

ARTÍCULO ORIGINAL



# Aplicación de metaheurísticas en el ordenamiento del transporte urbano en Camagüey

*Application of Metaheuristics  
in Urban Transport Planning in Camaguey*



*Yoan Martínez López*

*yoan.martinez@reduc.edu.cu* • <https://orcid.org/0000-0002-1950-567X>

*Lenier Guevara Yanes*

*lenier.guevara@algrec.cu* • <https://orcid.org/0000-0002-3689-0274>

*Julio Madera Quintana*

*julio.madera@reduc.edu.cu* • <https://orcid.org/0000-0001-5551-690X>

UNIVERSIDAD DE CAMAGÜEY, CUBA

Recibido: 2022-04-29 • Aceptado: 2022-07-05

## RESUMEN

La informatización de los procesos que producto del transporte urbano generan un conjunto de datos, que permiten optimizar este proceso. Por eso, transporte urbano cubano requiere implementar herramientas y métodos científicos que permitan analizar y cuantificar con mayor precisión las variables que permiten la eficiencia del mismo, contribuyendo a la transformación digital y la informatización de la sociedad. A través del uso metaheurísticas en MATLAB para la organización del transporte urbano en Camagüey y el uso de una biblioteca que implementa el modelo propuesto por Baaj y Mahmassani, se desarrolló una herramienta computacional. La misma utiliza los Algoritmo de Estimación de Distribución celular (cEDA), Recocido Simulado (SA), Búsqueda de Vecindad Variable (VNS) y Búsqueda Adaptativa Aleatoria Codicioso (GRASP). Se realizaron varios experimentos teniendo en cuenta la validación estadística realizada a los algoritmos, donde se demostró que el cEDA y el SA ofrecieron los mejores comportamientos. De este modo se evidencia la utilidad de las metaheurísticas para ordenar el transporte urbano en Camagüey.

**PALABRAS CLAVE:** metaheurísticas; modelos; transporte urbano; toma de decisiones.



## ABSTRACT

*In the practice of economic, political and social activity, man needs transport as a means of satisfying various needs. In this research, metaheuristics are developed in MATLAB for the organisation of urban transport in Camagüey. These are part of a library that implements the model proposed by Baaj and Mahmassani. The computational analysis of the algorithms: Cellular Estimation Distribution Algorithm (cEDA), Simulated Annealing (SA), Variable Neighbourhood Search (VNS) and Greedy Random Adaptive Search (GRASP) was performed. Several experiments were carried out taking into account the statistical validation performed on the algorithms, where it was shown that cEDA and SA offered the best performances. Thus, the usefulness of metaheuristics to study the urban transport problem in Camagüey is evidenced.*

**KEYWORDS:** *metaheuristics; modelling; urban transport; decision making.*

## INTRODUCCIÓN

La transformación de las formas de tracción cambió a la tracción a vapor y luego a la eléctrica según refiere (González, 2012). Por su parte (Oyón, 1999) confirma que la aparición del ómnibus data de 1825 que en sus inicios era de tracción animal. Luego se sustituye el motor de vapor por uno de combustión interna. El primero fue fabricado por Carl Benz en Alemania en 1895. En correspondencia con lo anterior el desarrollo del transporte urbano en Cuba atravesó por diferentes etapas. En este sentido (Sánchez, 2015) hace alusión al uso de las calesas o volantas destinadas a un servicio regular de alquiler de pasajeros en las primeras décadas del siglo XIX. A la vez precisa que las primeras líneas de ómnibus regulares se establecieron para el año 1839, entre Guanabacoa y Regla, mediante coches de mayor porte y capacidad.

Con el Triunfo de la Revolución y su asociación al CAME el transporte urbano llegó a su época de esplendor hasta que ocurrió el derrumbe del Campo Socialista. El parque automotor se vio afectado considerablemente por el deterioro y la falta de piezas de repuesto. Se constata que a finales de la década del 90 inicia el proceso de recuperación paulatina como resultado de los convenios con la República Popular China, Irán y otros países de Latinoamérica y el Caribe (Morris, 2015).

El transporte público en la ciudad de Camagüey desde 2013 hasta la fecha refleja un avance paulatino, dado por el crecimiento en la cantidad de vehículos para el transporte urbano. No obstante, persisten insuficiencias en el servicio urbano, que fueron expresadas en el informe de la Empresa Provincial de Transporte en Camagüey, específicamente en el 2020 (Torres, 2020).



Por otro lado, se pueden determinar las frecuencias y horarios para la óptima explotación del transporte, fundamentalmente a través del criterio de expertos. No obstante, se soslayan resultados de investigaciones que, desde el punto de vista de la ciencia, utilizan algoritmos metaheurísticos para atenuar este problema como los presentados por (Dib, 2017; Mahdi, 2015; Mauttone, 2005; Mauttone, 2002). De manera general, no se evidencia la transformación digital de estos procesos dentro del transporte urbano, ni la informatización de los mismos. En relación con todo lo analizado y la situación problemática dada, se identifica como problema de investigación, por lo que el objetivo de esta investigación está enmarcado en la aplicación de algoritmos metaheurísticos para el ordenamiento del transporte urbano en Camagüey, que contribuya a la transformación digital de este sector. La contribución del trabajo está en la creación una herramienta computacional, que utilizan estos algoritmos, para la optimización del transporte urbano. Además, a través de la transformación digital de este proceso se obtienen datos, que son utilizados en la toma de decisión de los directivos de este sector.

