7	7.9	25.7
14.9	11.9	13.3	17.6	18.6	13.2	13.3	2.1	0	4.3	9.1	9.6	1.8	9.1	26.9
11.5	7.7	9.9	14.2	15.2	9.8	9.9	3.2	4.3	0	4.9	5.3	3	5.1	22.6
10.6	7.5	8.9	13.2	14.2	8.8	9	8	9.1	4.9	0	8.5	10.6	8	25.4
5.6	2.8	4	8.7	11.2	4.3	7.4	8.4	9.6	5.3	8.5	0	7.7	3.5	18.6
13.5	10.5	11.9	16.2	17.2	11.8	11.9	0.7	1.8	3	10.6	7.7	0	7.2	25
4.4	0.29	2.8	12	10.1	7.6	7.7	7.9	9.1	5.1	8	3.5	7.2	0	20
22.1	27.5	20.2	11.2	22.2	18.3	21.8	25.7	26.9	22.6	25.4	18.6	25	20	0

Fuente. Trujillo (2019).

Procedimiento de recogida y análisis de datos

En esta sección se presentan los detalles de los experimentos computacionales realizado con Python, los paquetes random, numpy, matplotlib. Se ejecutó en una computadora de mesa con procesador AMD Ryzen 7 3800X 8-Core de 4.20 GHz, y 32.0 GB de memoria RAM.

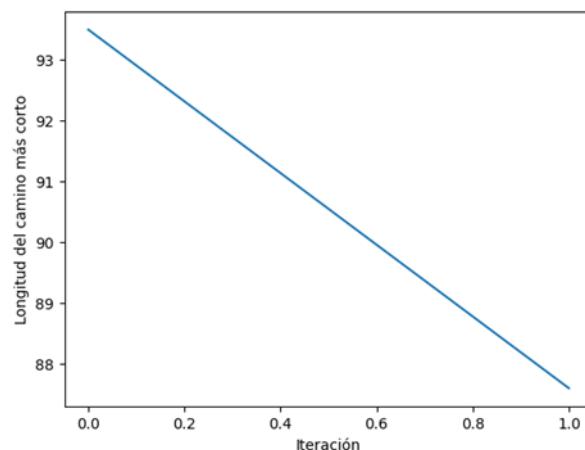
En la tabla 2 se presentan los parámetros de control para el algoritmo colonia de hormigas, los cuales se obtuvieron de forma exploratoria probando valores y experiencia de estudios de algoritmos heurísticos.

Tabla 2. Parámetros de control del algoritmo colonia de hormigas

Nombre del parámetro	Valor
Número de hormigas por iteración	15
Número de mejores hormigas que permitirán la evaporación de feromonas	3
Número de iteraciones	100
Tasa de evaporación de feromonas	0.1
Exponente para las feromonas	1
Exponente para las distancias	2
Lugares turísticos	15

Resultados

La evolución del algoritmo de colonia de hormigas se presenta en la Figura 1, donde se observa una disminución progresiva en la longitud del camino más corto a medida que avanzan las iteraciones. Este comportamiento refleja el proceso de convergencia del algoritmo hacia soluciones más eficientes, en línea con la capacidad adaptativa y autoorganizativa que caracteriza a los sistemas de inteligencia de enjambre. De acuerdo con Trujillo (2019), la solución obtenida previamente mediante técnicas tradicionales fue la secuencia 1-5-7-6-11-8-13-9-10-14-2-12-15-4-3, con una distancia total de 88.09 km. Sin embargo, el algoritmo de colonia de hormigas alcanzó una solución mejorada, con la secuencia 3-2-14-12-13-8-9-10-11-7-6-4-15-5-1, reduciendo la distancia total a 87.59 km.

**Figura 1.** Evolución de la distancia con respecto a las iteraciones

La ruta optimizada propuesta por el algoritmo fue representada gráficamente mediante Google Maps, como se ilustra en la Figura 2. Debido a limitaciones técnicas en la visualización continua de todos los nodos turísticos, la trayectoria completa se dividió en dos segmentos. Este itinerario permite recorrer los 15 sitios de interés seleccionados en la Ciudad de Panamá de forma eficiente y sin repeticiones, facilitando su implementación práctica en escenarios reales de planificación turística. La representación geográfica no solo valida la viabilidad logística del recorrido, sino que también evidencia el potencial del algoritmo para resolver

problemas de enrutamiento urbano bajo restricciones reales de conectividad y distancia.

