

# **Diseño optimizado de ruteo de vehículos capacitado mediante herramientas de tecnología 4.0: Google Colab y Gurobi en Nano Stores del centro histórico de Popayán**

**Nelson Emilio Paz Ruiz, Helmer Paz Orozco, Zuly Delgado Espinosa**

**Corporación Universitaria Comfacauca  
Popayán, Colombia**

## **Resumen**

En Colombia, la logística urbana ha cobrado mayor relevancia debido al crecimiento poblacional y económico, lo que plantea desafíos significativos para la distribución de mercancías, especialmente en las Nano Stores (tiendas de barrio), fundamentales para el comercio minorista. Factores como la infraestructura vial deficiente y los problemas de tráfico dificultan la planificación de rutas eficientes, generando mayores costos operativos y tiempos de entrega prolongados.

Ante esta problemática, se han desarrollado modelos de optimización de rutas, como el Vehicle Routing Problem (VRP), que permiten mejorar la eficiencia en la distribución mediante la reducción de costos y tiempos de entrega, contribuyendo así a una mayor satisfacción del cliente. En ciudades intermedias como Popayán, estos desafíos son aún más evidentes, por lo que se propone la implementación de un modelo de ruteo de vehículos capacitado (CVRP) para optimizar la distribución de mercancías a las Nano Stores del centro histórico.

Este estudio utiliza herramientas de tecnología 4.0, específicamente el lenguaje de programación Python, en conjunto con Google Colab y el optimizador Gurobi, para diseñar rutas eficientes que minimicen costos operativos y mejoren la gestión logística de los proveedores. Los resultados obtenidos demuestran que la implementación del modelo permite una reducción del 31,89% en los costos operativos, lo que facilita una mejor toma de decisiones en la planificación de rutas y optimiza los tiempos de entrega.

La aplicación de este enfoque basado en optimización matemática y tecnología avanzada no solo mejora la eficiencia del proceso logístico, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones en la mejora del ruteo de vehículos en entornos urbanos con condiciones similares.

**Palabras clave:** planificación del transporte; tráfico urbano; logística urbana

### **Abstract**

*In Colombia, urban logistics has become more important due to population and economic growth, which poses significant challenges for the distribution of goods, especially in Nano Stores (neighborhood stores), which are essential for retail trade. Factors such as poor road infrastructure and traffic problems make it difficult to plan efficient routes, generating higher operating costs and long delivery times.*

*In response to this problem, route optimization models, such as the Vehicle Routing Problem (VRP), have been developed to improve distribution efficiency by reducing costs and delivery times, thus contributing to greater customer satisfaction. In intermediate cities such as Popayán, these challenges are even more evident, so the implementation of a capacitated vehicle routing model (CVRP) is proposed to optimize the distribution of goods to the Nano Stores in the historical center.*

*This study uses 4.0 technology tools, specifically the Python programming language, in conjunction with Google Colab and the Gurobi optimizer, to design efficient routes that minimize operating costs and improve the logistics management of suppliers. The results obtained show that the implementation of the model allows a 31.89% reduction in operating costs, which facilitates better decision making in route planning and optimizes delivery times.*

*The application of this approach based on mathematical optimization and advanced technology not only improves the efficiency of the logistics process, but also lays the groundwork for future research on improving vehicle routing in urban environments with similar conditions.*

**Keywords:** transportation planning; urban traffic; urban logistics

## **1. Introducción**

La logística urbana de mercancías comprende actividades de transporte, almacenamiento y distribución en ciudades (Sapigiuc et al., 2023). Su importancia ha crecido con el aumento poblacional y económico (Gómez Zuluaga et al., 2022). En Colombia, el DNP (2022) reportó que los mayores costos logísticos se encuentran en el sector comercial (22,7%), agropecuario (22,2%) (Departamento Nacional de Planeación, 2023). El costo logístico total promedió es un 17,9% sobre las ventas, influenciado por un alza del 35,9% en costos de transporte (Galeano Banguera, 2024).