## METODOLOGÍA

### MODELO DE BAAJ Y MAHMASSANI (BAAJ-MAH)

Al examinar los resultados de (Baaj, 1991) se infiere que se pretende minimizar los tiempos totales de transferencia de pasajeros y el tamaño de la flota requerido, sujeto a restricciones de frecuencia, factor de carga y tamaño de flota. La formulación del modelo es:

$$\min \left\{ C_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} t_{ij} + C_2 \sum_{k \in R} f_k t_k \right\} \quad (1)$$

**Sujeto a:**

$$f_k \geq f_{min} \quad \forall k \in R \quad (\text{frecuencia factible}) \quad (2)$$

$$LF_k = \frac{(Q_k)_{max}}{f_x CAP} \leq LF_{max} \quad \forall k \in R \quad (\text{factor de carga}) \quad (3)$$

$$\sum_{k \in R} N_k = \sum_{k \in R} f_k t_k \leq W \quad (\text{tamaño de la flota}) \quad (4)$$

$n$ : Cantidad de nodos de la red;

$d_{ij}$ : demanda (cantidad de viajes por unidad de tiempo) entre los nodos  $i$  y  $j$ ;

$t_{ij}$ : tiempo total de viaje entre  $i$  y  $j$  (en vehículo, espera y transferencia, si existe);

$N_k$ : cantidad de buses operando en la ruta  $k$ ,  $N_k = f_k T_k$ ;

$f_k$ : frecuencia de buses operando en la ruta;

$f_{min}$ : mínima frecuencia de buses permitida para toda ruta;

$t_k$ : tiempo total de viaje de la ruta;

$W$ : tamaño de la flota disponible para operar en la red de rutas;

$LF_k$ : factor de carga de la ruta;

$(Q_k)_{max}$ : máximo flujo por arco en la ruta;

$CAP$ : capacidad de pasajeros sentados por buses;

$LF_{max}$ : máximo factor de carga permitido;

$R$ : conjunto de todas las rutas para una solución dada;

$C_1$  y  $C_2$ : factores de conversión y pesos relativos de los términos de la función objetivo.

Los principales aspectos del problema son tenidos en cuenta, así como una variedad de parámetros y restricciones (factor de carga, por ejemplo). Es flexible, ya que permite la incorporación del conocimiento de los usuarios, en tal sentido, se agregan restricciones de mínima proporción de demanda cubierta en base a viajes sin transferencias (o con al menos una) al momento de aplicar un método de resolución. Los componentes de la función objetivo se expresan en distintas unidades, con la obligación de utilizar coeficientes de conversión.

## ALGORITMOS UTILIZADOS PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE

A nivel mundial se han realizado varios estudios sobre el tema con la aplicación de varias metaheurísticas para la optimización del transporte urbano en sus diferentes etapas de diseño definidas por (Ceder, 1986). Por citar algunos ejemplos: los estudios de (Ceder, 2016) proponen el uso de la búsqueda de vecindad variable (VNS) para la optimización de la programación de la tripulación de los autobuses. Para la planificación multicriterio de las rutas (Dib, 2017) utilizan VNS y algoritmos genéticos (GA). Por su parte las investigaciones de (Zhao, 2005) sustentan el uso del recocido simulado (SA) y la búsqueda tabú (TS) para maximizar la cobertura del servicio minimizando las transferencias. Así como (Mauttone, 2009) propone para el uso del procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria codiciosa (GRASP) para el problema de diseño de la red de tránsito. Varios investigadores han aplicado las metaheurísticas al problema del transporte urbano, por ejemplo (Rasjido, 2016; Ansola, 2021; Campos, 2022).

En el estudio realizado por (Martínez, 2020a) sobre la aplicación de la investigación de operaciones a la distribución de recursos relacionados con la COVID-19, se refleja la forma de optimizar el ruteo de vehículos con capacidad de carga (problemas CVRP). A pesar de que no se trata lo relacionado con el transporte público, la propuesta es utilizar los tres algoritmos: SA, CEDA y VNS para la realización de esta investigación. Como cuarto algoritmo la metaheurística GRASP es aplicada para desarrollar una búsqueda local que se asemeja en su funcionamiento a la formulación de los anteriores.

Para la solución de este problema, se usaron los algoritmos:

- Modelo celular en EDA (cEDA): se introduce por Madera (Madera, 2005) como una versión descentralizada y generalizada de los modelos celulares desarrollados para otros



algoritmos evolutivos. En un algoritmo cEDA la población es descentralizada particionándola en pequeñas sub-poblaciones (llamadas celdas o algoritmos miembros), ordenadas en una malla toroidal e interactuando solo con las sub-poblaciones vecinas. La organización de un cEDA se basa en una estructura tradicional de dos dimensiones de vecindades solapadas. Esta estructura se entiende mejor en términos de dos rejillas, una formada por cadenas o individuos y otra formada por conjuntos disjuntos de cadenas o individuos (sub-poblaciones) (Martínez, 2016; Martínez, 2019a; Martínez, 2019b; Martínez, 2020b; Martínez, 2021).