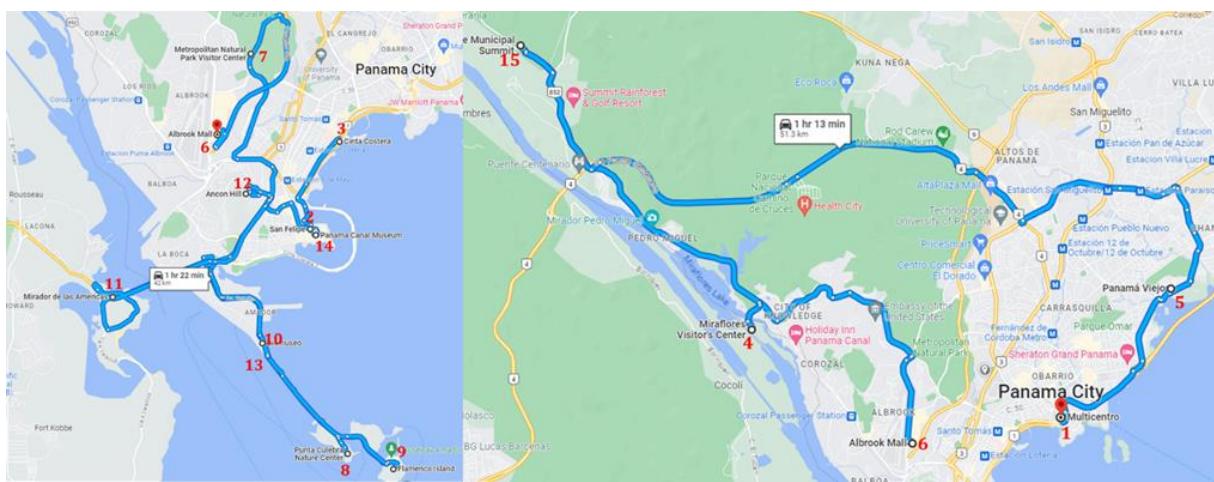


Figura 2. Propuesta de Itinerario para el Tour Turístico

Discusión y conclusión

Esta investigación presenta una mejora y expansión de un algoritmo genético con el propósito de determinar la ruta turística más corta en la Ciudad de Panamá, evidenciando la aplicabilidad de las matemáticas en contextos nacionales y su impacto económico, siguiendo el precedente de Trujillo (2019). Se destaca que, pese a una desviación de 5,71 km en comparación con estimaciones iniciales atribuible a factores externos como obras viales e imprevistos del entorno dicha variabilidad no menoscaba la efectividad del algoritmo como herramienta de planificación turística práctica y robusta.

La elección de la colonia de hormigas sobre métodos tradicionales se fundamenta en la capacidad de este enfoque para explorar y adaptarse dinámicamente al espacio de soluciones, proporcionando resultados óptimos de manera eficiente. Este comportamiento es respaldado por estudios recientes: Chen et al. (2023) demostraron mejoras sustantivas en eficiencia computacional y consideración de nodos reutilizables en planificación turística. Asimismo, una investigación aplicada evidenció una reducción del 20,5 % en la longitud de rutas turísticas y un aumento del 21,2 % en la velocidad de convergencia frente al ACO estándar. Por su parte, Jiang y Wang (2022) implementaron un enfoque multi-objetivo basado en GA que incorpora restricciones de tiempo operativo, optimizando itinerarios de viajes de varios días de forma eficaz.

La integración de metaheurísticas híbridas, tales como ACO mejorado, GA multi-objetivo y enfoques mixtos, ofrece una base sólida para la planificación turística urbana. Este estudio no solo valida la eficacia de estos métodos en escenarios reales, sino que también establece un punto de partida para futuras investigaciones que incorporen factores como condiciones del tráfico en tiempo real, preferencia del usuario, y variabilidad medioambiental en rutas urbanas complejas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems* (No. 1). Oxford university press.
- Chen, S.-T., Wu, T.-H., Ye, R.-J., Lee, L.-C., Huang, W.-Y., Lin, Y.-H., & Wang, B.-Y. (2023). Application of Ant Colony Optimization Computing to a Recommended Travel Itinerary Planning System with Repeatedly Used Nodes. *Applied Sciences*, 13(24), 13221. <https://doi.org/10.3390/app132413221>

- Colorni, A., Dorigo, M., & Maniezzo, V. (1991, December). Distributed optimization by ant colonies. In Proceedings of the first European conference on artificial life (Vol. 142, pp. 134-142).
- Deneubourg, J. L., Aron, S., Goss, S. A. P. J. M., Pasteels, J. M., & Duerinck, G. (1986). Random behaviour, amplification processes and number of participants: how they contribute to the foraging properties of ants. *Physica D: nonlinear phenomena*, 22(1-3), 176-186.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano.
- Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4), 28-39.
- Grassé, P. P. (1959). La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez Bellicositermes natalensis et Cubitermes sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes sociaux*, 6, 41-80.
- Jiang, X., & Wang, L. (2022). Genetic Algorithm for Tourism Route Planning Considering Time Constraints. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(1), 171-179. <https://ijettjournal.org/archive/ijett-v70i1p219>
- Panigrahi, B. K., Shi, Y., & Lim, M. H. (Eds.). (2011). *Handbook of swarm intelligence: concepts, principles and applications* (Vol. 8). Springer Science & Business Media.
- Trujillo, J. (2019). Grafos hamiltonianos aplicado al turismo de Panamá. *Investigación Y Pensamiento Crítico*, 7(1), 109-113. <https://doi.org/10.37387/ipc.v7i1.12>
- Yang, X. S., Cui, Z., Xiao, R., Gandomi, A. H., & Karamanoglu, M. (Eds.). (2013). *Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications*. Newnes.