En Popayán, que concentra más del 80% de la población urbana del Cauca (García-Pajoy et al., 2023), el tráfico vehicular y el movimiento de mercancías han aumentado, impactando la logística urbana. Según el DANE, el comercio minorista generó \$151,9 billones (29,3% del total) en ventas (DANE, 2023). La ciudad enfrenta desafíos como la alta congestión, infraestructura vial inadecuada y baja participación ciudadana en políticas públicas (García-Pajoy et al., 2023). Optimizar rutas es clave para reducir costos y tiempos, mejorando la competitividad (Fontalvo



Delgado et al., 2023). Un correcto plan de rutas permite reducir costos operativos, mejorar tiempos de entrega y elevar la satisfacción del cliente (Tarazona Barragán et al., 2020).

Las Nano Stores son esenciales en el comercio colombiano, representando el 40% del sector y empleando a 575.000 personas (Barrera Perico, 2023). Fenalco (2024) indica que 93% de los hogares compran en estas tiendas, generando 50% de las ventas de alimentos y bebidas [10]. No obstante, enfrentan múltiples desafíos económicos y sociales (Lorduy, 2024), además de restricciones en distribución como ventanas de tiempo y tráfico (Carbonel Namay, 2015).

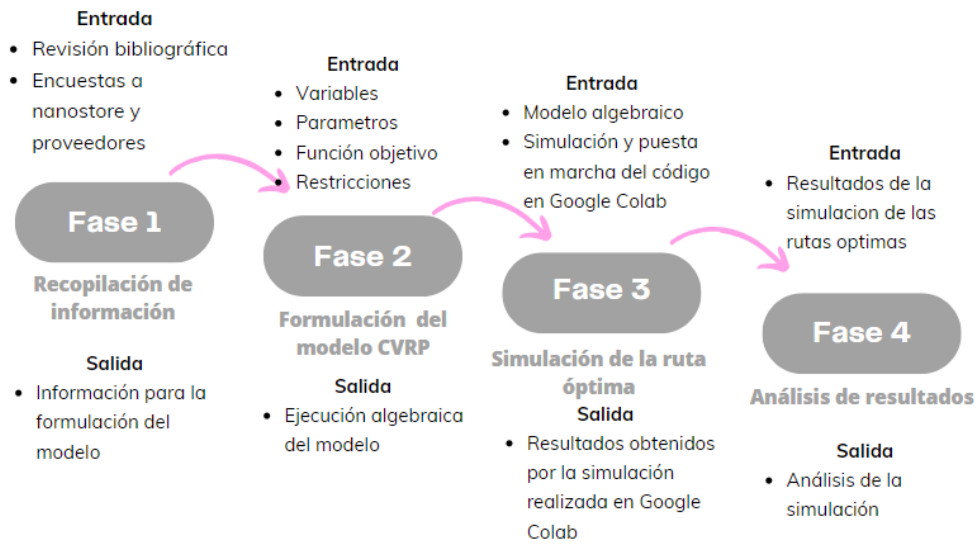
El VRP (Vehicle Routing Problem) optimiza la asignación de rutas, mejorando eficiencia y rentabilidad (Moyano Albarracín et al., 2024). Fontalvo destaca su capacidad para planificar rutas eficientes considerando restricciones logísticas (Fontalvo Delgado et al., 2023). Villanueva Sánchez señala que su implementación aumenta la satisfacción del consumidor en un 8,8%, mejora la capacidad de transporte en 6,14% y reduce costos (Villanueva Sánchez & Sierra Flores, 2023). Estos modelos, mediante algoritmos, mejoran la eficiencia y reducen costos al considerar capacidad vehicular, distancias y tiempos de espera (Peralta-Abarca et al., 2024).

La simulación del modelo se valida con Gurobi, un optimizador compatible con Python, AIMMS y R (Gu et al., 2008a). Se ejecuta en Google Colab, facilitando acceso y colaboración (Page & Brin, 2017). Es esencial verificar que las restricciones del modelo se cumplan adecuadamente en función del problema planteado (Por & Ferrer, 1958). Peña demostró en 2020 la viabilidad de la validación automática del VRP, agilizando la obtención de soluciones y minimizando errores humanos (Monzón Peña et al., 2023).

## 2. Metodología

El estudio emplea un enfoque metodológico mixto, combinando análisis cualitativo y cuantitativo. Primero, se aplicaron encuestas a comerciantes minoristas (Nano Stores) y proveedores para identificar desafíos logísticos. Paralelamente, se recolectaron datos sobre infraestructura vial, tráfico y variables clave. Con esta información, se desarrolló un modelo matemático de ruteo de vehículos (figura 1), considerando restricciones y objetivos de distribución. Finalmente, el modelo fue optimizado en función de distancias, capacidades vehiculares y tiempos de entrega, validándose mediante Gurobi.