- SA (recocido simulado, cristalización simulada o enfriamiento simulado): Es un algoritmo de búsqueda metaheurística para problemas de optimización global; el objetivo general de este tipo de algoritmos es encontrar una buena aproximación al valor óptimo de una función en un espacio de búsqueda grande. A este valor óptimo se lo denomina “óptimo global”. El nombre e inspiración viene del proceso de recocido del acero y cerámicas, una técnica que consiste en calentar y luego enfriar lentamente el material para variar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y que puedan así desplazarse de sus posiciones iniciales (un mínimo local de energía); el enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recrystalizar en configuraciones con menor energía que la inicial (mínimo global) (Van, 1987)
- *Variable Neighborhood Search* (VNS) (Mladenović, 1997): explora la idea de cambio de vecindad de forma sistemática, es un método descendente de primera mejora con aleatorización. La exploración se lleva a cabo para seleccionar el mejor vecino. Después, si el valor encontrado es superior a la solución actual, la misma se reemplaza por dicho valor y se cambia el vecindario por otro.
- GRASP (procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria codiciosa): es un algoritmo metaheurístico que se aplica a problemas de optimización combinatoria. El GRASP suele consistir en iteraciones formadas por construcciones sucesivas de una solución aleatoria codiciosa y posteriores mejoras iterativas de la misma a través de una búsqueda local (Feo, 1995). Cada iteración consta básicamente de dos fases: construcción y búsqueda local. La primera construye de forma inteligente una solución inicial factible, a través de una función aleatoria voraz (*greedy*) adaptativa; la segunda aplica un procedimiento de búsqueda local a la solución construida con la esperanza de encontrar una mejora. Las soluciones se generan con la incorporación de elementos al conjunto de soluciones del problema a partir de una lista de elementos clasificados por una función codiciosa según la calidad de la solución que alcanzarán.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de información para esta investigación se sustenta en las distancias entre paradas, en la programación de salidas y tiempos de trabajo, y en el kilometraje que utiliza la base de transporte *Urbano 02*. Se realizó un estudio de las trayectorias captadas por los GPS instalados en



los ómnibus que se analizan diariamente, una vez terminado el recorrido de cada vehículo, con el sistema *GvSig* (Carrión, 2007). De esta información se pudo obtener una estadística del tiempo que cada vehículo emplea en recorrer la ruta y los intervalos de tiempo entre cada una de las paradas. Los datos de los sistemas de posicionamiento global devuelven la ubicación en latitud y longitud. Los valores de la cantidad de ómnibus que trabajan en las rutas y la frecuencia de salida fueron obtenidos del portal del ciudadano en Camagüey (Servicio urbano y suburbano, 2021)<sup>1</sup>. Una vez que el conjunto de datos fue creado, así como implementada la biblioteca BAAJMAH se realizan estudios experimentales para avalar los resultados obtenidos. La ejecución de los algoritmos se realizó con datos reales de las rutas 3 y 19 del municipio cabecera con el uso del modelo Baajmah.

La ventaja de uso de las metaheurísticas es que, aunque brindan una solución aproximada del problema lo hacen con un menor tiempo de ejecución comparado con los métodos exactos (Oliva, 2021; Ansola, 2021; Bello, 2021). Además, permiten trabajar con problemas de alta dimensionalidad y gran cantidad de combinaciones. Para los problemas de transporte urbano las restricciones generalmente refieren a niveles de servicio requeridos (tiempos de viaje y de espera, ocupación de los buses) y disponibilidad de recursos (buses). En este caso el modelo Baajmah se ha resuelto en forma aproximada, mediante las metaheurísticas antes mencionadas. Además, un algoritmo exacto es completamente dependiente del problema (o familia de problemas) que resuelve, de forma que cuando se cambia el problema se tiene que diseñar un nuevo algoritmo exacto.

## IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL E INTERFAZ DE USUARIO

Se desarrolló un *software* es para la obtención de los resultados de diferentes algoritmos (cEDA, SA, VNS, GRASP) que ejecuta el modelo de optimización para el transporte urbano, específicamente el Baajmah. Esta interfaz es amigable a los usuarios y de fácil uso sin tener conocimientos de MATLAB. Para la confección del mismo se utilizó la herramienta MATLAB, específicamente el diseñador de aplicaciones. La ventaja que tiene el uso de esta herramienta es que se pudo crear una interfaz gráfica que permitirá una interacción más amigable a aquellos que necesitan realizar estudios de optimización del transporte urbano. Para crear el ejecutable se utilizó el MATLAB 2018, compilador en tiempo de ejecución que permite realizar un empaquetado de las dependencias necesarias para la ejecución de la aplicación visual.

## REQUISITOS INFORMÁTICOS MÍNIMOS PARA SU CORRIDA

### Requisitos de hardware:

- Procesador: Procesador Intel o AMD x86-64.
- Memoria RAM: 4 Gb
- Velocidad: 1,6 GHz
- Espacio libre en disco duro: 3.1 Gb

<sup>1</sup> <https://camaguey.gob.cu/es/>



### Requisitos de software:

- Sistema Operativo: *Windows 7* o superior.
- Lenguaje de Programación: *MATLAB 2018* (se añade en el instalador). A continuación, se presenta algunas ventanas de la herramienta, figura 1, con la cual se ejecutaron los diferentes algoritmos. En el sitio <https://github.com/cybervalient/Baaajmah/>, se encuentra la implementación de esta herramienta.

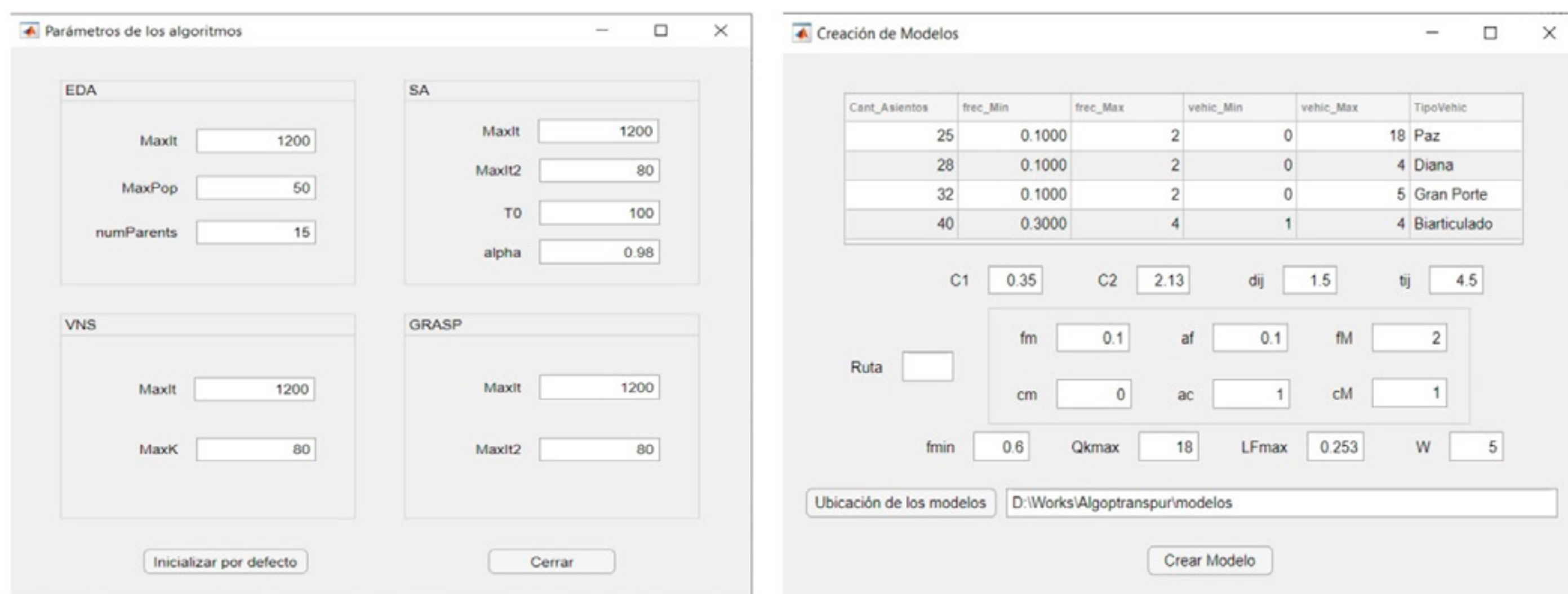


Figura 1. Ventanas del software propuesto para el ordenamiento del transporte.

### RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

Para realizar los experimentos en esta sección, se consultó la literatura de trabajos previos, y se realizó un estudio previo a los experimentos. Para cada una de las metaheurísticas, los parámetros de configuración fueron: SA (MaxIt=1200; MaxIt2=80; T0=100; alpha=0.98), VNS (MaxIt=1200; maxK = 80), GRASP (MaxIt=1200; MaxIt2=80) y EDA celular (MaxIt=1200; MaxPop = 50; numParents=15), Donde, MaxIt es el número máximo de iteraciones, MaxIt2 es el número de iteraciones del algoritmo, T0 es la temperatura inicial, MaxPop es el máximo de la población, numParents es el número de padres a seleccionar.

La tabla 1 presenta los resultados de la ejecución de los algoritmos de metaheurísticos con el uso del modelo diseñado. Para cada algoritmo y modelo conformado (con datos reales de las rutas 3 y 19) es mostrada la mejor solución y la menor iteración en que se encuentra la misma. De los cuatro algoritmos implementados, los resultados obtenidos por el EDA celular y SA fueron los mejores según el número de iteraciones. Todos convergieron a un mismo valor del óptimo para cada modelo implementado. De ellos el EDA celular destaca por tener menores valores de iteración con respecto al SA. Con respecto al tiempo de ejecución para la máxima cantidad de iteraciones, EDA celular y SA tienen tiempos ligeramente superiores al VNS y GRASP. Esto está dado fundamentalmente por la formulación específica de cada uno de los algoritmos.

### VALIDACIÓN ESTADÍSTICA

Se realizaron diferentes pruebas estadísticas para comprobar la normalidad de los datos (Shapiro, 1965). Para el análisis estadístico de los resultados se utilizaron las técnicas de prueba

Tabla 1. Resultados de la ejecución de los algoritmos de metaheurísticos.