Figura 1. Metodología.

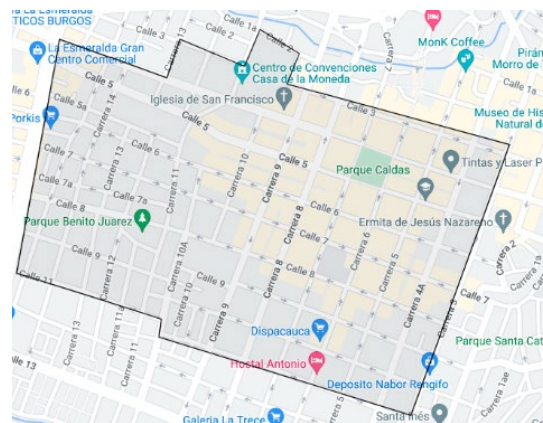


Fuente: Elaboración propia

### Fase I: Recopilación de información

Se recopila información mediante revisión bibliográfica y levantamiento de datos en el centro histórico de Popayán (figura 2). La zona de estudio se delimita debido a su alta densidad comercial y desafíos logísticos como tráfico, vendedores ambulantes y falta de parqueaderos. Se aplicaron encuestas a 16 tiendas, seleccionadas por conveniencia, con preguntas sobre tipo de transporte, productos, tiempos de carga y descarga, y proveedores. También se visitaron empresas para analizar costos operativos, limitaciones en rutas y tiempos de entrega, información clave para la validación del modelo.

Figura 2. Mapa de estudio, Centro Histórico de la ciudad de Popayán



Fuente: Google Maps, 2024 (s.f.).



## Fase II: Formulación del modelo VRP

Se utilizan datos de Alpina, San Fernando y Productos los Comuneros para formular un modelo matemático de ruteo de vehículos (VRP). Se establecen parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones, priorizando la reducción de tiempos y costos de entrega. Se adopta el Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) y se implementa en Python, utilizando Gurobi como optimizador y Google Colab para la ejecución del código y obtención de rutas.

## Fase III: Simulación de la ruta óptima

La simulación se basa en el modelo CVRP y considera coordenadas geográficas de las Nano Stores y proveedores para calcular distancias. Se incluyen restricciones como costos de transporte, capacidad vehicular y horarios de operación. La ejecución del código en Python y Google Colab permite evaluar la eficiencia y viabilidad del modelo, proporcionando datos sobre rutas óptimas, tiempos y costos.

## Fase IV: Análisis de resultados

Se analizan los resultados de la simulación para evaluar eficiencia y viabilidad del modelo, identificando fallas y oportunidades de mejora. Con base en estos resultados, se realizan ajustes en la distribución de rutas, optimizando la planificación logística y toma de decisiones.

# 3. Resultados

## 3. Formulación del modelo CVRP

### 3.1. Definición Vehicle Routing Problem (VRP)

En el presente trabajo estudia un VRP, en el cual considera múltiples proveedores, ventanas de tiempo de una semana y restricciones específicas (Dornemann, 2023), donde  $\{P, T, K\}$  está representado por un conjunto de nodos (Proveedores, Nano store y Vehículos) a través de variables de decisión  $X_{p,t,k}$  donde cada variable binaria indica si el vehículo  $K$  del proveedor  $p$  realiza la ruta al nodo  $t$  hasta el nodo  $t + 1$ , El conjunto de arcos en el modelo representa el desplazamiento entre los nodos en la red, donde se asume que cada arco corresponde a la ruta de menor costo entre los nodos  $p$  y  $t$ . De igual forma cuenta con unos parámetros claves del modelo incluyen: Costo por hora de trabajo  $C_{horap}$  del proveedor  $p$ , costo fijo de transporte  $F_i$  del proveedor  $p$ , capacidad máxima del vehículo  $C_{p,k}$ , tiempo máximo permitido  $T_{max}$  de la entrega, la distancia  $d_{p,t}$  entre el nodo  $t$  y el nodo  $t + 1$  para el proveedor  $p$ , y la velocidad promedio de entrega  $v_p$ . Además cuenta con restricciones para asegurar que cada vehículo respete su capacidad máxima de carga, que la disponibilidad de los vehículos no sea excedida por los proveedores, la continuidad de la ruta sea mantenida correctamente, garantizar que las entregas se realizan dentro del tiempo máximo establecido  $T_{max}$  y cada tienda sea visitada una vez.

El objetivo del presente problema busca optimizar los costos de transporte y operación, donde  $t_{p,t,k}$  es el tiempo total que toma el vehículo  $k$  del proveedor  $p$  en completar su ruta. Este modelo sirve como una base para desarrollar algoritmos heurísticos o metaheurísticos, para resolver problemas de ruteo en vehículos (VRP)

## 1.1. Formulación

### 1.1.1. Conjuntos

$P$  = Conjunto de proveedores, donde  $p \in P, \Rightarrow p$ : Alpina, San Fernando, Los Comuneros

$T$  = Conjunto de tiendas (Nano store), donde  $t \in T, \Rightarrow t$ : Tienda 1, tienda 2, tienda 3 ... tienda 16.

$K$  = Conjunto de vehículos, donde  $k \in K$

### 1.1.2. Definición de parámetros

$C_{p,k}$ : Capacidad máxima del vehículo  $k$  del proveedor  $p$ .

$C_{combustible}$ : Costo del combustible por kilometro para cada proveedor  $p$ .

$C_{horap}$ : Costo por hora de trabajo del proveedor  $p$ .

$F_p$ : Costo fijo de transporte para el proveedor  $p$ .

$T_{max}$ : Tiempo máximo permitido para cada entrega.

$d_{p,t}$ : Distancia que hay entre el proveedor  $p$  y la tienda  $t$ .

$v_p$ : Velocidad promedio de entrega del proveedor  $p$ .

$D_{p,t}$ : Demanda de la tienda  $t$  la cual debe ser cumplida por el proveedor  $p$ .

### 1.1.3. Variables de decisión

$x_{p,t,k}$ : Variable binaria que indica si el vehiculo  $k$  del proveedor  $p$  realiza la ruta hacia la tienda  $t$ , en donde  $x_{p,t,k} = 1$  si el vehículo sigue la ruta y  $x_{p,t,k} = 0$  en caso contrario.

$y_{p,t,k}$ : Cantidad de artículos entregados por el vehículo  $k$  del proveedor  $p$  en la tienda  $t$ .

$t_{p,t,k}$ : Tiempo empleado por el vehículo  $k$  del proveedor  $p$  para la entrega en la ruta hacia la tienda  $t$ .

$C_{p,t}$ : Costo total de la ruta desde el proveedor  $p$  hasta la tienda  $t$ .

### 1.1.4. Función objetivo

La función objetivo principal del problema se enfoca en minimizar el costo total de transporte y operación, lo que implica la optimización del servicio de entrega a cada nodo, obteniendo como consecuencia una reducción de costos. En donde se consideran los siguientes costos: costos de transporte fijo ( $F_p$ ), costos de combustible ( $C_{combustiblep}$ ) y por último los costos de mano de obra ( $C_{horap}$ ).

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{k=1} x_{p,t,k} \cdot C_{p,t} \quad (1)$$

Donde:

$C_{p,t}$ : Costo total de las rutas

$$C_{p,t} = F_p + \left( \frac{d_{p,t}}{1000} \right) \cdot C_{combustiblep} + \left( \frac{d_{p,t}}{v_i \cdot 1000} \right) \cdot C_{horap} \quad (2)$$

### 1.1.5. Restricciones

#### 1.1.5.1. Capacidad de vehículos

Garantiza que ningún vehículo del proveedor  $p$  transporte más carga de lo que puede manejar, lo cual asegura que respete su máxima capacidad a ser transportada desde el proveedor  $p$  hasta el nodo  $t$ ,  $x_{p,t,k}$  es una variable binaria que indica si el vehículo  $k$  del proveedor  $p$  viaja desde el nodo  $t$  al nodo  $t + 1$ ,  $C_{t,k}$  la capacidad máxima de carga del vehículo  $k$  del proveedor  $p$ .

$$\sum_{t \in T} y_{p,t,k} \leq C_{t,k}, \forall p, k \quad (3)$$

#### 1.1.5.2. Satisfacción de la demanda

La demanda total de cada una de las tiendas  $t$  debe ser cumplida por cada proveedor  $p$ , asegurando el total de los productos entregados por los vehículos  $k$  del proveedor  $p$  a una tienda  $t$  debe ser igual a la demanda total de la tienda.

$$\sum_p \sum_k y_{p,t,k} = D_{p,t}, \forall t \quad (4)$$

#### 1.1.5.3. Flujo de ruta

Asegura que el flujo de la ruta del vehículo  $k$  sea continuo, lo que quiere decir que cada vehículo  $k$  del proveedor  $p$  debe continuar su ruta, para que no se quede inactivo el vehículo y tenga una entrega de mercancías eficiente.

$$\sum_{\text{Salidas}} x_{p,t,k} = \sum_{\text{Entradas}} x_{p,t,k}, \forall p, k \quad (5)$$

#### 1.1.5.4. Continuidad de ruta

Para mantener la continuidad de las rutas, se debe garantizar que el vehículo  $k$  del proveedor  $p$  elabore el recorrido completo, involucrando que cada nodo que entre y salga.

$$\sum_t x_{p,t,k} = \sum_{t'} x_{p,t,k} \quad \forall p, k \quad (6)$$

#### 1.1.5.5. Uso de vehículos

Limita el uso de vehículos en cada trayecto, para cada trayecto específico entre los nodos  $t$  y  $t + 1$ , utilizando los vehículos disponibles para el proveedor  $p$ , suma de las variables binarias  $X_{p,t,k}$  para todos los vehículos  $k$  del proveedor  $p$  en el trayecto de  $t$  a  $t + 1$ , asegurando que no se asignen más de un vehículo a una ruta.

$$\sum_t x_{p,t,k} \leq 1, \forall p, k \quad (7)$$

#### 1.1.5.6. Tiempo máximo permitido

El tiempo total de recorrido del proveedor  $p$  no debe exceder el tiempo máximo permitido  $T_{\max}$ , cumpliendo así con las limitaciones de tiempo para las entregas, donde  $t_{p,t,k}$  tiempo de entrega desde el proveedor  $p$  a la tienda  $t$ . su ruta,  $T_{\max}$  el tiempo máximo permitido para las entregas.

$$t_{p,t,k} \leq T_{\max}, \forall p, t, k \quad (8)$$

#### 1.1.5.7. Asignación de rutas

Cada tienda (nodo) tiene que ser visitada exactamente una vez por cada proveedor  $p$  durante el proceso de entrega, garantizando así que cada nodo reciba una visita única, su componente: la suma de todas las variables  $X_{p,t,k}$  para todos los proveedores  $p$  y vehículos  $k$  en el nodo  $t$ , la suma de todas las asignaciones de vehículos para un nodo debe ser exactamente uno, ya que será visitado una sola vez.

$$\sum_p \sum_k x_{p,t,k} = 1, \forall t \quad (9)$$

#### 1.1.5.8. Asignación de variable binaria

La variable  $x_{i,j,k}$  debe ser un variable binaria, lo que quiere decir que si el vehículo

$k$  del proveedor  $p$  realiza la ruta hacia la tienda  $t$   $x_{i,j,k} = 1$  si el vehículo sigue la ruta, en caso contrario es igual a 0

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \forall p \in P, t \in T, k \in K \quad (10)$$

#### 1.1.5.9. No negatividad

Esta restricción asegura que ninguna de las variables  $x_{p,t,k}$ ,  $y_{p,t,k}$ ,  $t_{p,t,k}$  y  $C_{p,t}$  no sean negativas.

$$x_{p,t,k} \geq 0, y_{p,t,k} \geq 0, t_{p,t,k} \geq 0, C_{p,t} \geq 0$$

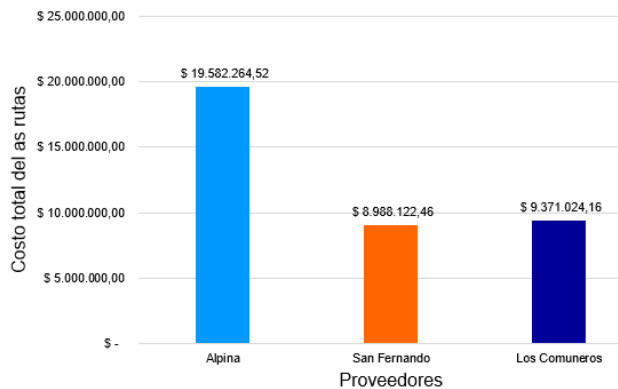
## 4. Simulación

La simulación del CVRP se implementó en Google Colab, un servicio alojado de Jupyter Notebook que permite la ejecución de código sin costo en GPUs y TPUs. Se utilizó inteligencia artificial para generar código basado en lenguaje natural, aunque fue necesario ajustarlo manualmente para garantizar su precisión (Page & Brin, 2017)

Se empleó Gurobi Optimization, un solucionador compatible con Python, AIMMS y R (Gu et al., 2008). Este software utiliza los algoritmos barrera y simplex para resolver modelos continuos y enteros mixtos, destacando el método simplex por su estabilidad numérica y eficiencia en modelos grandes (Gu et al., 2008)

En la figura 3, se presentan los costos de cada ruta simulada, con un total de \$37.941.411,14 para los tres proveedores. Alpina registra el mayor costo de transporte (\$19.582.264,52) debido a sus rutas más extensas en comparación con Los Comuneros y San Fernando

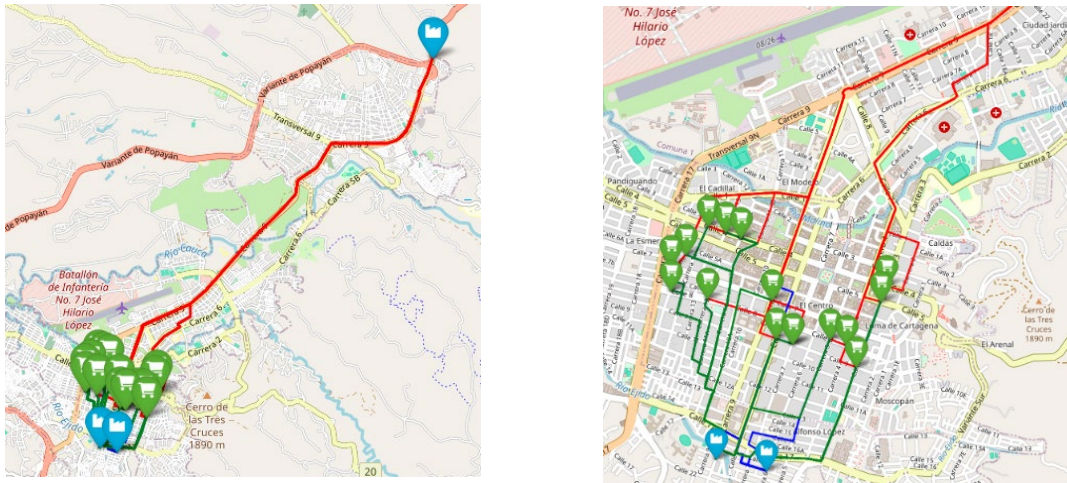
Figura 2. Costos simulados.



Fuente: Elaboración propia.

La simulación generó un mapa del ruteo optimizado, donde se visualizan las rutas de cada proveedor. En la figura 14, se presentan las rutas completas (a) y una versión ampliada (b) para una mejor visualización de las tiendas en la zona de estudio en Popayán. Además, se incluyen tres mapas individuales que muestran el recorrido de cada proveedor hasta las Nano Stores, respetando el sentido de las vías en la ciudad.

Figura 4. Mapa rutas optimizadas.



Fuente: Imagen (a) representa ubicación, imagen (b) representa ubicación 2, elaboración propia.

## 5. Discusión

Los ruteos optimizados permiten a cada proveedor abastecer las Nano Stores de manera eficiente, reduciendo tiempos de entrega y mejorando la distribución en el centro histórico de Popayán. En la tabla 1, se detallan los tiempos optimizados por ruta y entrega.

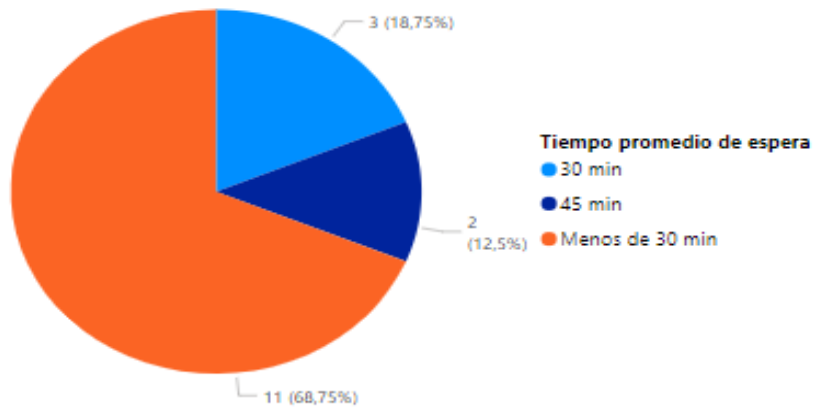
**Tabla 1. Tiempos optimizados. (Minutos)**

Rutas	Alpina	Los Comuneros	San Fernando
1	10,8	2,4	1,8
2	10,8	2,4	1,8
3	11,4	2,4	1,8
4	11,4	2,4	1,8
5	11,4	1,8	1,8
6	11,4	1,8	1,2
7	10,8	1,8	1,8
8	10,8	1,2	1,8
9	11,4	1,2	1,8
10	11,4	1,2	1,8
11	11,4	1,2	1,2
12	11,4	1,2	1,2
13	11,4	1,2	1,2
14	10,8	1,8	1,8
15	10,8	1,8	2,4
16	10,8	2,4	1,8

Fuente: Elaboración propia.

La simulación del modelo muestra una mejora significativa en los tiempos de entrega optimizados en comparación con los tiempos reales en las Nano Stores, permitiendo una distribución más eficiente y reduciendo retrasos. Según las encuestas, muchos comerciantes reportaban demoras en la entrega y descarga de mercancías. se observa que el 68,75% de las entregas tardan menos de 30 minutos, aunque varios comerciantes mencionaron que el proceso suele superar los 20 minutos. (Figura 4)

Figura 3. Tiempo promedio de entrega - descarga de mercancías



Fuente: Elaboración propia.

La optimización de rutas redujo los costos logísticos en un 31,89%. La tabla 2 muestra la comparación de costos antes y después de la optimización, destacando que Alpina tuvo la mayor reducción (47,96%), seguida de Los Comuneros (19,81%) y San Fernando (9,57%). La variación en el ahorro se debe a la ubicación de cada proveedor, siendo Alpina el más distante, lo que genera mayores costos de transporte.

Tabla 2. Comparativa de costos.

Costos semanales	Recopilados	Optimizados	Reducción en %
<b>Alpina</b>	\$ 19.582.264,52	\$ 10.198.064,09	47,96%
<b>San Fernando</b>	\$ 8.988.122,46	\$ 8.127.932,71	9,57%
<b>Los Comuneros</b>	\$ 9.371.024,16	\$ 7.514.872,26	19,81%

Fuente: Elaboración propia.

## 6. Conclusión

Los datos recopilados en las encuestas permitieron identificar tiempos de carga y descarga, la ubicación de las Nano Stores, proveedores y costos de transporte, factores clave para optimizar el modelo de distribución. La aplicación del CVRP incorporó 8 parámetros, 3 variables (incluyendo una binaria) y 9 restricciones, logrando una mejora significativa en la eficiencia logística al reducir costos y tiempos de entrega. Considerando limitaciones como la capacidad vehicular y los tiempos máximos de entrega, se obtuvo una reducción total de costos del 31,89%, con variaciones

específicas para Alpina (47,96%), San Fernando (9,57%) y Los Comuneros (19,81%). Además, el uso de Google Colab y Gurobi facilitó la implementación del modelo, optimizando la planificación de rutas y mejorando la eficiencia en la distribución.

## 7. Referencias

- Barrera Perico, N. (2023). Tenderos de barrio: un pilar importante para la economía local.
- Carbonel Namay, T. de J. (2015). Modelo matemático de planificación de rutas para minimizar los costos del reparto de la empresa San Isidro Labrador S.R.L. en el año 2015.
- DANE. (2023). Encuesta Anual de Comercio (EAC). <https://www.dane.gov.co/index.php/component/content/article/46-encuesta-anual-de-comercio-eac?Itemid=123&phpMyAdmin=3om27vamm65hkhrtgc8rrn2g4>
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). El DNP reveló que el costo logístico nacional se ubicó en 17,9%, 5 p.p. por encima de la meta de 12,9%.
- Dornemann, J. (2023). Solving the capacitated vehicle routing problem with time windows via graph convolutional network assisted tree search and quantum-inspired computing. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 9. <https://doi.org/10.3389/fams.2023.1155356>
- Fontalvo Delgado, W. A., Pachón Pachón, J. C., & Álvarez Martínez, D. (2023). Sistema inteligente de ruteo.
- Galeano Banguera, P. (2024). Los retos del sector logístico para el 2024 | Portafolio. <https://www.portafolio.co/negocios/industrias/los-retos-del-sector-logistico-para-el-2024-segun-analdex-y-fitac-596528>
- Garcia-Pajoy, J., Paz Ruiz, N., Chong, M., & Luna, A. (2023). Utilising PLS-SEM and Km2 Methodology in Urban Logistics Analysis: A Case Study on Popayan, Colombia. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 12976, 15(17), 12976. <https://doi.org/10.3390/SU151712976>
- Gómez Zuluaga, C. M., Osorno, G. M., Salcedo Mosquera, J. D., & Urriago Fontal, J. C. (2022). Logística urbana y políticas públicas modelada desde la dinámica de sistemas: Un enfoque general usando análisis bibliométrico. *Semestre Económico*, 25(59), 1–17. <https://doi.org/10.22395/SEEC.V25N59A3>
- Gu, Dr. Z., Rothberg, Dr. E., & Bixby, Dr. R. (2008a). Gurobi Optimizer - Gurobi Optimization. <https://www.gurobi.com/faqs/gurobi-optimizer/>
- Gu, Dr. Z., Rothberg, Dr. E., & Bixby, Dr. R. (2008b). Solver Parameters to Manage Numerical Issues - Gurobi Optimizer Reference Manual. [https://docs.gurobi.com/projects/optimizer/en/current/concepts/numericguide/numeric\\_parameters.html#choosing-the-right-algorithm](https://docs.gurobi.com/projects/optimizer/en/current/concepts/numericguide/numeric_parameters.html#choosing-the-right-algorithm)
- Lorduy, J. (2024). ¿Cuánto crecieron las ventas de las tiendas de barrio de Colombia en el primer semestre de 2024? | Portafolio. In Portafolio. <https://www.portafolio.co/negocios/comercio/cuanto-crecieron-las-ventas-de-las-tiendas-de-barrio-de-colombia-en-el-primer-semestre-de-2024-609827>
- Monzón Peña, A., Rodríguez Flores, F., & García Gómez, R. (2023). Extensión de un sistema de validación automática para modelos de VRP. Universidad de la Habana.
- Moyano Albarracin, J. O., Taborda Aislant, F. F., & Milena Rozo Rincón. (2024). Aplicación de los modelos matemáticos y estadísticos en la cadena de suministro. 1 Application of mathematical and statistical models in the supply chain.
- Page, L., & Brin, S. (2017). Google Colab. <https://research.google.com/colaboratory/intl/es/faq.html>



- Peralta-Abarca, J. del C., Moreno Bernal, P., Bonilla Sánchez, F. de J., & Hernández Aguilar, J. A. (2024). Optimización y su relación con la logística. *Inventio*, 20(50). <https://doi.org/10.30973/inventio/2024.20.50/7>
- Por, S., & Ferrer, M. (1958). Investigación operativa. *Documentación Administrativa*, 7–18. <https://doi.org/10.24965/DA.VI6.956>
- Sapigiuc, E. G., Salvador Zuriaga, P., & Moreno Mas, A. (2023). El papel de los HUBS urbanos para una distribución urbana de mercancías sostenible: Antecedentes y análisis de viabilidad. Universidad Politécnica de Colombia.
- Tarazona Barragán, J. D., González Casallas, O. F., Buitrago Portilla, L. K., Muñoz Buenahora, A. F., & Pineda Villamizar, S. A. (2020). Mejoramiento de rutas de reparto y secuenciación de operaciones de la empresa harinas san marín con heurística CLARKE-WRIGTH. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/PONENCIA.768>
- Villanueva Sánchez, G. M., & Sierra Flores, L. M. (2023). Mejora de la recolección de residuos sólidos municipales en la ciudad de Tayabamba mediante la aplicación del modelo VRP.

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)