Modelos	cEDA		SA		VNS		GRASP	
	Iteración	Valor del Costo	Iteración	Valor del Costo	Iteración	Valor del Costo	Iteración	Valor del Costo
Bajmaj_R3_0.35_2.13_2 x 12 min.mat	2	16.221	1	16.221	5	16.221	18	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_2 x 18 min.mat	1	16.221	1	16.221	15	16.221	6	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_2 x 24 min.mat	2	16.221	1	16.221	12	16.221	7	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_3 x 12 min.mat	1	16.221	1	16.221	51	16.221	46	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_3 x 18 min.mat	1	16.221	1	16.221	54	16.221	13	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_3 x 24 min.mat	2	16.221	2	16.221	10	16.221	48	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_4 x 12 min.mat	1	16.221	2	16.221	61	16.221	12	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_4 x 18 min.mat	1	16.221	1	16.221	38	16.221	16	16.221
Bajmaj_R3_0.35_2.13_4 x 24 min.mat	2	16.221	2	16.221	22	16.221	6	16.221
Bajmaj_R19_0.35_2.13_4 x 6 min.mat	2	22.85	2	22.85	34	22.85	90	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_4 x 12 min.mat	1	22.85	4	22.85	36	22.85	29	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_4 x 18 min.mat	1	22.85	11	22.85	29	22.85	16	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_5 x 6 min.mat	2	22.85	1	22.85	19	22.85	38	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_5 x 12 min.mat	1	22.85	3	22.85	40	22.85	82	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_5 x 18 min.mat	1	22.85	4	22.85	94	22.85	65	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_6 x 6 min.mat	1	22.85	1	22.85	38	22.85	25	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_6 x 12 min.mat	3	22.85	2	22.85	102	22.85	28	22.85
Bajmaj_R19_0.35_2.13_6 x 18 min.mat	2	22.85	2	22.85	89	22.85	4	22.85

de hipótesis (Demšar, 2006; García, 2009; García, 2008). En ambos experimentos, se emplearon las pruebas de Friedman y de Iman-Davenport (Iman, 1980), con la finalidad de detectar diferencias estadísticamente significativas entre un grupo de resultados. Se realizó además la prueba de Holm (Holm, 1979), con el objetivo de encontrar los algoritmos significativamente superiores. Estas pruebas son sugeridas en los estudios presentados en (Demšar, 2006; García, 2009; García, 2008), donde se afirma que el uso de estas pruebas es muy recomendable para la validación de resultados en el campo del aprendizaje automatizado.

Para validar estadísticamente este resultado, se aplica el test de Shapiro-Wilk para ver si el comportamiento de cada algoritmo era normal. Los resultados se muestran en la tabla 2.



Tabla 2. Resultados Test Shapiro - Wilk.

Algoritmo	W	valor de P	Hipótesis
cEDA	0.72591	0.0001624	Rechaza
SA	0.57716	4.051E-06	Rechaza
VNS	0.90329	0.06559	Acepta
GRASP	0.85944	0.01197	Rechaza

La mayoría de los algoritmos no cumplen el criterio de normalidad, ya que el valor de P es menos que 0.05, exceptuando al VNS cuyo valor de P es mayor al umbral. Como hay algoritmos cuyo comportamiento no es normal, se deben realizar pruebas no paramétricas para la comparación estadística de los algoritmos.

La tabla 3 muestra el ranking obtenido por la prueba de Friedman en el experimento 1. Aunque el algoritmo de mejor ranking fue EDA, las pruebas de Holm realizadas a continuación demostrarán hasta qué punto puede ser significativamente superior este algoritmo con respecto al propuesto en la investigación.

Se realiza la prueba de Iman-Davenport (empleando una distribución F de 3 grados de libertad para  $Nds = 77.477$ ), para encontrar diferencias estadísticas entre los algoritmos, obteniendo un valor de p de  $2.2E-16$ . Los resultados de las pruebas de Iman-Davenport demuestran que EDA presenta efectivamente diferencias significativas de rendimiento en el grupo con valor  $p \leq 0.05$ ).

Tabla 3. Resultados de la prueba de Friedman.

Algoritmo	Ranking
cEDA	1.472222
SA	1.527778
GRASP	3.277778
VNS	3.722222

En la prueba de Holm (tabla 4), tomando a EDA como método de control, se rechazan todas las hipótesis con valor  $p \leq 0.05$ ; mostrando que EDA es significativamente superior a los algoritmos SA, VNS y GRASP.

Tabla 4. Prueba de Holm

Algoritmo	valor de P	Holm	Hipótesis
SA	8.97E-01	8.97E-01	Rechaza
VNS	1.71E-07	5.13E-07	Rechaza
GRASP	2.72E-05	5.44E-05	Rechaza

### Caso de estudio en Camagüey

Una de las propuestas fue utilizar el algoritmo EDA celular para la ruta 19 con la utilización de 6 ómnibus *Yutong* de 32 asientos y 2 *Diana* de 25 asientos con una diferencia de 13 minutos entre ellos, de modo que salgan en de la siguiente forma 3 *Yutong*, 2 *Diana* y 3 *Yutong*. Para la ruta 3, se utiliza el SA, proponiéndose mantener la configuración actual del mismo tipo de ómnibus con una salida de 19 minutos entre uno y otro, como se muestra en la figura 2.

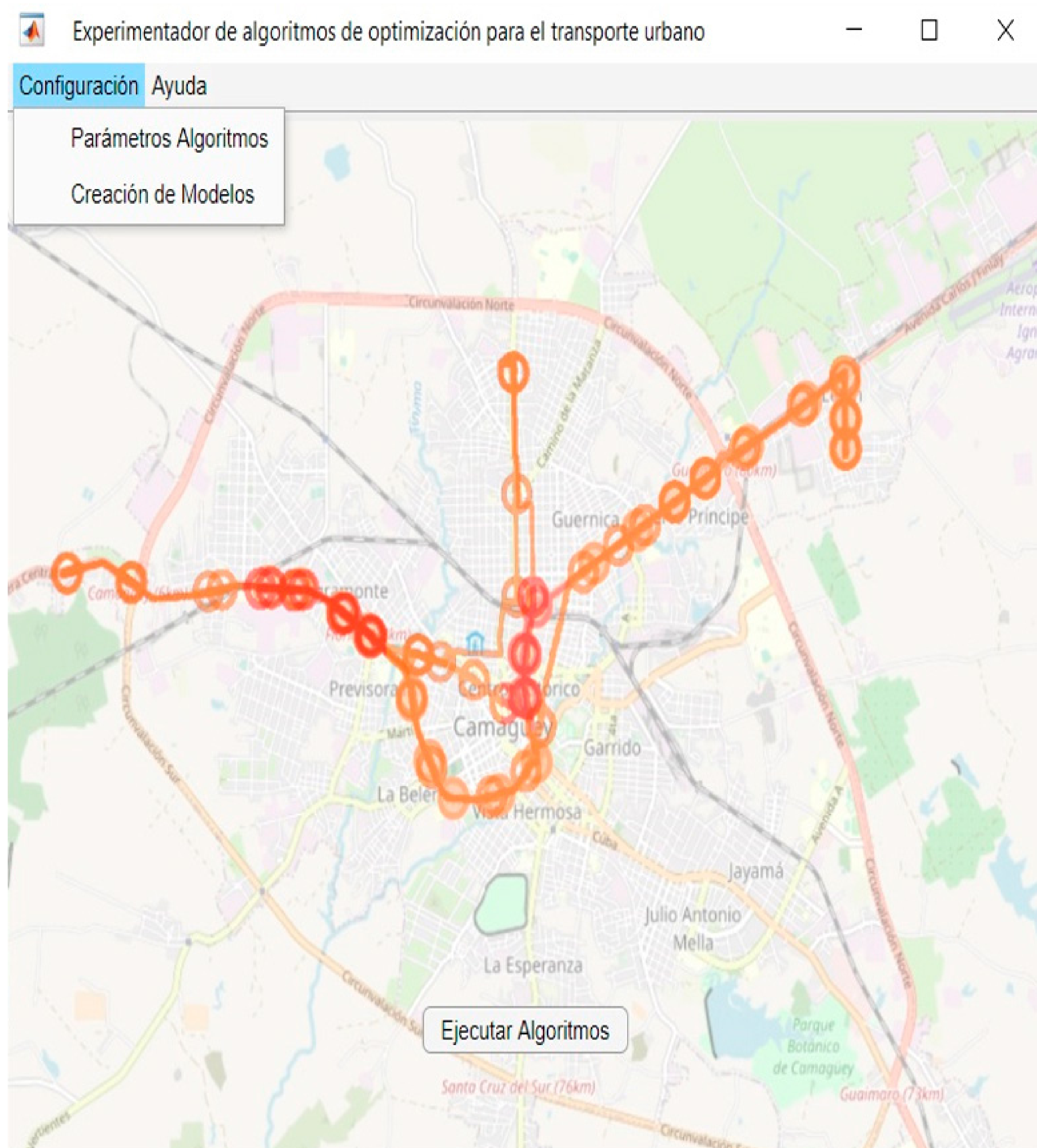


Figura 2. Rutas del transporte urbano en Camagüey obtenidas partir del uso de un EDA celular y SA.

De manera general, la investigación queda representada en la figura 3, donde se evidencia la transformación digital de los datos en la automatización de este proceso para la toma de decisión de los directivos del transporte.

## CONCLUSIONES

El ordenamiento del transporte urbano en la ciudad de Camagüey es un problema de investigación actual que necesita de la transformación digital, porque este se hace a criterio de



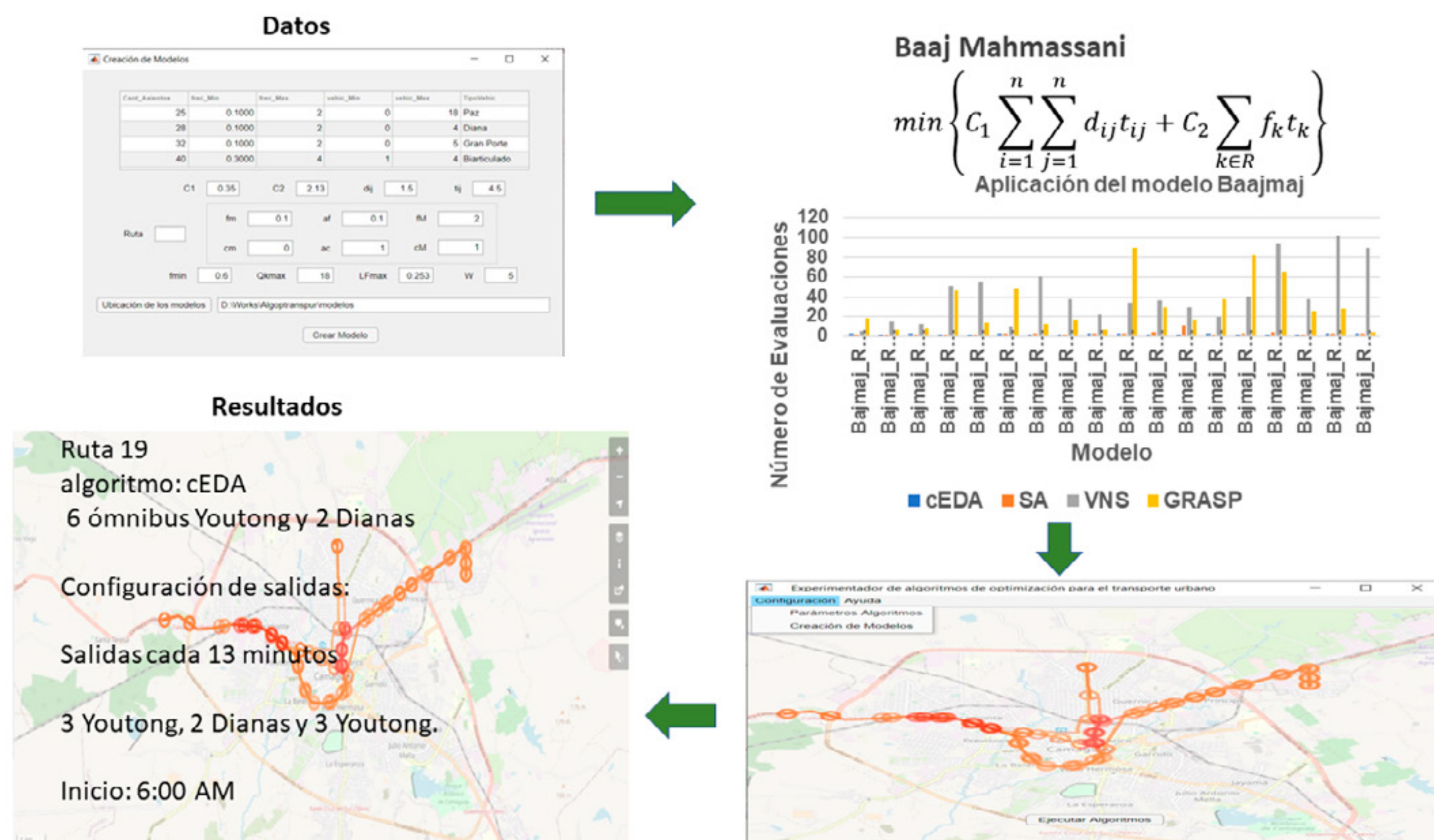


Figura 3. Esquema de trabajo de la investigación.

expertos y no se encontraron evidencias de trabajos que avalen el uso de la investigación de operaciones en tal sentido. A través de esta esta investigación, se diseña e implementa una biblioteca en MATLAB para ordenar el transporte urbano que utiliza el modelo baajmah por ser el que más se ajusta a la solución del problema investigativo propuesto. Para ello se emplean los algoritmos SA, cEDA, VNS y GRASP, metaheurísticas que resuelven problemas de optimización empleando una forma muy similar. Se evaluó la ejecución de la biblioteca desarrollada con datos reales de las rutas 3 y 19 de la ciudad de Camagüey a través de una herramienta computacional. Este análisis permitió demostrar que el cEDA es el algoritmo más factible con respecto a los implementados para la resolución de este problema con el modelo Baajmah.

## REFERENCIAS

- Ansola, C., E. S., & Rosete, A. (2021). Una solución metaheurística al problema de planificación de rutas de autobuses escolares con flota homogénea y selección de paradas. *Ingeniería*, 26(2), 233-253
- Baaj, M. H., y Mahmassani, H. S. (1991). An AI-based approach for transit route system planning and design. *Journal of Advanced Transportation*, 25(2), 187-209.
- Bello, R., García Lorenzo, M. M., Ramón-Hernández, A., Bello-García, B. ., Bello-García, M., Caballero, Y., Madera-Quintana, J., Rodríguez, Y., Filiberto, Y., Martínez, Y., Simón Cuevas, A., Sánchez-Ansola, E., Pérez-Pérez, A. C., & Rosete Suárez, A. (2020). Una mirada a la inteligencia artificial frente a la COVID-19 en Cuba. *Revista Cubana De Transformación Digital*, 1(3), 27–36.



- Campos Vasquez, N., Cueva Clemente, C., Bautista Zuñiga, L. M., & Sotomayor Burga, J. L. (2022). Métodos Algorítmicos para la optimización de rutas en el Sistema del Transporte Urbano; Pérez Pérez, A.
- Carrión Rico, G., & García Hernández, M. (2007). gvSIG: Sistema de Información Geográfica en Software Libre de la Generalitat Valenciana.
- Ceder, A., y Wilson, N. H. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(4), 331-344.
- Ceder, A., Yang, Y., Liu, T., y Guan, W. (2016). A case study of Beijing bus crew scheduling: a variable neighborhood-based approach. *Journal of Advanced Transportation*, 50(4), 434-445.
- Demšar, J. (2006). Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of Machine Learning Research*, , 7(Jan), 1-30.
- Dib, O., Moalic, L., Manier, M.-A., y Caminada, A. (2017). An advanced GA–VNS combination for multicriteria route planning in public transit networks. *Expert Systems with Applications*, 72, 67-82.
- Feo, T. A., y Resende, M. G. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization*, 6(2), 109-133.
- Friedman, M. (1937). The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the american statistical association*, 32(200), 675-701.
- González. (2012). Los tranvías de vapor en España. Una historia (casi) desconocida. Presentado en el VI Congreso de Historia Ferroviaria Vitoria Gasteiz 2012.
- García, S., Herrera, F. . (2009). Evolutionary undersampling for classification with imbalanced datasets: Proposals and taxonomy. *Evolutionary computation*, , 17(3), 275-306.
- García, S., Herrera, F. . (2008). Evolutionary Under-Sampling for Classification with Imbalanced Data Sets. Proposals and Taxonomy. *Evolutionary Computation*. .
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian journal of statistics*, 65-70. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/4615733>
- Iman, R. L., Davenport, J. M. (1980). Approximations of the critical region of the fbietkan statistic. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 9(6), 571-595.
- Madera, J. , Alba, E., y Ochoa, A.. Parallel Estimation of Distribution Algorithms. En E. Alba, editor, *Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- Mahdi Amiripour, S., Mohaymany, A. S., y Ceder, A. (2015). Optimal modification of urban bus network routes using a genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 141(3), 04014081.
- Martínez, Y., Rodríguez-González, A.Y., Madera, J., Bethencourt Mayedo, M., Lezama, F.(2021) Cellular Estimation of Distribution Algorithm Designed to Solve the Energy Resource Management Problem Under Uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence journal*, ISSN 0952- 1976,101(104231),
- Martínez, Y., Oquendo, H., Caballero, Y., Guerra, L. E., Junco, R., Benítez, I., . Madera, J. (2020) a). Aplicación de la investigación de operaciones a la distribución de recursos relacionados con la COVID-19. *Retos de la Dirección*, 14(2), 86-105.



- Martínez, Y., Rodríguez, A. Y., Madera, J., Mayedo, M., Moya, A., y Santiago, O. M. (2020) b). Applying some EDAs and hybrid variants to the ERM problem under uncertainty. Paper presented at the Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion.
- Martínez, Y., Madera, J., y Leguen, I. (2016). Algoritmos evolutivos con estimación de distribución celulares. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 10, 159-170.
- Martínez, Y., Madera, J., Rodríguez, A. Y., y Barigye, S. (2019) a). Cellular Estimation Gaussian Algorithm for Continuous Domain. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(5), 4957-4967.
- Martínez, Y., Rodríguez, A., Madera, J., Moya, A., Morgado, B., y Mayedo, M. B. (2019) b). CUMDANCauchy-C1: a cellular EDA designed to solve the energy resource management problem under uncertainty. Paper presented at the Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion.
- Mauttone, A. (2005). Optimización de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte público urbano colectivo.
- Mauttone, A., Cancela, H., y Urquhart, M. (2002). Diseño y optimización de rutas y frecuencias en el transporte colectivo urbano, modelos y algoritmos. Paper presented at the XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte.
- Mauttone, A., Urquhart, M. E. (2009). A multi-objective metaheuristic approach for the transit network design problem. *Public Transport*, 1(4), 253-273.
- Mladenović, N., Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11), 1097-1100.
- Morris, E. A., Ortigón-Sánchez, & Warren, J (2015). Movilidad sostenible: un proyecto viable para las ciudades cubanas [Sustainable Mobility-a viable project for Cuban cities]. *Temas*, (83):36–43.
- Oliva, D. (2021). *Metaheuristics in Machine Learning: Theory and Applications*. E. H. Houssein, & S. Hinojosa (Eds.). Springer
- Oyón, J. L. (1999). Transporte público y estructura urbana:(de mediados s. XIX a mediados s. XX): Gran Bretaña, Francia y países germánicos. *Ecología Política*(17), 17-35.
- Rasjido, J., Alancay, N., Villagra, S., & Pandolfi, D. (2016). Optimización de Rutas Aplicadas al Transporte de Personas. *CDD 607*, 25.
- Sánchez, M. G. (2015). Calesas, quitrines y ómnibus: transportación urbana en La Habana del siglo XIX. *Revista Quiroga*, 36-51.
- Shapiro, S. S., Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- Torres, I. M. G., Cardoso, E. C. I. , Mora, J. T., Gómez, Z. M. Q., Giraldo, C. M., y Rosabal, A. G (2020). Efecto económico parcial de la covid-19 y sus resultados en Camagüey, Cuba. *Retos de la Dirección*, tomo 14(2):34–54.
- Van Laarhoven, P. J., Aarts, E. H. (1987). Simulated annealing. In *Simulated annealing: Theory and applications* (pp. 7-15): Springer.

Zhao, F., Ubaka, I., y Gan, A. (2005). Transit network optimization: minimizing transfers and maximizing service coverage with an integrated simulated annealing and tabu search method. *Transportation Research Record*, 1923(1), 180-188.

Copyright © 2022 Martinez-Lopez, Y., Guevara-Yanes, L., Madera-Quintana, J.



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional