DISEÑO DE RUTEO DE VEHÍCULOS CAPACITADO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GOOGLE COLAB EN NANO STORE DEL CENTRO HISTÓRICO DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN

ANYI DANIELA HERNANDEZ ORDOÑEZ

ZULY ALEXANDRA GÓMEZ CAMAYO

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA - UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA INDUSTRIAL

POPAYÁN, CAUCA

2024

DISEÑO DE RUTEO DE VEHÍCULOS CAPACITADO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GOOGLE COLAB EN NANO STORE DEL CENTRO HISTÓRICO DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN

ANYI DANIELA HERNANDEZ ORDOÑEZ

ZULY ALEXANDRA GÓMEZ CAMAYO

Proyecto de grado

Director:

MSc. Nelson Emilio Paz Ruiz

Codirector:

MSc. Helmer Paz Orozco

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA - UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA INDUSTRIAL

POPAYÁN, CAUCA

2024

DEDICATORIAS

“Dedico este trabajo a mi madre Luz Marina Ordoñez Hoyos, aunque no está físicamente presente, sigue guiándome y acompañándome desde el cielo en cada uno de mis pasos. Ella me enseñó que la mejor herencia que me podía dejar era el estudio, y atreves de su ejemplo me enseñó la resistencia, el amor y la fortaleza. Fue una mujer que me inspiró a ser cada día una mejor persona, este logro es en parte por ella. Gracias, mamá”

Anyi Daniela Hernández Ordoñez

“Hoy he llegado al final del camino en esta etapa universitaria y quiero dedicar este proyecto de grado con todo mi amor y cariño a mi madre Sandra Elisabeth Camayo, mi padre Hugo Alexander Gómez, mi tía Ana Lucia Camayo y mi abuelo Sem Arturo Camayo, por estar presentes sin importar las circunstancias, su apoyo incondicional, su amor, su sacrificio en momentos difíciles y sus palabras de aliento han sido una motivación para lograr mis sueños, gracias por enseñarme que con constancia, dedicación y disciplina las metas se pueden cumplir, este logro es tan suyo como mío porque sin su apoyo no hubiera sido posible. Este logro es un reflejo de cada uno de sus esfuerzos, gracias por siempre estar conmigo.”

Zuly Alexandra Gómez Camayo

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a Dios por permitirme vivir esta experiencia llena de aprendizajes y conocimientos

En especial a mi Madre quien siempre ha sido mi mayor fuente de inspiración, mi razón y mi fortaleza. A mi Padre y hermanos que con su amor y trabajo siempre me apoyaron e impulsaron, siempre estuvieron a mi lado, motivándome para seguir y culminar esta etapa.

A compañeros y profesores de ellos me llevo aprendizajes y experiencias para mi formación profesional. A nuestro director MSc. Nelson Paz por su paciencia, generosidad al brindarnos sus conocimientos y acompañarnos en este proceso, a nuestro Codirector MSc. Helmer Paz por ser parte fundamental de este proyecto, por su apoyo y aporte de sus conocimientos.

Anyi Daniela Hernández Ordoñez

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos primero que todo a Dios por permitirme culminar con mi ciclo universitario, agradezco a mi familia, especialmente a mis padres por apoyarme en esta etapa de mi vida, por estar presentes y ser mi motivación para seguir adelante, gracias por brindarme la oportunidad de convertirme en profesional, sin ustedes no hubiera sido posible.

Agradezco a la Corporación Universitaria Comfacauca por brindarme la oportunidad de ser parte de sus estudiantes y futuros profesionales, a cada uno de los docentes y el personal administrativo que nos brindó su apoyo y enseñanzas al pasar de la carrera, a nuestro director de proyecto de grado MSc. Nelson Emilio Paz Ruiz y codirector MSc. Helmer Paz Orozco por sus consejos, paciencia y dedicación en cada etapa del proyecto, a mi compañera Anyi Daniela Hernández Ordoñez quien con su apoyo y colaboración en la carrera y el proyecto de grado hizo de este proceso una experiencia agradable y enriquecedora. Finalmente agradezco a todas y cada una de las personas que directa e indirectamente hicieron parte de mi proceso para la obtención de este logro.

Zuly Alexandra Gómez Camayo

Tabla de contenido

RESUMEN 10
ABSTRACT 11
INTRODUCCIÓN 12
OBJETIVOS 14
Objetivo general 14
Objetivos específicos 14
Organización del documento 15
CAPITULO 1 16
1. Generalidades 16
1.1. Formulación del problema 16
1.2. Justificación 19
1.3. Metodología 20
CAPITULO 2 24
2. Marco teórico y revisión literaria 24
2.1. Marco teórico 24
2.2. Antecedentes 29
2.3. Revisión de literatura en VRP 32
CAPITULO 3 35
3. Identificación de componentes críticos y recolección de datos 35
3.1. Zona de estudio 35
3.2. Identificación Nano Stores 36
3.3. Identificación Proveedores 38
CAPITULO 4 45
4. Formulación del modelo CVRP 45
4.1. Definición Vehicle Routing Problem (VRP) 45
4.2. Formulación 45
CAPITULO 5 49
5. Resultados 49
5.1. Simulación de la ruta optima 49
5.2. Análisis de resultados 54
CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS 56

Conclusiones....56
Investigaciones futuras....57
ANEXOS....58
Anexo 1. Encuesta a Nano store....58
Anexo 2. Entrevistas a proveedores....59
Anexo 3. Evidencia fotográfica visita empresas....60
Anexo 4. Código....60
REFERENCIAS....68

Lista de figuras

Figura 1. Variación anual, año corrido y doce meses de las ventas reales y el personal ocupado. 16
Figura 2. Variación mensual del ICTC, según grupos de costos.....17
Figura 3. Tipos de entrega de transporte. 18
Figura 4. Metodología. 21
Figura 5. Mapa de estudio, Centro Histórico de la ciudad de Popayán. 22
Figura 6. Ejemplo gráfico problema de transporte. 24
Figura 7. Esquema de una solución VRP.....25
Figura 8. Ubicación geográfica de Popayán. 35
Figura 9.Ubicación de Nano store.....37
Figura 10. Proveedores nano store.....38
Figura 11. Ubicaciones proveedores.....39
Figura 12. Sedes Alpina. 40
Figura 13. Sedes San Fernando. 41
Figura 14. Cantidad de vehículos por proveedor. 43
Figura 15. Costos simulados.....50
Figura 16. Costos optimizados.....51
Figura 17. Mapa rutas optimizadas. 52
Figura 18. Ruteo Alpina. 52
Figura 19. Ruteo San Fernando.....53
Figura 20. Ruteo Los Comuneros. 53
Figura 21. Tiempo promedio de entrega - descarga de mercancías. 55

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de VRP. 25
Tabla 2. Antecedentes. 29
Tabla 3. Información recolectada por proveedor. 42
Tabla 4. Tipos de vehículos y su capacidad. 44
Tabla 5. Costos por km recorrido. 50
Tabla 6. Tiempos optimizados. 54
Tabla 7. Comparativa de costos. 55

Lista de anexos

Anexo 1.Encuesta a nano store. 58
Anexo 2. Encuesta a proveedores. 59
Anexo 3. Evidencia fotográfica 60

RESUMEN

En Colombia la logística urbana se ha elevado con el aumento de la población y actividad económica, por lo que se enfrentan a diferentes desafíos significativos como: la infraestructura vial, problemas de tráfico, entre otros, para la distribución de mercancía en los comercios especialmente las nano store que son fundamentales para el consumo masivo. Teniendo en cuenta esta problemática se han realizado modelos relacionados con asignación de rutas (VRP), herramienta que optimiza sus rutas de entrega mejorando así la eficiencia y la reducción de costos, aumentando la satisfacción del cliente. Mediante una revisión de la literatura, se encontró que, en ciudades intermedias, como en Popayán, se enfrenta a estas problemáticas, por lo que se propone desarrollar un ruteo de vehículos capacitado (CVRP) que minimice los costos operativos y tiempos de entrega, enfocado en la eficiencia de los proveedores que abastecen las Nano store (tiendas de barrio) ubicadas en el centro histórico de Popayán. De acuerdo con esto se planifica una ruta adecuada con el lenguaje de programación Python en conjunto con la herramienta Google Colab y el optimizador Gurobi, obteniendo como resultado la eficiencia y viabilidad, dado que con la ayuda del modelo se alcanza una reducción de costos del 31,89% para los proveedores, obteniendo una mejora en la toma de decisiones, lo que posibilita una redistribución de las rutas, mejorando tanto costos como tiempo en la entrega de mercancías.

Palabras clave: Comercio, optimización, toma de decisiones, tráfico urbano, zona urbana.

ABSTRACT

In Colombia, urban logistics has risen with the increase in population and economic activity, so they face different significant challenges such as: road infrastructure, traffic problems, among others, for the distribution of goods in stores, especially the nano stores that are essential for mass consumption. Taking into account these problems, models related to route allocation (VRP) have been developed, a tool that optimizes their delivery routes, thus improving efficiency and reducing costs, increasing customer satisfaction. Through a literature review, it was found that, in intermediate cities, such as Popayán, these problems are faced, so it is proposed to develop a trained vehicle routing (CVRP) that minimizes operating costs and delivery times, focused on the efficiency of suppliers that supply the Nano store (neighborhood stores) located in the historic center of Popayán. Accordingly, an adequate route is planned with the Python programming language in conjunction with the Google Colab tool and the Gurobi optimizer, obtaining as a result efficiency and viability, since with the help of the model a cost reduction of 31,89% is achieved for suppliers, obtaining an improvement in decision making, which enables a redistribution of routes, improving both costs and time in the delivery of goods.

Key words: Commerce, optimization, decision making, urban traffic, urban area.

INTRODUCCIÓN

La logística urbana de mercancías se define como el conjunto de actividades relacionadas con el transporte, almacenamiento y distribución de bienes dentro de los límites de una ciudad [1], su importancia se ha elevado con el aumento de la población y la actividad económica en las diversas ciudades [2]. En Colombia, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) para el 2022, los mayores costos logísticos, se encuentran en el sector comercial, con un 22,7%; seguido del agropecuario, con un 22,2%; la minería, con un 20,6%; la construcción, con un 17,5%, y el industrial, con un 9,2% [3]. Los aumentos en los costos de transporte, que se elevaron un 35,9%, tuvieron un impacto directo en el costo logístico total, el cual alcanzó un promedio nacional del 17,9% sobre las ventas [4]. A nivel departamental, Popayán destaca por concentrar más del 80% de la población urbana del Cauca, superando significativamente a los demás municipios [5], en contraste con lo anterior, se observa un incremento en el tráfico vehicular y movimiento de mercancías en el sector urbano de la ciudad, en una encuesta realizada por el DANE evidencia que el comercio minorista aporta con $151,9 billones (29,3% del total) de ventas, realizadas por empresas objeto de estudio em Popayán [6]. En este sentido, la logística urbana de la ciudad afronta desafíos, causados por: zonas con mayor flujo de vehículos, la concentración de establecimientos comerciales, la infraestructura vial que no está diseñada para el transporte multimodal, el aumento demográfico de la población y la poca participación ciudadana en el proceso de políticas públicas [5]. Ante esta situación, es fundamental optimizar estas operaciones para reducir tiempos y costos, mejorando así la competitividad empresarial [7]. La realización de rutas adecuadas ayuda a enfrentar los múltiples desafíos a los que se enfrenta este comercio, logrando la optimización en la entrega de mercancías, por lo que un correcto plan de rutas permite a las empresas reducir costos operativos, tiempos de entrega, mejorar la utilización de recursos y elevar la satisfacción del cliente [8].

Las tiendas de barrio son un factor importante para la sociedad colombiana, debido a que ofrece diferentes productos de la canasta familiar, aportan cercanía y una atención personalizada [9]. Según datos de Fenalco en el año 2024, Colombia tiene cerca de 500.000 tiendas de barrio, que representan el 40% de los comercios del país y emplean a unas 575.000 personas. Además, son clave en el consumo masivo, ya que al menos el 93 % de los hogares colombianos compran ahí, siendo los responsables de por lo menos el 50% de las ventas de empresas de consumo en categorías como alimentos y bebidas [10]. Estas tiendas no solo son un canal importante de distribución, sino también una fuente de empleo para más de 1.1 millones de personas. Sin embargo, a pesar de su relevancia, este sector se encuentra en una encrucijada debido a los múltiples desafíos económicos y sociales que enfrenta [11]. Los proveedores de este tipo de comercio presentan diversos desafíos en el momento de la entrega de mercancías en las Nanostore, las restricciones específicas que enfrenta este sistema incluye ventanas de tiempo en

las entregas, tiempos del viaje dependientes del tráfico, gran cantidad de comercios, entre otros [12].

Un modelo de asignación de rutas (VRP) adaptado a las condiciones locales, tiene potencial en la mejora significativa para la eficiencia operativa y la rentabilidad del comercio minorista, este enfoque aborda problemas específicos del entorno urbano, también proporciona una posible solución basada en datos para la gestión logística [13]. Según Fontalvo Delgado [7] un modelo VRP es una solución viable para planificar las rutas de una flota de vehículos que salen de un depósito y visitan cada cliente, se debe procesar un método de solución basado en parámetros de entrada específicos. Como lo demuestra el estudio de Villanueva Sanchez [14], la implementación y optimización del modelo VRP ayuda a obtener avances como: un aumento en la satisfacción del consumidor del 8,8%, un crecimiento en la capacidad de transporte utilizada del 6,14% y un ahorro en los costos. Estos modelos, mediante algoritmos, mejoran la eficiencia y reducen costos al considerar la capacidad de los vehículos, distancias, tiempos de espera y restricciones [15]. Los tiempos de entrega prolongados pueden afectar la eficiencia en nano store, por lo cual es importante encontrar estrategias más confiables que maximicen la probabilidad de entregar a tiempo la mercancía.

La simulación del modelo VRP se valida por medio del optimizador Gurobi, el cual es un tipo especial de software llamado "solucionador". Se interactúa con él a través de lenguajes de programación como Python, AIMMS y R [16]. Utilizando herramientas de Google Colab para la ejecución del código, el cual es un servicio alojado de Jupyter Notebook que no requiere configuración y que ofrece acceso sin coste económico a recursos de computación, adicionalmente permite compartir el acceso de los archivos [17], es primordial comprobar si las restricciones del modelo cumplen adecuadamente a las características esenciales del problema [18], Peña [19] demostró en 2020 la viabilidad de la validación automática para el VRP al verificar las restricciones de un modelo el cual refleja adecuadamente las características de este, abordando errores humanos comunes en la modelación, en donde se realiza un análisis de un sistema previo, alcanzando como objetivo la agilización en los procesos de obtención de soluciones[19], haciendo más eficiente y precisa la resolución de problemas de enrutamiento de vehículos.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se propone un modelo matemático enfrentar retos específicos que permita al comercio minorista operar de forma más eficiente, adaptándose a diferentes necesidades, de tal forma que la optimización en la distribución de mercancías mejora eficazmente la logística, como también la transformación en el entorno tanto comercial como económico del centro histórico de la ciudad de Popayán.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un ruteo de vehículos capacitado (CVRP) que minimice los costos operativos y tiempos de entrega de los proveedores en el Centro Histórico del municipio de Popayán.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la literatura en relación con logística de carga urbana en la distribución de mercancías.
- Formular un modelo de ruteo de vehículos capacitado (CVRP) del comercio minorista, para encontrar la ruta óptima.
- Simular la ruta óptima por medio de modelación en Gurobi en la plataforma Google Colab.
- Analizar las soluciones obtenidas de la ruta óptima en el centro histórico del municipio de Popayán.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El contenido del documento se organiza en cinco secciones. Dando inicio con el capítulo 1 generalidades en el cual se expone la formulación del problema, la justificación y metodología, donde se analizan los desafíos que enfrenta la logística urbana en la entrega de productos al comercio minorista y la manera para encontrar una solución. El Capítulo 2 abarca el marco de teórico, antecedentes y revisión de literatura, profundizando en aspectos como los tipos de VRP y métodos adecuados para sistema de ruteo, costos logísticos de transporte y distribución, así como problemas de transporte y antecedentes de estudios relevantes que aportan a la planificación del presente trabajo.

Capítulo 3 titulado identificación de componentes críticos y recolección de datos, se aborda la primera fase de la metodología se realiza la recolección de información sobre las partes involucradas en las nano store y la identificación de los principales proveedores e identificación de aspectos de la zona de estudio. El capítulo 4 formulación del modelo se expone lo referente a las variables, parámetros, función objetivo y demás componentes de la formulación del modelo en forma algebraica, presentando así una solución óptima, seguido se presenta el capítulo 5 resultados, presentando la simulación de la ruta optima, en donde se presenta los análisis de la investigación desarrollada por el modelo simulado. Finalmente se llevan a cabo las conclusiones y posibles investigaciones futuras, seguido de las referencias y anexos los cuales se incluyen al final del documento.

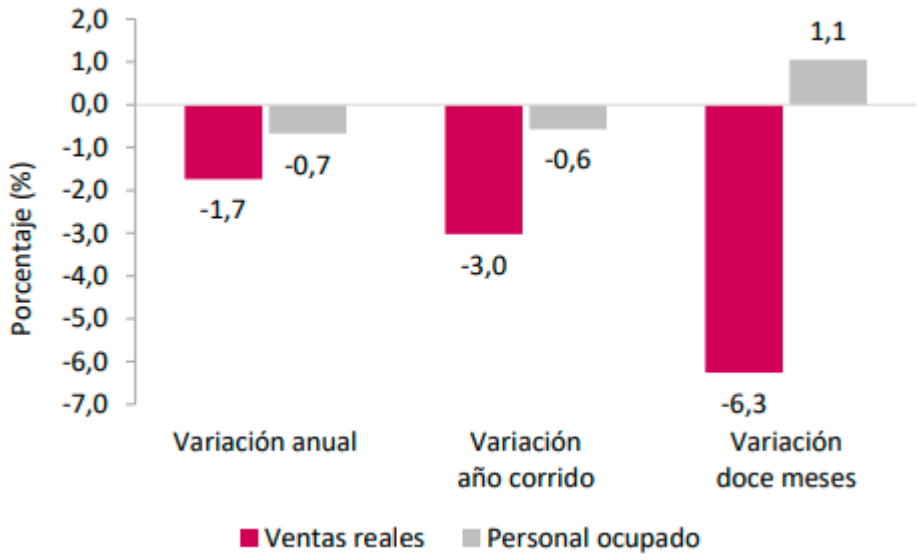
CAPITULO 1

1. Generalidades

1.1. Formulación del problema

La optimización de rutas de vehículos en la cadena de suministro del comercio minorista es crucial para mejorar la eficiencia operativa y la competitividad, por lo que las empresas de transporte de carga juegan un papel importante, ya que son las encargadas de entregar a tiempo los productos, dado esto enfrentan diversos desafíos que afectan la entrega de mercancías [20]. Uno de los problemas más comunes es la falta de puntualidad, lo que puede generar pérdidas en la demanda, como se puede observar en una la encuesta mensual del comercio (EMC) del mes de mayo realizada por el DANE las ventas reales del comercio minorista disminuyeron 1,7% y el personal ocupado decreció 0,7% en relación con el mismo mes de 2023. Excluyendo el comercio de combustibles, la variación de las ventas reales del sector fue de -1,3% [21], como se observa en la figura 1.

Figura 1. Variación anual, año corrido y doce meses de las ventas reales y el personal ocupado.

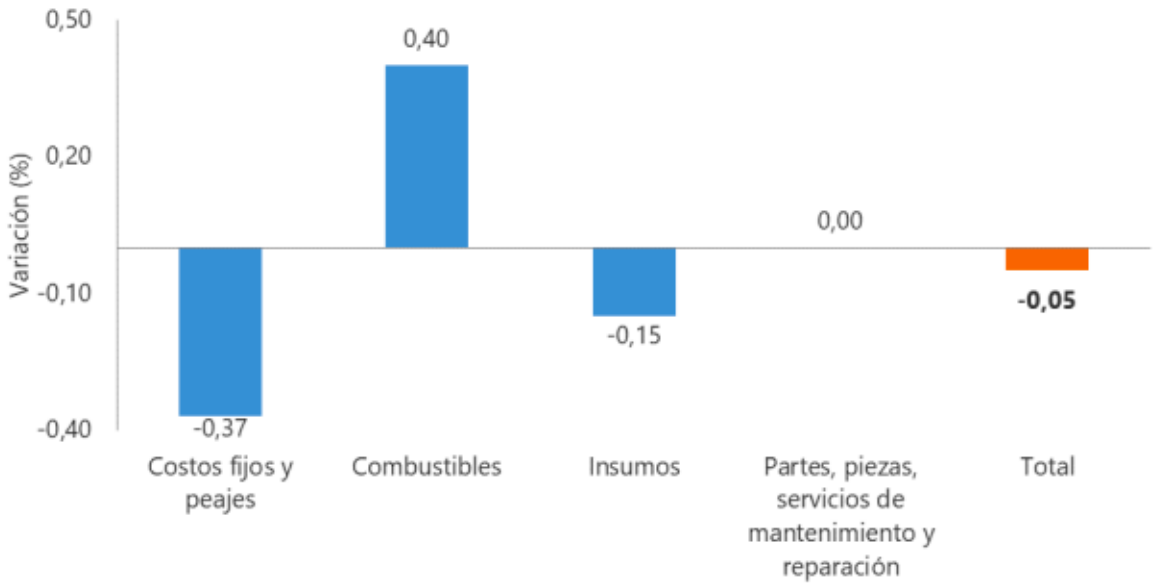


Fuente: DANE, EMC.[21]

Otro de los desafíos que enfrentan es la variación mensual del índice de costos de transportes por carretera (ICTC) en mayo de 2024, la variación mensual del ICTC fue -0,05%, en comparación con abril de 2024, se registró que el mayor aporte a la variación mensual fue en el grupo de costos fijos y peajes, el cual aportó -0,18 puntos porcentuales [22], (Véase figura 2). En este sentido, el desafío radica en minimizar los costos operativos, que incluyen gastos de combustible, mantenimiento de vehículos y mano de obra, al tiempo que se garantice la entrega puntual de los productos. La gestión eficaz de las rutas de vehículos desempeña un papel esencial

en el logro de estos objetivos para garantizar la entrega eficiente de productos a las tiendas minoristas en entornos urbanos en constante crecimiento, en donde de igual manera influye negativamente la infraestructura del centro de la ciudad, por lo que se debe determinar rutas óptimas a los vehículos de distribución, ya que para entregar productos lo hacen en múltiples ubicaciones de tiendas minoristas generando retrasos en las entregas el cual aumenta los costos operativos en donde influye el cambio en el ICTC, con respecto a los grupos de costos de combustible, partes, piezas, servicios de mantenimiento y reparación.

Figura 2. Variación mensual del ICTC, según grupos de costos.



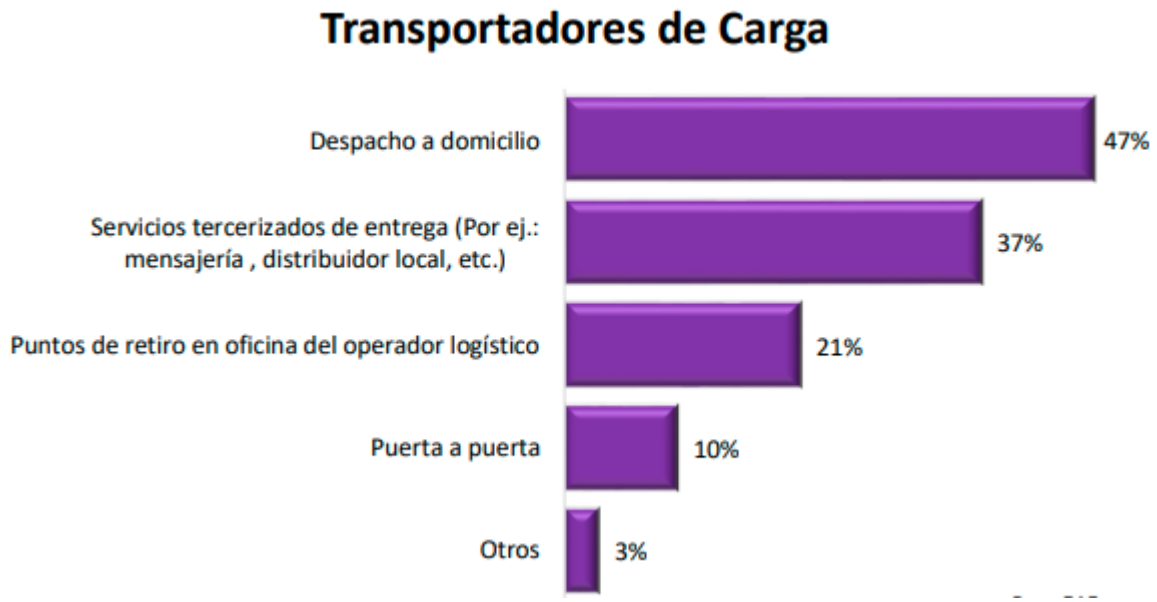
Fuente: DANE, ICTC. [22]

El crecimiento de las zonas urbanas está directamente relacionado con el aumento del comercio, lo que a su vez implica un incremento en las entregas de mercancías. “Los transportes de carga tienen condiciones y especificaciones muy precisas en cuanto a las zonas donde pueden estacionarse y esperar; al igual que los canales de flujo específicos, es necesario monitorear en qué paradas y bajo qué circunstancias se están realizando los descansos para evitar cualquier tipo de accidente que perjudique a la mercancía y al conductor” [23]. En la actualidad, la agenda de los gobiernos municipales latinoamericanos es, en esencia, una agenda de desarrollo urbano. La concentración poblacional en centros urbanos, que ya es significativa en la región (90%) y se intensificará en las próximas décadas [24], subraya la importancia estratégica de la movilidad urbana para impulsar la productividad económica.

Respecto a las empresas de transporte de carga, el 47% ofrece entregas a domicilio, el 37% ofrece la entrega a través de servicios tercerizados, que también

implican entregas a domicilio, el 21% ofrece el servicio en puntos de retiro en oficina y el 10% manifiesta que presta el servicio puerta a puerta, que también implica la entrega a domicilio [25] (figura 3). Por lo general las empresas transportadoras utilizan camiones de carga para la entrega de mercancía que habitualmente es entregada a domicilio en cada uno de los comercios, arriesgándose al aumento tanto de retrasos con la entrega de la mercancía como el aumento en los costos de transporte.

Figura 3. Tipos de entrega de transporte.



Fuente: Min Tic, 2021. [25]

La intensa actividad de carga y descarga de camiones es la principal causa de la congestión vehicular, al igual que del obstaculamiento peatonal [26]. El incremento en la actividad comercial y el volumen de mercancías ha llevado a una creciente presión sobre la infraestructura vial urbana, lo que afecta no solo a la movilidad de los vehículos de carga, sino también al tráfico en general. Debido a las presiones de la congestión del tráfico y los problemas de contaminación del aire, muchas ciudades han implementado medidas estrictas para restringir el acceso de los camiones a muchas zonas durante períodos de tiempo específicos [27], la retención del tráfico a menudo resulta en retrasos en la entrega de productos, lo que afecta a las empresas. Por lo general el deterioro de las calles, la saturación en horas pico, pero sobre todo la ausencia de vías o espacios alternos, son factores que no permiten una eficiente entrega de mercancías [28]. Ante esta problemática, resulta imperativo desarrollar un modelo de optimización de rutas que permita mitigar de manera significativa la congestión vehicular en el Centro Histórico de Popayán. Este enfoque busca minimizar los costos operativos y tiempos de entrega, como se mencionó anteriormente, sino también reducir la huella ambiental y mejorar la calidad del entorno urbano. El presente proyecto busca diseñar un modelo

matemático en Google Colab con el fin de garantizar una distribución eficiente de mercancías en el comercio minorista, contribuyendo a mejorar la movilidad urbana **y reducir la huella de carbono del sector.**

1.1.1. Pregunta de investigación

¿Cómo se pueden reducir los costos operativos y tiempos de entrega para la mejora de la eficiencia de los proveedores que abastecen las nano store en el centro histórico de Popayán?

1.2. Justificación

La eficiencia en la distribución y entrega de mercancías enfrentan desafíos que impactan tanto a los comerciantes como a los transportadores de mercancías, generando altos costos y retrasos en la entrega de productos. Utilizando algoritmos de optimización VRP, M. A. Padilla Muñoz [29], desarrollo un modelo de ruteo que redujo significativamente los costos operativos en PRODUALBA. Al minimizar la distancia recorrida en un 26% y los costos por hora en un 16%, se optimizó la eficiencia de la flota y se contribuyó a la sostenibilidad de las operaciones. El Problema de Ruteo de Vehículos, evoluciona desde su formulación inicial, aportando soluciones óptimas y un avance en las distribuciones de los productos. Por tanto, es importante planificar estas operaciones que permita reducir tiempos, costos y generar un valor agregado de competitividad a las empresas, resulta necesario implementar sistemas basados en la tecnología de la información que favorezcan la automatización de estos procesos y recursos [7].

El sistema de ruteo ayuda a disminuir diferentes factores que afectan la movilidad de los principales distribuidores de mercancías al comercio minoristas, La logística ayuda a la optimización de los procesos de distribución. Los autores del artículo “Optimización y su relación con la logística” [15], explican como mediante algoritmos y modelos se puede ayudar a la trazabilidad y efectividad en la distribución de productos, teniendo en cuenta los diferentes factores como el tráfico, puntos de partida y entrega, tiempo de espera y restricciones asociadas al transporte de mercancías, en el cual logran una planificación óptima de las rutas de distribución con el fin de potencializar la logística de última milla con rutas más eficientes.

D. M. Huarcaya Huallullo [30], realiza una propuesta de optimización por medio de algoritmos de packing y modelos de ruteo, ofreciendo soluciones en procesos de abastecimiento de tiendas convencionales manteniendo constituidas 96 estaciones, mediante un modelo matemático proponen un método de distribución, conduciendo a un ahorro del 33% en costos de distribución y reducción en las entregas de mercancías en cada estación, la creación de rutas eficientes no solo optimiza costos y tiempos de entrega, sino que también mejora la satisfacción del cliente y contribuye a un sistema de distribución más sostenible, cumpliendo una serie de restricciones y permitiendo establecer estrategias para realizar una mejor

distribución, lo cual permite a las empresas adaptar estrategias de distribución para cumplir con las demandas del mercado de manera efectiva.

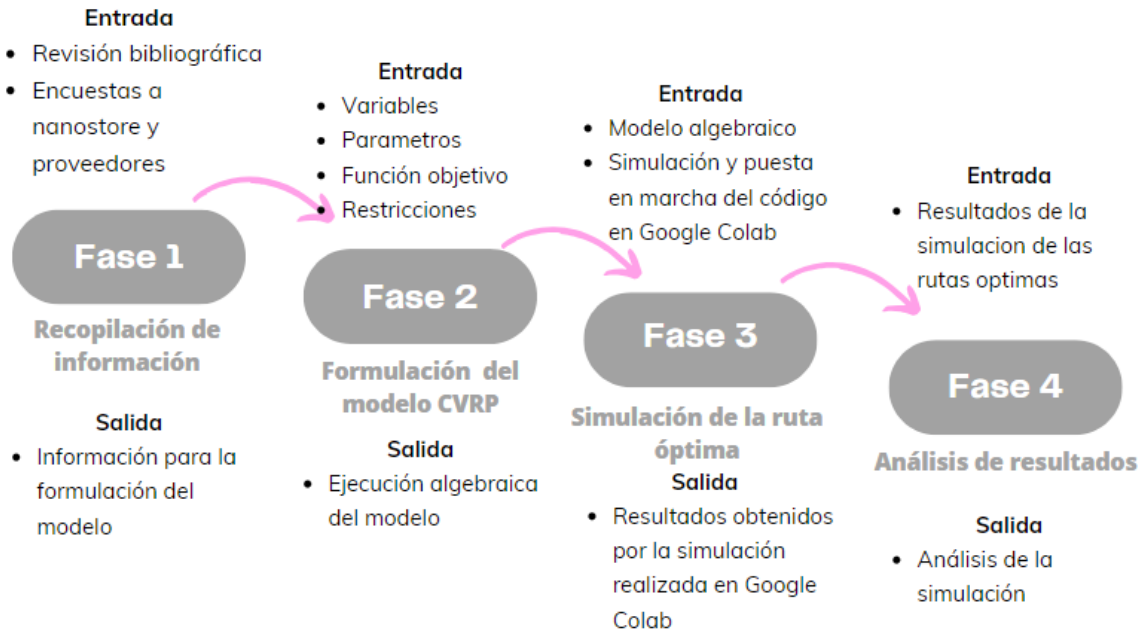
Planificar una ruta adecuada para la distribución de mercancías por medio de simulación es fundamental, Como argumenta S. R. Chopo [31] autor del artículo "Modelos estáticos de localización de instalaciones competitivas", en su estudio en la ciudad de Zaragoza resalta que determinar la solución óptima de los modelos considerados utilizando Gurobi, un software que se integra en Python y permite resolver eficazmente problemas expresados como modelos de programación lineal, la utilidad de los modelos de localización y su capacidad para mejorar la toma de decisiones en distribución, aporta al avance teórico en la literatura logística como a su aplicabilidad en escenarios de distribución reales, aplicaciones prácticas las cuales pueden beneficiar a las empresas y a la investigación futura en la logística**.** El entorno Google Colab es muy sencillo de utilizar y posee buenas prestaciones para la resolución de modelos de optimización que no requieran una extrema capacidad de cómputo, además de cuadernos en la nube que ofrecen acceso gratuito a recursos de cómputo y bibliotecas de Python [32].

1.3. Metodología

El presente trabajo de investigación se lleva a cabo mediante la implementación de un enfoque metodológico mixto. En la primera fase, se realizó un análisis cualitativo mediante la aplicación de encuestas a comerciantes minoristas (nano store) para identificar los desafíos logísticos, las necesidades del sector y sus proveedores. Paralelamente, se lleva a cabo un análisis cuantitativo del contexto logístico, recolectando datos sobre la infraestructura vial, el tráfico y otras variables relevantes. De acuerdo con la información obtenida se desarrolló un modelo matemático de ruteo de vehículos, considerando restricciones, variables y objetivos de los distribuidores. Finalmente, se realizó un análisis cuantitativo de los resultados del modelo, optimizando las rutas de distribución en función de las distancias, capacidades de los vehículos y tiempos de entrega.

Para la implementación de cada enfoque, se deberán considerar las siguientes fases (figura 4), en donde se inicia con una identificación de elementos necesarios para la construcción del modelo, a partir de la aplicación de encuestas a uno de los comercios minoristas que maneja diversos tipos de mercancías y requiere entregas de productos constantemente como las tiendas de barrio (Anexo 1), también se aplican encuestas a los proveedores mayoritarios (Anexo 2), para proceder a realizar el modelo en forma algebraica y luego la validación del código en Gurobi.

Figura 4. Metodología.

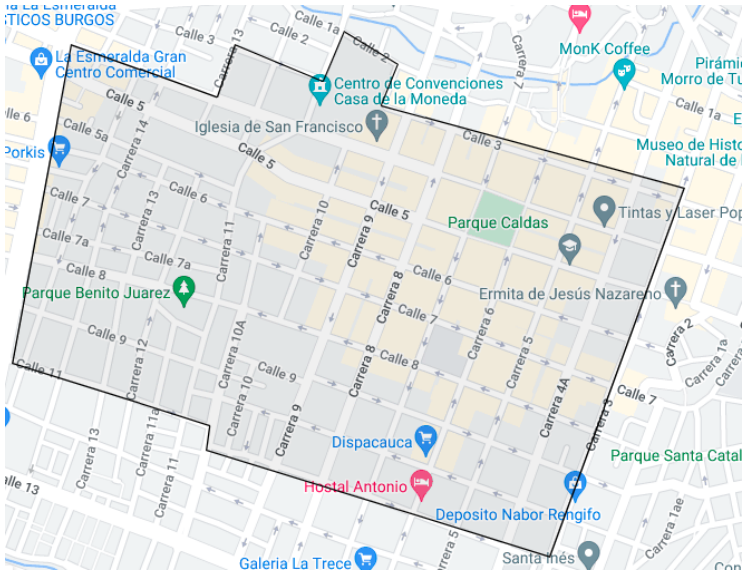


Fuente: Elaboración propia.

Fase I: Recopilación de información

Se realiza la recopilación de información mediante una revisión bibliográfica y posteriormente de datos tomados en el centro histórico de Popayán, delimitados por un mapa de estudio (Figura 5) en donde se observan los límites del área de estudio, en el límite superior se encuentra desde la carrera 17 por la calle 4 hasta la carrera trece en donde se llega a la calle 3 recorriendo dos cuadras para proseguir por la calle 2 hasta llegar a la carrera 10 en donde continua por la calle 3 hasta encontrarse con la carrera 3, en el límite derecho se continúa por la carrera 3 bajando desde la calle 3 hasta la calle 11, para dar inicio a la parte inferior en donde recorre la calle 11 desde la carrera 3 hasta la carrera 17 y finalizando con el límite izquierdo donde se conecta la calle 11 con la calle 4 recorriendo la carrera 17, se elige esta zona ya que existe un amplio comercio de mercancías, dado que esta presenta una alta densidad poblacional, además se presentan desafíos como: tráfico vehicular, vendedores ambulantes, falta de zonas de parqueo, entre otros. En esta área se logra obtener información en 16 tiendas realizando un muestreo por conveniencia, en donde se aplican encuestas a las tiendas cercanas y dispuestas a colaborar en el proyecto, mediante un cuestionario de ocho preguntas de las cuales cuatro de las preguntas son abiertas y cuatro de selección múltiple, donde se logra identificar: nombre de la tienda, tipo de transporte de mercancías, productos rotativos, tiempo de carga y descarga, proveedores, entre otros.

Figura 5. Mapa de estudio, Centro Histórico de la ciudad de Popayán.



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

Para continuar con el estudio se procede a realizar una visita y encuesta a cada una de las empresas (Anexo 2) seleccionadas en el proceso anterior, en donde se identifican diferentes costos operativos, información sobre las posibles limitaciones de cada una de las rutas actuales en la entrega de mercancías, también se destaca la importancia de conocer los tiempos de entrega de mercancías, al igual que diversos aspectos como: capacidad de carga de los vehículos y cantidad de vehículos, horarios de trabajo, entre otros, para llevar a cabo una correcta implementación y funcionalidad del modelo, permitiendo así la validación de cada parámetro y restricción, es fundamental obtener información de calidad de cada uno de los proveedores, ya que es un componente esencial en la preparación para abordar el diseño del modelo.

Fase II: Formulación del modelo VRP

En la formulación del modelo VRP se toma en cuenta la información obtenida por cada una de las empresas Alpina, San Fernando y Productos los Comuneros, con la intención de determinar cada uno de componentes necesarios para la formulación de modelo matemático, aplicando el método óptimo enfocado en un Vehicle Routing Problem (VRP), se debe tener en cuenta una serie de parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones, una vez con estos datos se procede a construir el modelo el cual busca minimizar los tiempos de entrega, logrando un impacto positivo en la satisfacción del cliente, reduciendo costos y optimizando tiempos. Con base en los datos obtenidos se procede a realizar un reconocimiento del VRP óptimo para la solución del problema, se opta por Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), para lograr la obtención de la ruta óptima por cada uno de los proveedores, en donde uno de los modelos elegidos es propuesto por Dornemann [33], el cual muestra la aplicación de una herramienta informática

basada en la teoría de grafos para analizar y resolver un CVRP en una empresa de transporte de carga a nivel nacional, para lograr el ruteo se procede a pasar el modelo CVRP de forma algebraica a código (Anexo 4) el cual se escribe en un lenguaje de programación Python, se implementa el optimizador Gurobi y la herramienta para ejecutar y obtener resultados utilizada es Google Colab, en donde se logra la obtención de las rutas.

Fase III: Simulación de la ruta optima

Para llevar a cabo la simulación de la ruta óptima se basa en el modelo CVRP formulado en la fase anterior, al igual que se requiere de las coordenadas geográficas respectivas por establecimiento tanto de las nano store como de los proveedores elegidos, para poder obtener cada una de las distancias entre los proveedores y los puntos de entrega. A su vez se condicionan costos de transporte, número y capacidad de los vehículos, horarios de operación, entre otros datos obtenidos en la encuesta realizada a los proveedores (Anexo 2). Posteriormente se lleva a cabo la ejecución del código (Anexo 4) enfocado en obtener la ruta óptima, este se realiza mediante el lenguaje de programación de Python en la herramienta de Google Colab, en donde se verifica la eficiencia y viabilidad del modelo VRP propuesto, ya que este proporciona datos críticos como: rutas óptimas, tiempos y costos que influyen la toma de decisiones en la asignación de rutas y la planificación logística de cada proveedor.

Fase IV: Análisis de resultados

En esta fase se realiza un análisis de los resultados obtenidos en la simulación del ruteo óptimo, el cual es crucial para la toma de decisiones, ya que este permite llevar a cabo una evaluación de la eficiencia y viabilidad de los costos y tiempos determinados, al igual que identificar los puntos en los que se están presentando fallas y si se cumple con los requisitos necesarios por cada una de las rutas establecidas. Con base en estos resultados se propone una idea de mejora en donde se realizan diversos ajustes obteniendo así una redistribución de las rutas.

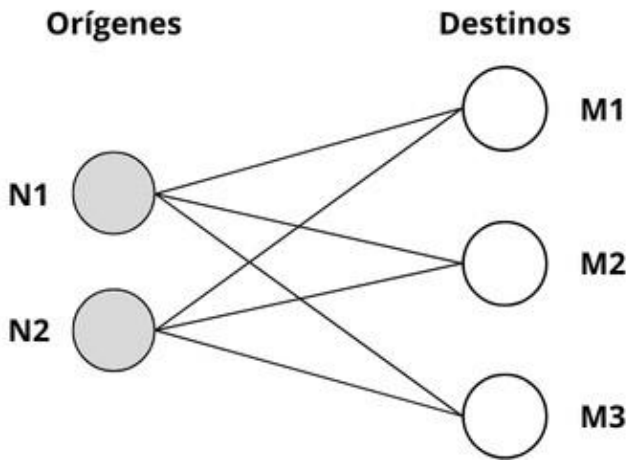
CAPITULO 2

2. Marco teórico y revisión literaria

2.1. Marco teórico

El término “Problema del Transporte” o “VRP” está ligado a la literatura de Investigación de Operaciones como una aplicación para resolver el problema de distribución de carga de una manera más económica, desde la necesidad de llevar unidades de un punto llamado origen, hasta otro punto nombrado destino, dados los costos de transporte, este se puede representar en un modelo lineal [34]. A continuación, se ilustra en la figura 6, un problema con dos orígenes y tres destinos, con el objetivo de encontrar un plan de costo mínimo para distribuir los productos y satisfacer las demandas.

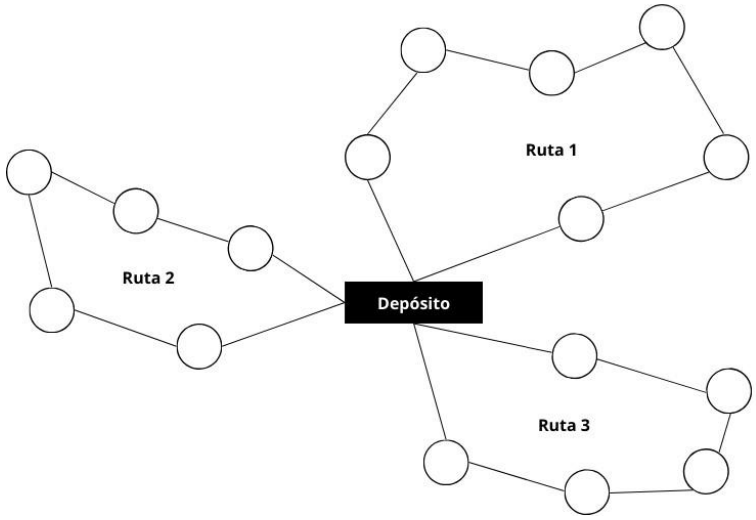
Figura 6. Ejemplo gráfico problema de transporte.



Fuente: El problema del Transporte: Una interpretación del dual. [34]

Se distingue como VRP por sus sigas en el idioma inglés Vehicle Routing Problem, los problemas relacionados con enrutamiento de vehículos, es uno de los problemas más comunes en la optimización de operaciones logísticas, por lo que plantea la búsqueda de soluciones óptimas (rutas óptimas) con diferentes restricciones logrando atender un conjunto de clientes [35]. El VRP consta de unos nodos que se basan en los clientes, los cuales deben ser atendidos por el vehículo y cumplir con las restricciones dadas, aumentando la eficiencia en las operaciones, cumpliendo con la demanda de productos o servicios de los clientes [14]. A continuación, en la figura 7 se observa el esquema de una solución con el VRP, la cual se basa en un proceso de recolección desde diferentes puntos de vista hasta el centro de acopio.

Figura 7. Esquema de una solución VRP.



Fuente: Villanueva, 2023. [14]

Como se puede observar anteriormente se muestra una solución VRP en forma de esquema, pero también se debe llevar a cabo una validación del modelado matemático, para la adaptación del modelo se establecen: variables, parámetros, función objetivo y restricciones, así como también los diferentes requerimientos que se deseen aplicar. Una de las primeras aplicaciones del VRP se dio en el año 1959, en un caso de estudio del proceso de distribución de combustible desde un centro de acopio hasta diferentes estaciones de servicio, al ser uno de los primeros trabajos aborda formalmente el VRP el cual pretendía construir rutas para un conjunto de vehículos que contaban con igual capacidad (flota homogénea), para satisfacer el requerimiento de combustible de una red de clientes recorriendo una distancia total mínima. El VRP con el paso de los años ha incorporado variantes para adaptarse a las particularidades de los casos de estudio [36], a continuación en la tabla 1 se podrán observar las variantes del VRP.

Tabla 1. Tipos de VRP.

Tipo de VRP	Siglas	Descripción
Capacitated Vehicle Routing Problem	(CVRP)	Consiste básicamente en que a cada cliente se le debe enviar cierta cantidad de mercadería, conocida con anticipación, desde un único depósito. Para repartirla se dispone de un determinado número de vehículos con cierta capacidad de transporte, los cuales parten y llegan a un único depósito [37].

Vehicle Routing Problem with Time Windows	(VRPTW)	El objetivo ha sido tradicionalmente reducir al mínimo la flota de vehículos y la suma del tiempo de viaje y el tiempo de espera necesarios para abastecer a todos los clientes en las horas requeridas, pero existen otros enfoques en el que se permiten incumplir ventanas de tiempo (a costa de mejorar en el criterio de optimización principal) [38].
Open Vehicle Routing Problem	(OVRP)	Este problema es una variante del CVRP que se enfoca en el manejo de vehículos externos a la compañía. Por tal motivo, cambia la estructura de costos y la programación dado que en general no se contempla el viaje de regreso [37].
Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem	(HFVRP)	Es una variación del CVRP que considera una flota de vehículos heterogénea. Es decir, con diferentes capacidades y formas para cargas de diferentes tipos, como doble nivel, carga suelta o extra dimensionada entre otras [37].
Multi Depot Vehicle Routing Problem	(MDVRP)	El objetivo del problema es atender a todos los clientes y al mismo tiempo reducir al mínimo el número de vehículos y la distancia de viaje [38].
Vehicle Routing Problem with Backhauls	(VRPB)	Este problema es una generalización del CVRP en la que se permite desarrollar cargas y descargas en las instalaciones de los clientes. Hay dos modalidades, la conocida como VRPB que considera que existen puntos de entrega desde el almacén y otros de recolección hacia el almacén durante el viaje de regreso [38].
Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups	(VRPSDP)	Considera que existen puntos de entrega y otros de recolección hacia el almacén, pudiendo coincidir ambos simultáneamente. En este caso se permite la entrega y la recolección mientras no se viole la capacidad del vehículo [38].
Periodic Vehicle Routing Problem	(PVRP)	Definido como otra variante del CVRP, este problema consiste en permitir que algunos clientes puedan solicitar el servicio en varios momentos durante un período de tiempo [38].
Time Dependent Vehicle Routing Problem	(TDVRP)	objetivo de minimizar el tiempo de las rutas y no el costo de estas que normalmente depende de la distancia recorrida por los vehículos. En un entorno urbano con congestión, las velocidades no son constantes y el tiempo de viaje entre dos

		puntos por lo general no es una función sólo de la distancia recorrida [38].
Vehicle routing problem is stochastic	SVRP	Cuando las demandas en los lugares de entrega (recogida) individuales se comportan como variables aleatorias, y las rutas deben definirse antes de que se conozcan los valores de estas variables aleatorias [38].
Vehicle routing problem with site dependence	SDVRP	Se utiliza una flota heterogénea de vehículos para atender a un conjunto de clientes, pero existen dependencias de compatibilidad entre los emplazamientos de los clientes y los tipos de vehículos [38].
Vehicle routing problem with pick-ups and deliveries	VRPPD	Cuando el producto debe ser movido de una ubicación a otra, y se deben encontrar rutas optimizadas para recoger y entregar el producto en su respectivo lugar de destino [38].
VRP with Satellite Facilities	VRPSF	Cuando es posible, el reabastecimiento por satélite permite a los conductores seguir haciendo entregas hasta el final de su turno sin tener que volver necesariamente al depósito central [38].

Fuente: Adaptado de García [38] .

El VRP cuenta con diversas metodologías de solución, para ser adaptadas a cada caso de estudio, se identifican tres métodos de solución para el VRP, los cuales son:

- **Métodos exactos:** Son aquellos que parten de una formulación como modelos de programación lineal o similar, y llegan a una solución factible gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles [37]. Entre los métodos exactos se destacan los algoritmos de ramificación y acotamiento, muchos de ellos se basan en la relación del problema del agente viajero y VRP [39], este método es eficiente en problemas hasta de 50 depósitos, debido a restricciones de tiempo computacional. Los métodos exactos se pueden clasificar en tres grupos:

  Búsqueda directa de árbol: Los árboles representan las estructuras no-lineales y dinámicas de datos más importantes en computación. Dinámicas, puesto que la estructura del árbol puede cambiar durante la ejecución de un programa. No Lineales, puesto que a cada elemento del árbol pueden seguirle varios elementos [40]. Cada nodo de árbol representa un conjunto de decisiones o variables, lo cual representa un problema original. Es un método de optimización combinatoria donde se aplica directamente la programación lineal.

Programación dinámica: Es un método de optimización que puede aplicarse a diferentes y numerosos problemas, algunos de los cuales ya han sido analizados en programación lineal [41], resolviendo así problemas complejos de optimización logrando la mejor solución entre diferentes conjuntos de redes. Si el algoritmo que se mejora es iterativo, la forma en que la operación del programa se acelera corresponde a "poner a trabajar algún invariante", en contraposición a que sea el programa el que trabaje [42].

Programación lineal y entera: Un problema de programación lineal con la restricción adicional de que algunas de las variables deben tomar valores enteros. Cuando todas las variables deben tomar valores enteros decimos que se trata de un problema de programación lineal entera puro [43]. Así mismo se dice que un problema es de programación lineal entera, cuando prescindiendo de las condiciones de integridad, el problema resultante es un problema de programación lineal [44].

- **Métodos heurísticos:** Las heurísticas son procedimientos que proporcionan soluciones de calidad aceptable mediante una exploración limitada del espacio de búsqueda [45]. Este método se basa en la utilización de reglas empíricas para llegar a una solución. El método heurístico conocido como “IDEAL”, formulado por Bransford y Stein en 1984, incluye cinco pasos: Identificar el problema; definir y presentar el problema; explorar las estrategias viables; avanzar en las estrategias; y por último lograr la solución y volver para evaluar los efectos de las actividades [46], este se utiliza como un recurso para la resolución de problemas de cualquier áreas del conocimiento, enfocado en análisis de la situaciones, diseño de estrategias, aplicación de las mismas y validación de los resultados [47].

- **Métodos Metaheurísticos:** Desarrollados hacia finales de la década de los noventa, se caracterizan por que realizan un procedimiento de búsqueda para encontrar soluciones de aceptable calidad, mediante la aplicación de operadores independientes del dominio que modifican soluciones intermedias guiadas por la idoneidad de su función objetivo [45]. Los metaheurísticos son métodos aproximados diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos, su mayor ventaja está en su gran flexibilidad, lo que permite usarlos para abordar una amplia gama de problemas [48].

Para la solución y simulación de VRP se cuenta con diversas herramientas tecnológicas algunas de ellas son:

- **Google OR Tools:** En una investigación titulada: “Heurísticas y metaheurísticas para resolver problemas de enrutamiento de vehículos capacitados: una comparación de algoritmos” hacen uso de Google OR

Tools, utilizando el lenguaje de programación Python utilizando Google Colab para facilitar el proceso de cálculo [49].

- **Google Colab:** En un estudio titulado “Desarrollo y evaluación de un algoritmo educativo basado en inteligencia artificial para mejorar la enseñanza de la división en estudiantes de secundaria utilizando Python y Google Colab” proponen diseñar, implementar y evaluar algoritmos educativos basados en inteligencia artificial (IA) para mejorar la enseñanza de la operación de división a estudiantes de secundaria, encontrando que la herramienta interactiva en Python y Google Colab demostró ser altamente efectiva, con un enfoque robusto y eficiente [50].
- **GAMS:** En un artículo titulado: “Aplicación de un método heurístico y modelación matemática para el diseño de rutas vehiculares en la empresa Eco Urban SA de la ciudad de Toluca Estado de México” realizan una formulación de ruteo vehicular la cual tiene como objetivo minimizar la distancia total recorrida y sus costos, generando por consiguiente una ruta general integrada por dos rutas obtenidas por el software GAMS [51].

2.2. Antecedentes

Para el presente proyecto se realiza una respectiva investigación de diversos autores, en donde se consideraron diferentes investigaciones desde el año 2020 hasta la actualidad, en donde se utilizaron términos de búsqueda como: Vehicle routin problem, VRP Capacitado, tipos de ruteo, entre otros, los cuales se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 2. Antecedentes.

Titulo	Autores	Tipo de VRP	Aporte	Journal
Un Modelo de Optimización No Lineal para el Problema de Ruteo de Vehículos Multi-Depósito Multi-Proveedor con Ventanas de Tiempo Relajadas	Herman Mawengkang, Muhammad Romi Syahputra, Sutarman Sutarman, Abdullah Salhi.	VRPTW	Su enfoque en la flexibilidad y la eficiencia no solo facilita soluciones más económicas, sino que también permite un mejor manejo de los plazos y riesgos asociados. Esto lo convierte en una herramienta valiosa para optimizar operaciones logísticas	MDPI

			y alcanzar mejores resultados en el rendimiento general [52].	
Solución del problema de enrutamiento de vehículos capacitados con restricciones de carga y reubicación tridimensionales	Jushang Chi shiwei él canción rui	CVRP	Tras un análisis detallado de las limitaciones del antiguo método de reubicación basado en ubicaciones finales, desarrollan un enfoque mejorado que utiliza ubicaciones intermedias. Este nuevo método no solo supera las desventajas del anterior, sino que también permite obtener reubicaciones más precisas, lo que mejora significativamente la efectividad del proceso [33].	ScienceDirect
Ruteo de vehículos con demanda, servicio y tiempos de espera estocásticos: el caso de los problemas de recolección en los bancos de alimentos	Meike Reuske n Gilbert Laport e Sonja Reino Unido Rohmer Frans Cruijss en	CVRP	Este método aborda la planificación de manera estructurada al definir primero el número de distritos y asignar cada cliente a uno específico. Luego, se planifican rutas para cada distrito y, si es necesario, implementan mecanismos de retroalimentación para ajustar decisiones anteriores. Este	ScienceDirect

			enfoque garantiza una mayor precisión y adaptabilidad en el proceso de planificación [53].	
Optimización del problema de enrutamiento de vehículos con capacidad de respuesta con ventanas de entrega, recogida y horarios alternativos: un enfoque híbrido modificado	Paweł Sitek, Jaroslaw Wikarek, Katarzyna Rutczyńska-Wdowiak, Grzegorz Bocewicz, Zbigniew Banaszak.	CVRP, VRPPD, VRPTW	Tener en cuenta los lapsos de tiempo y las restricciones lógicas en el problema incrementa el tiempo de cálculo para todos los métodos de optimización, específicamente, el tiempo requerido aumenta considerablemente a medida que se añade más ventanas de tiempo, lo que resalta la complejidad que estas condiciones introducen en el proceso de optimización [54].	ScienceDirect
Rediseño de rutas de distribución propia de una empresa minorista de productos farmacéuticos.	Canchingre Lara, Alisson Dessire Sánchez Aguilar, Geovanny Alejandro Abad, Jorge Luis, director	VRPTW	Ee rediseñaron las rutas del proceso de distribución utilizando un modelo de ruteo (VRP) que optimiza las rutas a seguir. Esto permite cubrir todos los puntos de venta y reducir los costos de transporte [55].	ESPOL

Análisis de problemas de rutas de vehículos con capacidad	López Brufal, Mónica	VRPTW	Mostrar las rutas y costos de distintas muestras, se facilita la comparación y la selección de la mejor solución para el problema presentado [56].	Esri
Aplicación de un método heurístico y modelación matemática para el diseño de rutas vehiculares en la empresa Eco Urban S.A de la ciudad de Toluca Estado de México	Helmer Paz-Orozco, Flórez-Burbano, Yesica- León-Campo	VRP	Abordar el problema de ruteo vehicular es fundamental no solo para la distribución y recolección de productos, sino también para una amplia gama de desafíos logísticos relacionados con el transporte y la distribución, considerando siempre el costo de productos o servicios [51].	UNAD

Fuente: Elaboración propia.

Los anteriores antecedentes son fundamentales en la investigación, ya que ofrecen una visión amplia de los diferentes tipos y casos de estudio de VRP garantizando un previo conocimiento, además de permitir comprender como se han abordado estos problemas en diferentes contextos.

2.3. Revisión de literatura en VRP

El enrutamiento de vehículos tiene varios obstáculos, generando desde los modelos más sencillos hasta los más complejos, en los que pueden surgir limitaciones [57]. Sin embargo, algunos artículos brindan información para analizar los aspectos fundamentales en la optimización de rutas, proporcionando información sobre cómo las variables, los parámetros y restricciones influyen en las soluciones óptimas en diversos modelos matemáticos. Es por ello por lo que se realizan búsquedas en diferentes bases de datos como: Scient Direct, UNAD, MDPI, entre otras. En un estudio titulado: “Diseño de un modelo matemático para optimizar las rutas de recorrido del proceso de recolección de desechos sólidos para el Cantón Valencia” se realiza la elección del modelo de programación lineal entera, conocida como el problema del vendedor viajero, en donde los puntos de inicio y retorno no necesariamente coinciden, la solución propuesta se ajusta a la realidad y, aunque no implica una disminución sustantiva de los recorridos interurbanos, ya que la escala del problema es muy pequeña, si produce una disminución en los costos de operación del orden del 18.15%, al compararse con la situación actual [58], como

se puede observar, los costos logísticos pueden disminuir un porcentaje a favor de las empresa, y aun así muchas de ellas no realizan un buen estudio de optimización de rutas, lo que afecta negativamente a las empresas en los costos y demás actividades, cabe resaltar que cada caso es diferente y se debe adaptar el estudio de ruteo que mejor se acople a la situación expuesta, como en el anterior caso en donde se basaron en un modelo de programación lineal entera.

Algunos estudios como: Tan y Yeh [59], Niu, Li, y Yi [60], brindan información detallada sobre solución al VRP, en el cual divide los modelos en tres categorías, relacionado con los clientes, los vehículos y los depósitos. Clasificando los algoritmos de solución en algoritmos exactos, heurísticos y metaheurísticos, de acuerdo con esta información se logra obtener literatura relevante para la investigación abordada. En las que se encuentran restricciones las cuales son fundamentales en la ejecución de un modelo matemático y diferentes estudios brindan información que impulsan a detallar cuidadosamente algunas de ellas como en el artículo: “Un algoritmo genético mejorado para el problema de enrutamiento de vehículos con requisitos de ventana de tiempo” presenta una mejora en su capacidad de exploración en entornos de entrega complejos, seleccionando rutas dinámicas para una entrega oportuna.

Por su parte, A. P. Bravo Quispe, C. L. Yupanqui Aguilar, C. V. Cribillero Meza, D. A. Ocharan Rojas, y V. G. Patricio Miranda [61] cuentan con estudios realizados en la universidad de Lima, uno de ellos titulado “Gestión de rutas a través del uso de modelos basados en algoritmos” en donde identifican la importancia que tiene la optimización de las rutas elaboradas para los procesos logísticos y para la cadena de suministros en la actualidad, mediante una revisión de literatura, en donde se puede observar que los modelos con mayor aplicación en la optimización de la gestión y elaboración de rutas son los heurísticos, metaheurísticos, exactos y las metaheurísticas, también se observa un problema de ruteo desarrollado en la Universidad de Colombia el cual es adaptado y va aumentando su complejidad, a continuación en las siguientes ecuaciones se podrá observar el modelo Matemático TSP

$Min: \Sigma\, CijXij \;\; i,j\epsilon v$ [61]

Sujeto a:

$\sum X_{ij} = 1 \forall j \epsilon V_{i\epsilon v}$ [61]

$\sum X_{ij} = 1 \forall i \epsilon V_{j\epsilon v}$ [61]

$i,j\epsilon \mathrm{A}(S,S) \forall S \subseteq FALTA\{n\}, S \neq \emptyset, con\ \mathrm{A(S,S)} = \{(i,\mathrm{j})\epsilon \mathrm{A}: \mathrm{i}\epsilon \mathrm{S}, \mathrm{j}/\epsilon \mathrm{S}\}$ [61]

En las anteriores ecuaciones se presenta una función objetivo, la cual requiere reducir los costos asociados a cada recorrido, y unas restricciones las cuales han considerado: que cada punto de entrega será visitado y se partirá de él una única vez [61].

Por lo cual adaptan qué modelo que trabaje múltiples unidades de transporte y mantenga la función objetivo inicial, de manera que se logra obtener las siguientes restricciones:

1. $\sum_k \sum_j X^{\,k}_{ij} = 1$ [61]

2. $\sum_i X^{\,k}_{i,n+\tilde{n}+1} = 1$ [61]

3. $\sum_i X^{\,k}_{i,n+\tilde{n}+1} = 1$ [61]

4. $\sum_i X^{\,k}_{i,j} - \sum_i X^{\,k}_{j,i} = 0$ [61]

5. $X^{K}_{(i,j)} = 1 \rightarrow B^{k}_{j} \geq B^{k}_{i} + S_{ik} + t_{ijk}$ [61]

6. $X^{k}_{i,j} = 1 \rightarrow \varphi^{k}_{j} \geq \varphi^{k}_{i} + d_j$ [61]

7. $Max\ \{0, d\} \leq \varphi^{k}_{i} \leq \min\{\beta_{k'}\beta_k + d_i\}$ [61]

8. $\varphi^{k}_{0} = -\sum_i d_j \sum_i X^{k}_{i,j}$ [61]

9. $e_i \leq B^{k}_{i} \leq \tau i$ [61]

10. $B^{k}_{v+1} - B^{k}_{0} \leq T^{k}$ [61]

En las anteriores ecuaciones se consideran diez restricciones como lo son:

1. Se llega a cada destino solo una vez.
2. Todos los vehículos realizan su recorrido partiendo de un solo punto de inicio.
3. Todas las unidades hacen un recorrido y llegan al punto de inicio.
4. Ningún vehículo permanece estático.
5. Si el vehículo recorre el nodo (i, j) el tiempo de inicio en j es mayor que el inicio en
6. i más la duración del servicio en i más el tiempo de recorrido (i, j)
7. Si el vehículo viaja de i a j entonces la carga de salida de j es mayor que la carga de
8. salida de i más la carga de recogida en j
9. La cantidad de salida está entre el máximo valor de cero y la carga φi y el mínimo valor de la máxima capacidad y la máxima capacidad más la carga φi
10. La carga inicial del vehículo es igual a la cantidad total que debe entregar [61].

Por lo que se concluye que los modelos para la optimización de rutas son beneficiosos tanto para las organizaciones, como para los clientes, ya que este tiene como objetivo reducir los costos, logrando una reducción en el precio de venta final, sin embargo, se debe tener en cuenta el cumplimiento de los requerimientos de la empresa en la programación y diseño de las rutas.

CAPITULO 3

3. Identificación de componentes críticos y recolección de datos

3.1. Zona de estudio

Durante el proceso de optimización se encuentran parámetros importantes, como la ubicación geográfica de Popayán a una altitud de 1.738 metros sobre el nivel del mar, msnm, con una temperatura media de 19° C, se localiza a los 2°27' norte y 76°37'18" de longitud oeste del meridiano de Greenwich. La población estimada es de 270.000 habitantes aproximadamente en su área urbana [62], en la siguiente figura se visualiza la ubicación geográfica de Popayán.

Figura 8. Ubicación geográfica de Popayán.

Fuente: Colombia S.A. [63].

El proceso de determinar rutas cuenta con diferentes puntos claves como lo son: rutas con múltiples paradas y enrutamiento dinámico debido a las condiciones cambiantes (el tráfico, cambios climáticos, entre otros) [64]. En Popayán estos factores influyen de manera significativa en la logística urbana en el momento de la entrega pertinente de mercancías en las nanostore, el centro histórico cuenta con una infraestructura vial poco adecuada debido a sus calles estrechas, adicionando que existen varios vendedores ambulantes, lo cual dificulta la entrega de mercancías en los diferentes comercios, ya que, puede incluir vehículos de diferentes capacidades, lo cual influye el tiempo necesario para cubrir una ruta específica, afectada por el tráfico, la calidad de las vías y las paradas obligatorias. Es importante entender cómo estos factores se interrelacionan y cómo los investigadores han abordado estas complejidades mediante la formulación de

modelos VRP, para así llevar la ejecución de modelos que sean aplicables al mundo real, como este caso que se asocia a la entrega de mercancías en el centro histórico de Popayán, donde la dinámica de los factores externos e internos pueden variar significativamente.

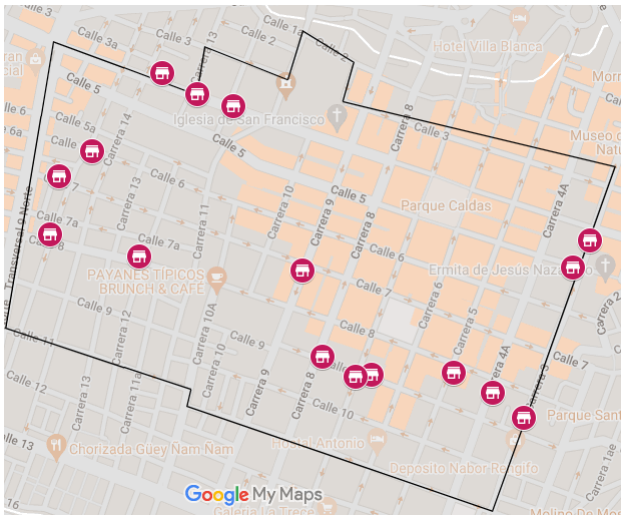
Para que la solución del modelo matemático se valide, se debe cumplir con ciertas condiciones como los son: restricciones que se presentan en el centro histórico de Popayán como la capacidad de los vehículos y tiempo en entrega de mercancía acorde a las ventanas de tiempo [33], horarios disponibles tanto para proveedores como el comercio minorista, sobre la longitud total o tiempo máximo que una ruta puede tener. “Las restricciones son limitaciones o condiciones que el modelo debe cumplir. Se descubrió que los altos costos operativos se componen en un 67,4% de los costos asociados al consumo de combustible (34,2%), la reprogramación de rutas (18,4%), y de la mano de obra (14,8%), al igual que se detectó que el 93% de los problemas que afectan a los costos operativos se originan por la falta de capacitación del personal, una planificación inadecuada de rutas y la falta de cumplimiento de estas” [65]. Se debe tener en cuenta los costos de transporte de acuerdo con los factores que influyen, estos están basados entre las distancias de cada proveedor y las nanostore.

Se aceptan distintos tipos de vehículos (flota heterogénea) con un tamaño de flota limitado, y vehículos que pueden asignarse a diferentes depósitos (multi-depósito). Un vehículo puede utilizarse en múltiples ocasiones (multi-recorrido), y es posible asignar varios vehículos a una misma ruta (entrega dividida) [66]. Este enfoque ofrece mayor flexibilidad y adaptabilidad al modelo, permitiendo un ajuste a las realidades operativas presentadas en la distribución de mercancías en el comercio minorista y aumentando su mejora para generar soluciones prácticas y eficientes en la gestión de rutas de transporte.

3.2. Identificación Nano Stores

El centro histórico de Popayán cuenta con diversos tipos de comercios formales e informales, de acuerdo con su gran de variedad de productos que manejan nos centramos en las tiendas de barrio (NanoStore), en cual se identificaron 16 establecimientos en la comuna 6, mediante un muestreo por conveniencia, en donde se aplican encuestas a las tiendas cercanas y dispuestas a colaborar en el proyecto, asimismo se identificó la ubicación (revisar figura 10), visualizando así la distancia de tienda a tienda, y las posibles rutas que deben llevar a cabo para la entrega de los productos.

Figura 9.Ubicación de Nano store



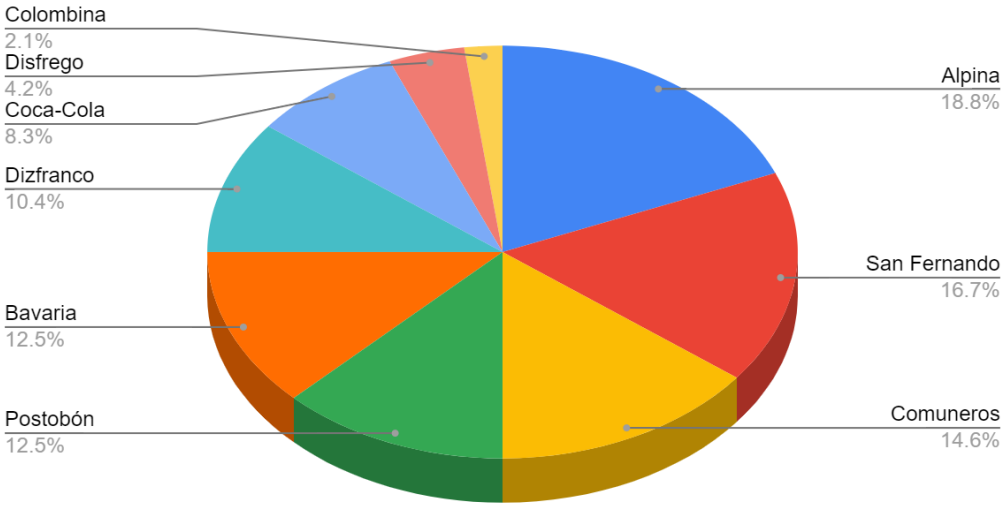
Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Encuestas a nano store

Es importante conocer diversos factores logísticos que se pueden presentar al recibir los productos, por medio de encuestas (Anexo 1) a diferentes comercios se logra identificar información detallada con el objetivo de recolectar datos importantes permitiendo conocer detalles sobre la frecuencia de entrega, horarios en los cuales pueden recibir su mercancía, el tipo de transporte que utilizan los proveedores que los surte. Además, los aspectos logísticos revelaron información valiosa sobre los principales proveedores que los abastecen, identificando marcas de los productos con gran demanda, por ende, la relación que se tiene entre tenderos y proveedores, de acuerdo con esta información se busca mejorar la eficiencia de la cadena de suministro en estas áreas, se logró obtener información de 16 nodos presentes en el centro histórico del municipio de Popayán Cauca.

A continuación, en la figura 10 se identifica cada porcentaje de los proveedores, reconociendo en total de nueve proveedores, los tres más comunes fueron: Alpina (18,8%), San Fernando (16,7%) y Los Comuneros (14,6%).

Figura 10. Proveedores nano store.



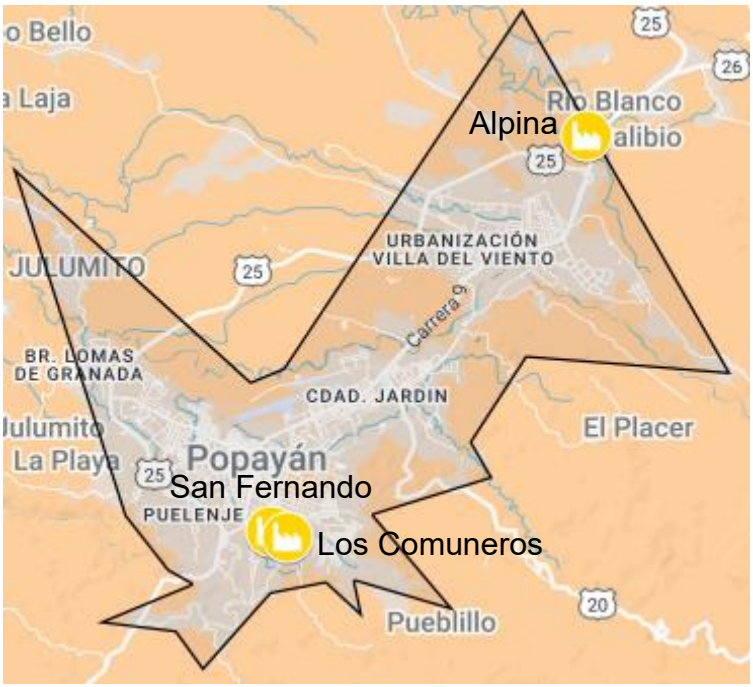
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Identificación Proveedores

Una vez obtenida la información del nano store se procede a analizar y elegir los tres proveedores más mencionados, entre los cuales se encontraron: Alpina, San Fernando y los Comuneros, como se observa en la figura 11 en donde se visualiza el porcentaje y los demás proveedores mencionados como: Postobón, Bavaria, Dizfranco, entre otros. Por lo que se procede a realizar la encuesta (Anexo 2) a los siguientes proveedores: Alpina, San Fernando y Comuneros.

A continuación, en la figura 11 se logra apreciar las ubicaciones de los proveedores en el mapa y se contempla que dos de ellos están en el lado sur y otro en el extremo del norte.

Figura 11. Ubicaciones proveedores.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. Encuestas a proveedores

Proveedor 1 (Alpina)

Alpina es una empresa multinacional colombiana productora de alimentos a base de lácteos, la cual tiene más de 70 años. Tiene operación en cuatro paises Colombia, Ecuador, Venezuela y Estados Unidos, además comercializa sus productos en América Central [67]. En la ciudad de Popayán una de sus sedes se encuentra ubicada en el parque industrial, desde donde realiza la distribución de pedidos hacia los diferentes sitios de la ciudad. Las decisiones sobre la distribución de mercancías a nivel nacional se centralizan en Bogotá, desde donde se gestionan las operaciones de las diversas sedes de producción [67], a continuación, se observan seis sedes de la empresa (figura 12), entre las cuales se encuentran:

1. Chinchiná
2. Galapa
3. Caloto
4. Sopó
5. Entrerríos
6. Facatativá

Figura 12. Sedes Alpina.

Fuente: Alpina,2024. [67].

Alpina cuenta con diversas líneas, una en donde ofrecen gran variedad de productos como lo son: Quesos, leche, arequipe, cremas esparcibles, avenas, postres, línea de origen vegetal, bebidas y jugos, snacks, arepas, yogurt y bebidas lácteas, en la segunda línea cuenta con productos de Zenú y por último cuenta con productos solidos o en seco, donde cuentan con un bloque multimarca, algunos de los productos son: familia, polar, entre otros [67].

Proveedor 2 (San Fernando – Alival)

San Fernando es una empresa que hace parte de Alival la cual tiene presencia desde el año 1981, brindando alimentos sanos, bebidas deliciosas y productos lácteos de alta calidad, la cual cuenta con una amplia cobertura en Colombia [68], como se observa en la figura 13. San Fernando cuenta con diferentes sedes alrededor del País, más sin embargo en Popayán solo se encuentra ubicada una bodega de distribución de productos situada en el Deán bajo.

Figura 13. Sedes San Fernando.

Fuente: Alival, 2024. [68]

San Fernando (Alival) brinda a la comunidad diversos productos como lo son: leche, yogurt, cremas y esparcibles, avena, quesos, entre otros, estos pertenecen a los productos lácteos, por lo que se observa que alpina y San Fernando distribuyen mercancía similar, pero aun así el comercio es variado con el gusto de las personas.

Proveedor 3 (Los Comuneros)

La empresa los Comuneros es una de las pocas que ha logrado establecerse y mantenerse en Popayán, lleva casi 25 años en el mercado de manera prolongada, ofrece diferentes tipos de productos como: papas, picadas, patacón, madurito, chicharrón, patacón limón, algunos de los productos los venden en tamaño yumbo, medio y mini. La fábrica de productos Comuneros está ubicada en Popayán, en el barrio los Comuneros, de donde viene el nombre, y aunque no tienen un peso o forma para dar competencia contra las grandes marcas de productos comestibles nacionales y transnacionales se encuentran en el mercado y día a día por todos los medios con publicidad y manejo del diseño, por lo que logra alcanzar un impacto positivo [69].

De cada proveedor se logró obtener información sobre los diferentes problemas logísticos que enfrentan en la entrega de mercancías, en especial en el centro de la ciudad de Popayán, algunos de los problemas que se encontraron fueron:

- Pedidos fuera de ruta
- Alto nivel de tráfico en el sector histórico
- Pico y Placa

- Demora en los pagos
- Reprogramación de pedidos
- Falta de zonas de parqueo para los transportadores de las mercancías
- Productos en mal estado, debido a que tienen que ser transportados desde calles anteriores al nano store

A demás de los problemas logísticos presentados, también se obtuvo información como: Manejo de la tasa de vencidos y productos no conformes, sistema de ruteo, gestión de incidencias en la entrega de pedidos, entre otras, las cuales serán presentadas a continuación en la siguiente tabla 3:

Tabla 3. Información recolectada por proveedor.

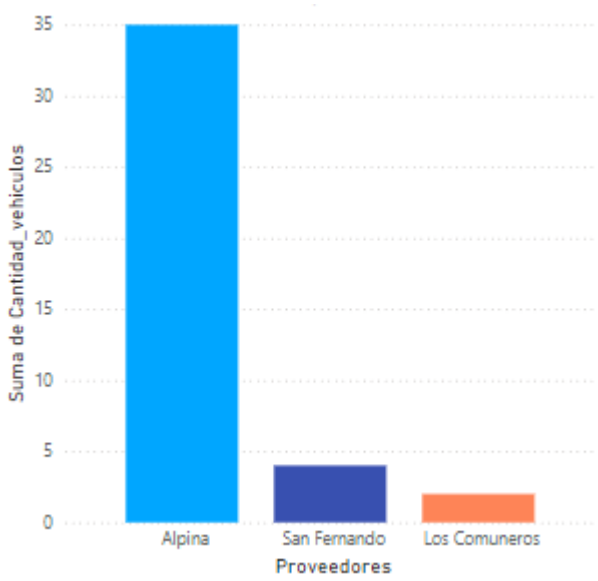
	Proveedores		
	Alpina	**San Fernando**	**Los Comuneros**
Sistema de ruteo	Sistema de coordenadas, cada asesor cuenta con una ruta la cual es planillada y el conductor se encarga de enrutar, una vez obtenida la ruta pasa el lineamiento y se anota la información en el ARP, cabe resaltar que las rutas están establecidas desde Bogotá	El sistema de ruteo que manejan lo llaman ruteros, se maneja con una plataforma para la entrega de los pedidos, asignan cada transporte por ruta de acuerdo con las ventas	El sistema que utilizan para entregar los pedidos es una entrega por días, lo que quiere decir que tienen un día para distribuir en cada zona acorde a los pedidos, cabe resaltar que en el centro se distribuye todos los días
Sistema de gestión de órdenes de compra	Software de gestión empresarial de SAP	STONE ERP	No cuentan con un software establecido
Manejo de la tasa de vencidos y productos no conformes	Los productos vencidos se reconocen al 1,5% del valor de la compra, la calidad no tiene tope, reciben, verifican y devuelven el producto	Se lleva a cabo un control de calidad, las rutas de carga realizan el cambio de los productos vencidos	Se lleva el producto a la empresa y se procede a realizar un registro, se apunta el motivo de vencimiento o si presenta mala calidad, el producto se recibe una semana antes de vencerse

Gestión de incidencias en la entrega de pedidos	Cuentan con vehículos alternos los cuales dan soporte	Se puede presentar algún inconveniente en caso de que la tienda esté cerrada, por lo que en este caso se habla con la persona encargada y se acuerda el día y la hora de la entrega	Establecen un horario para la entrega de mercancías en cada tienda

Fuente: Elaboración propia.

También se logran obtener datos como el número de vehículos por empresa, los cuales se verán reflejados en la siguiente figura:

Figura 14. Cantidad de vehículos por proveedor.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 14 se puede observar la cantidad de vehículos por empresa, en donde se analiza que la empresa con mayor número de vehículos es alpina, en donde cuenta con 35 vehículos disponibles, de los cuales trabajan 15 para entregas en la ciudad y 20 fuera de ella, seguido de San Fernando el cual cuenta con 4 vehículos, los cuales hacen la entrega de pedidos solo en la ciudad de Popayán, finalmente Los Comuneros cuenta con 2 vehículos, los cuales son propios, para la distribución en la ciudad, cabe resaltar que Los comuneros a comparación de las anteriores empresas cuenta con una extensión menor en la comercialización y distribución de productos, ya que está catalogado como una microempresa. Se prosigue con la tabla 4, la cual cuenta con imágenes de los vehículos y la capacidad de estos, Alpina

y San Fernando por ser empresas de gran escala cuentan con vehículos de mayor capacidad como se puede observar, Los Comuneros por el contrario cuenta con un vehículo de una tonelada.

Tabla 4. Tipos de vehículos y su capacidad.

Tipo de vehículo	Imagen	Capacidad
Furgón		2 toneladas
Chana		1 tonelada

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO 4

4. Formulación del modelo CVRP

4.1. 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, donde $\{P, T, K\}$ está representado por un conjunto de nodos (Proveedores, Nano store y Vehículos) a través de variables de decisión Xp, 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)

4.2. Formulación

4.2.1. Conjuntos

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

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

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

4.2.2. 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.

4.2.3. 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.

4.2.4. 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}).

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

Donde:

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

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

4.2.5. Restricciones

4.2.5.1. 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.

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

4.2.5.2. 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.

$$\sum_{p}\sum_{k} y_{p,t,k} = D_{p,t}, \qquad \forall t \qquad (4)$$

4.2.5.3. 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.

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

4.2.5.4. 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.

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

4.2.5.5. 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 $+1$, asegurando que no se asignen más de un vehículo a una ruta.

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

4.2.5.6. 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.

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

4.2.5.7. 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.

$$\sum_{p}\sum_{k} x_{p,t,k} = 1, \qquad \forall t \qquad (9)$$

4.2.5.8. 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 vehiculo sigue la ruta, en caso contrario es igual a 0

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

4.2.5.9. 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.

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

CAPITULO 5

5. Resultados

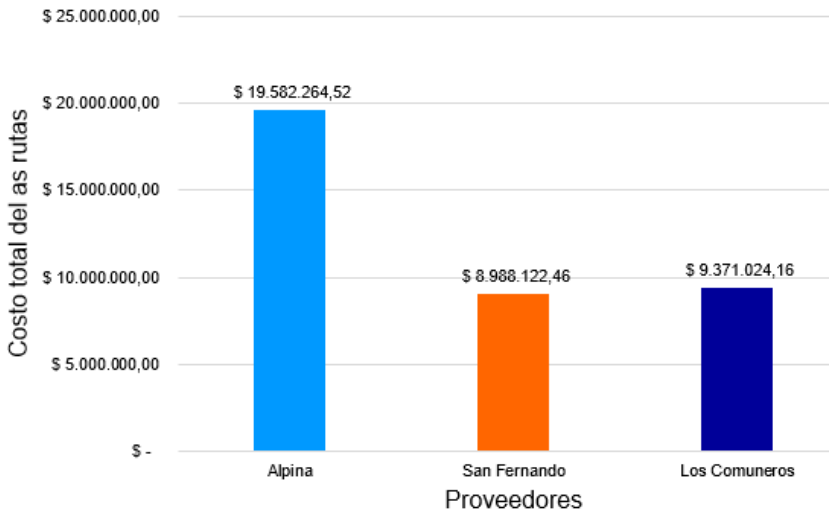
5.1. Simulación de la ruta optima

Con la obtención del CVRP se logra realizar un código el cual debe cumplir con diversos requisitos para obtener una ruta optima, todo esto realiza un enlace al momento de realizar el código, ya que se deben tener en cuenta ciertos parámetros y restricciones ya establecidos anteriormente en el CVRP para que el código sea simulado correctamente y no se genere errores en el momento que sea ejecutado.

La simulación del modelo (Anexo 4) se llevó a cabo en Google Colab, el cual se identifica por ser un servicio alojado de Jupyter Notebook que no requiere configuración y ofrece acceso sin coste económico a recursos de computación, como GPUs y TPUs, mediante este servicio se simula el modelo original y el modelo optimizado, basándose en las correcciones realizadas con ayuda de la IA, la cual genera el código a partir de lenguaje natural y un bot de chat basado en los modelos de asistencia de programación más avanzados de Google en forma de código [17], cabe resaltar que no es 100% confiable, por lo que se debe revisar y acoplar el modelo acorde a lo propuesto. También se hizo uso del software Gurobi Optimization el cual es un solucionador el cual trabaja mediante lenguajes como: Python, AIMMS y R [16], para este caso se adecua el uso del lenguaje Python. Gurobi proporciona dos algoritmos principales para resolver modelos continuos y las relajaciones continuas de modelos enteros mixtos como lo son: barrera y simplex, en donde el método simplex suele ser menos sensible a las cuestiones numéricas en comparación del algoritmo de barrera ya que además de ser más rápido para el uso de grandes modelos, es más sensible numéricamente [70].

A continuación, en la figura 15 se podrán observar los costos por cada ruta simulados, en donde se encuentra un valor total por los tres proveedores de $ 37.941.411,14, siendo Alpina el proveedor con mayores costos de transporte ($ 19.582.264,52), debido a que sus rutas a comparación de los Comuneros y San Fernando son más extensas.

Figura 15. Costos simulados.



Fuente: Elaboración propia.

Como se logró observar los costos son altos, por lo que se pretende minimizarlos realizando una ruta por vehículo, para no generar altos costos en el transporte, se lleva a cabo un reconocimiento del gasto aproximado por cada transporte en donde se incluyen diversos costos como: Mano de obra, combustible, mantenimiento, depreciación y kilómetro recorrido (Tabla 5), teniendo en cuenta los kilómetros recorridos aproximadamente en el centro histórico de Popayán, para proseguir en la elaboración del código optimo.

Tabla 5. Costos por km recorrido.

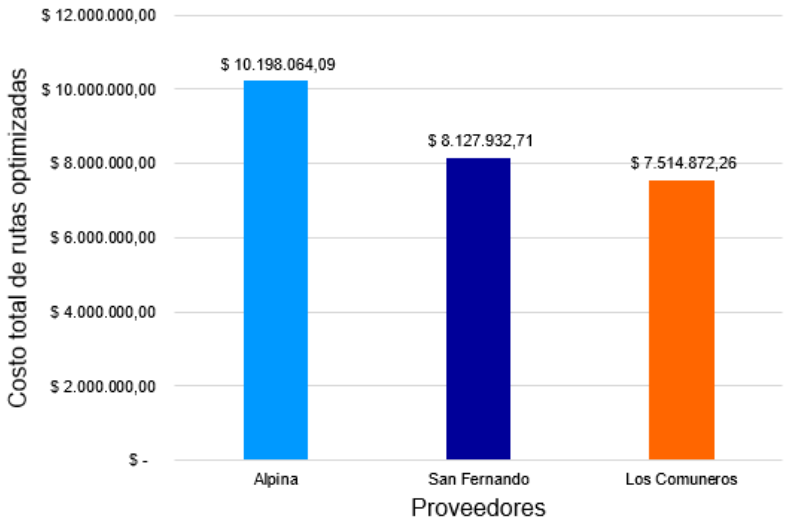
	Variable	Unidades	Costo
Alpina	Costo Mano de obra	$/semana	$ 263.720
	Costo de combustible	$/semana	$ 167.475
	Costo de mantenimiento	$/semana	$ 125.000
	Costo de depreciación (20 años)	$/semana	$ 63.461
	Es el costo por kilómetro recorrido	$/kilómetro	$ 1.595
	Total, costos		$ 621.251
San Fernando	Costo Mano de obra	$/semana	$ 263.720
	Costo de combustible	$/semana	$ 51.787
	Costo de mantenimiento	$/semana	$ 125.000
	Costo de depreciación (20 años)	$/semana	$ 63.461
	Es el costo por kilómetro recorrido	$/kilómetro	$ 1.595

	Total, costos		$ 505.563
Productos Los Comuneros	Costo Mano de obra	$/semana	$ 263.720
	Costo de combustible	$/semana	$ 62.197
	Costo de mantenimiento	$/semana	$ 110.000
	Costo de depreciación (20 años)	$/semana	$ 28.846
	Es el costo por kilómetro recorrido	$/kilómetro	$ 1.913
	Total, costos		$ 466.676

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los datos obtenidos por las empresas se logra realizar una optimización y obtener una reducción aproximadamente del 31,89%, en donde se obtuvo un costo total de las rutas por los tres proveedores de $25.840.869,06. A continuación en la figura 16 se logran observar los costos de transporte optimizados acorde al nuevo modelo.

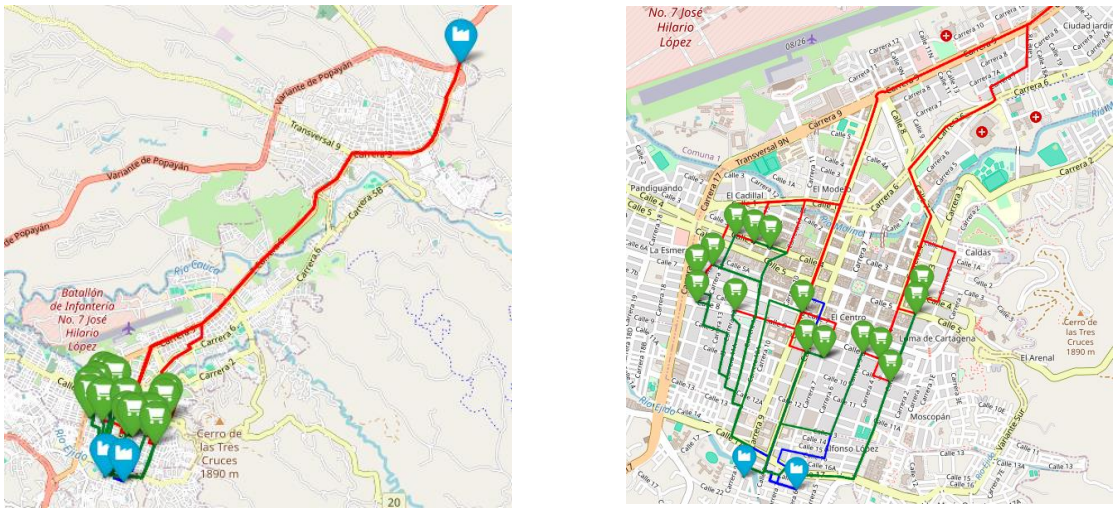
Figura 16. Costos optimizados.



Fuente propia.

En la simulación (Anexo 4) realizada también se obtuvo el mapa del ruteo optimizado, en donde se observan las rutas que debe realizar cada proveedor, se logró establecer un mapa con los tres proveedores en la figura 17, donde se contempla de manera completa las rutas (a) y de forma ampliada (b) en donde se alcanza a observar las rutas con una mejor visión de las tiendas en la zona estudiada de Popayán, también se proponen tres mapas indicando las rutas por cada proveedor, en donde realiza el recorrido por cada una del nano store distribuyendo la mercancía. Cabe resaltar que todo el recorrido se realiza teniendo en cuenta el sentido de las vías de las calles de Popayán.

Figura 17. Mapa rutas optimizadas.

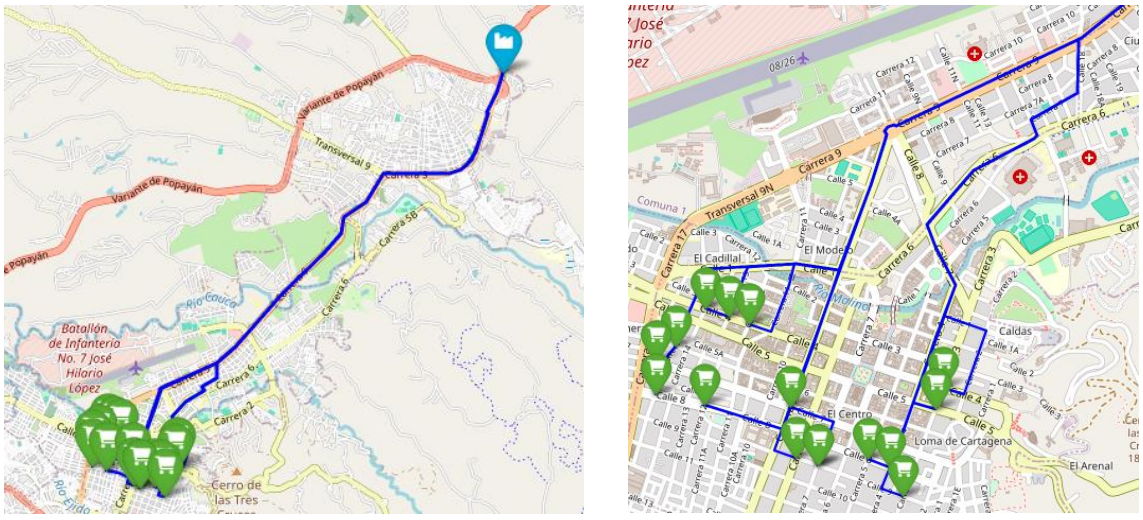


(a) (b)

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

Con base a la figura 17 se simulan cada una de las rutas individualmente, como se muestra en las figuras 18,19 y 20 se presentan los mapas de cada una de las rutas de Alpina, San Fernando y Los Comuneros respectivamente.

Figura 18. Ruteo Alpina.

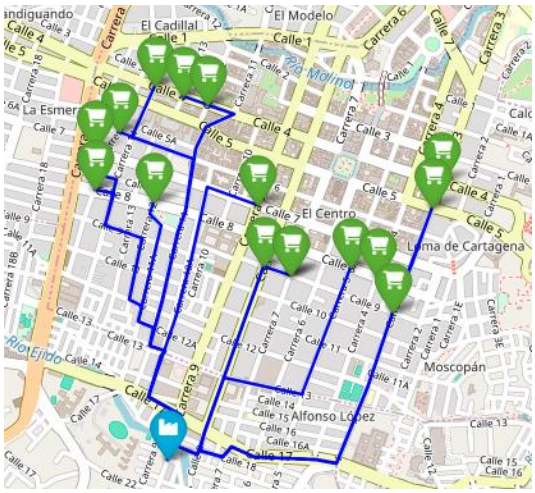


(a) (b)

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

En la figura 18 presentada anteriormente se visualizan dos partes, la (a) en donde se observa la ruta completa desde la empresa Alpina hasta el centro histórico y la (b) en donde se observa a detalle el recorrido de distribución en el nano store del centro histórico de Popayán, cae resaltar que aplicando la ruta tiene una reducción del 47,96%. A continuación, en la figura 19 se observa el recorrido de las rutas de entrega de mercancías de San Fernando hacia el sector del centro histórico con una reducción de los costos del 9,57% en comparación con los costos reales.

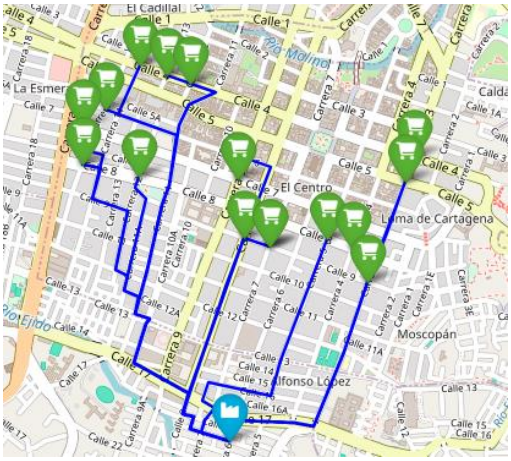
Figura 19. Ruteo San Fernando.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 20 ilustra el ruteo optimizado de la microempresa productos los Comuneros, en donde se minimizan los costos en un porcentaje del 19,81% en comparación con los costos reales.

Figura 20. Ruteo Los Comuneros.



Fuente: Elaboración propia.

5.2. Análisis de resultados

Como se puede observar en las figuras anteriores, los ruteos se realizan con el fin de que cada uno de los proveedores puedan surtir todo el nano store, ya que cada uno maneja diversos productos, los cuales son fundamentales para la venta diaria. Adicionalmente con los ruteos optimizados se podrán realizar entregas de una manera más eficiente disminuyendo los tiempos de entrega y, en consecuencia, el tiempo de trabajo en la distribución de mercancías en la zona del centro histórico de Popayán, a continuación, en la tabla 6 se podrán observar cada uno de los tiempos optimizados para cada una de las rutas y entregas.

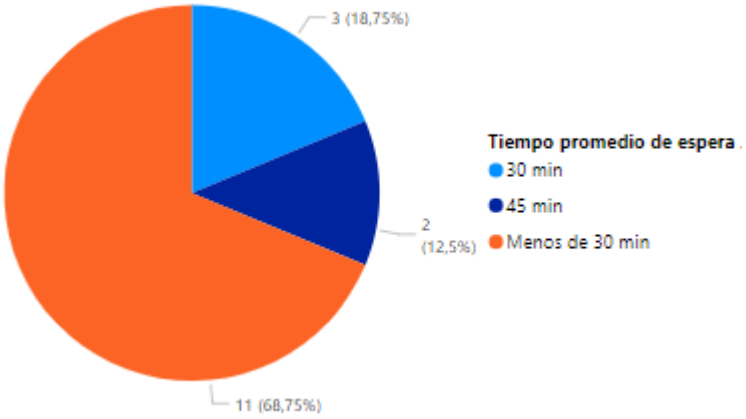
Tabla 6. Tiempos optimizados.

Tiempo de las rutas (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.

De acuerdo con la simulación del modelo se observa que los tiempos de entrega optimizados presentan una gran mejoría en comparación a los tiempos de entrega reales en el nano store, ayudando en la mejoría de la distribución de mercancías, todo esto dado por una entrega optima y eficaz, evitando retrasos en las rutas, ya que muchos de los comerciantes en las encuestas (Anexo 2) realizadas opinaban que las entregas se podían retrasa y tomar más tiempo a la hora del descargue de mercancías. A continuación, se observa en la figura 21 el promedio de espera en la entrega de mercancías, en donde se observa que el mayor tiempo es menos de 30 minutos con un 68,75%, más sin embargo muchos comerciantes establecían que se demoraban más de 20 minutos en la entrega de los pedidos.

Figura 21. Tiempo promedio de entrega - descarga de mercancías.



Fuente: Elaboración propia.

Al disminuir los tiempos de entrega ayuda en la reducción de los costos implicados en la logística de la entrega de mercancías, por lo que se ve un impacto positivo en la reducción de costos, generando una reducción de los costos del 31,89% por las rutas de los tres proveedores, a continuación, en la tabla 7 se podrán observar cada uno de los costos totales simulados y optimizados, al igual que la cantidad reducida en porcentaje.

Tabla 7. Comparativa de costos.

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

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se puede observar que las reducciones de costos por proveedor son relevantes principalmente en Alpina la cual cuenta con una reducción mayor en comparación a San Fernando y Los Comuneros, las reducciones evidencian un alto potencial de mejora en las operaciones, aunque todos los proveedores muestran avances importantes, el impacto varía según la eficiencia previa de sus procesos logísticos y sus ubicaciones, ya que Alpina por ser una empresa cuya ubicación se encuentra en una zona distante del centro histórico, aumentan los costos de gasolina y demás, mientras que por el contrario Los Comuneros y San Fernando se encuentran relativamente cerca al centro histórico, por lo que los costos serán menores.

CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

Conclusiones

- Los datos obtenidos en las encuestas (Anexo 1) fueron analizados visualmente, permitiendo identificar los tiempos de carga y descarga, la ubicación de las Nano Stores y sus principales proveedores, así como la frecuencia con la que entregan su mercancía, de igual manera en las encuestas (Anexo 2) se recopiló información sobre los sistemas de rutas para entregar su mercancía, la capacidad y cantidad adecuada para cada vehículo, tasas de vencidos, productos no conformes, y costos de transporte, lo cual son fundamentales para la creación del modelo matemático y simulación (Anexo 3), logrando determinar los elementos claves para realizar la optimización.

- Los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo CVRP establecieron 8 parámetros determinando los valores conocidos, 3 variables entre las cuales se encuentra una de manera binaria, la cual indica 1 si el proveedor debe seguir la ruta y 0 si debe interrumpir esta ruta por diferentes factores, se determinaron 9 restricciones, este modelo demuestra una mejora significativa en la eficiencia de las rutas de distribución, reduciendo los costos operativos y los tiempos de entrega. La inclusión de una variable binaria para la interrupción de rutas ha permitido una mayor flexibilidad en la planificación, adaptándose a imprevistos y optimizando el uso de los recursos.

- En la modelación matemática del CVRP obtenida, se determinan diversas restricciones a considerar para llevar a cabo la ruta más adecuada, en las cuales se incluyen: la capacidad de los vehículos, el tiempo máximo de entrega de mercancías y la asignación de rutas que optimicen tanto la reducción de costo como el tiempo de entrega, al considerar cada una de las restricciones se desarrolla un modelo el cual permite la distribución de manera efectiva y eficiente de los productos, por lo que se obtiene una reducción de los costos por cada proveedor del 47,96% para Alpina, 9,57% para San Fernando y 19,81% para Productos los Comuneros, con un total para los tres proveedores de un 31,89% de reducción en los costos de transporte.

- La utilización de Google Colab en conjunto con Gurobi ha proporcionado un entorno de desarrollo accesible y manejable para la implementación y validación del modelo matemático. Esta combinación ha facilitado la optimización de rutas de manera eficiente, permitiendo generar mapas de 16

rutas personalizados (Figuras 18, 19 y 20) y determinar los tiempos de entrega óptimos (Tabla 6).

Investigaciones futuras

- Incrementar el tamaño de la muestra de estudio en el comercio para el desarrollo de estrategias y políticas públicas de optimización de la distribución de mercancías de última milla acorde a los distribuidores, facilitando así el reparto de mercancías.

- Como trabajos futuros, es importante realizar un estudio en medidas para reducir la huella de carbono que produce el transporte de mercancías, debido a que generan gases de efecto invernadero de acuerdo con las rutas de reparto, a causa de la quema de combustible y por la tanto producen CO2, aumentado el cambio climático y contaminando la atmósfera.

- Para una distribución ágil, se considera la posibilidad de realizar un estudio para la construcción de una bodega en la zona del centro histórico de Popayán, ya que esto favorece en la entrega de productos de una manera organizada y eficiente, debido a que hay gran demanda de comercio minorista, desarrollar esta investigación para una minimización de costos en diferentes comercios y logren la entrega en el tiempo adecuado logrando la satisfacción del cliente final.

- Replicar el modelo en otras ciudades con características similares, validando su efectividad en diferentes contextos urbanos y demográficos, teniendo en cuenta los ajustes requeridos para adaptarlo a las restricciones de cada zona, lo cual contribuirá un impacto positivo en la sostenibilidad, al optimizar el uso de recursos y reducir las emisiones asociadas al transporte urbano.

ANEXOS

Anexo 1. Encuesta a Nano store.

En el primer anexo se encuentra la encuesta que se le realizo al nano store del centro histórico de Popayán, esta consta de nueve preguntas, de las cuales cinco son preguntas abiertas y cuatro de opción múltiple.

Anexo 1.Encuesta a nano store.

<table>
<tr><th colspan="4">ENCUESTA NANO STORE (TIENDAS DE BARRIO)</th></tr>
<tr><td colspan="4">Buenas, somos estudiantes de la Corporación Universitaria Comfacauca, estamos realizando una encuesta con fines academicos, para la realizacion de un proyecto en base a la distribución de mercancias en el comercio minorista del centro de Popayán (tiendas) el cual busca tener informacion para optimizar la red bajo modelos matematicos, obteniendo asi un beneficio en cuanto a los costos y el tiempo de transporte en la ciudad, por lo que agradecemos su colaboración.</td></tr>
<tr><td colspan="2">1. Coordenada del establecimiento (Google MAPS).</td><td colspan="2">7. ¿Por qué medio de transporte realizan el envio de mercancias a su tienda?</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">2. Nombre de la tienda.</td><td>Camión</td><td>Piaggio</td></tr>
<tr><td>Van</td><td>Otro:</td></tr>
<tr><td colspan="2">3. ¿Cuáles son los tres proveedores mayoritarios?</td><td colspan="2">8. Desde que realiza el pedido de su mercancía ¿Cuanto tiempo demora en llegar a su establecimiento?</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">4. ¿Cuáles son los tres productos más rotativos?</td><td>Menor a un día</td><td>De 1 a 3 días</td></tr>
<tr><td>De 4 a 6 días</td><td>De 6 a 8 días</td></tr>
<tr><td>Más de 9 días</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">5. ¿En qué horario generalmente se realiza la entrega de los productos?</td><td colspan="2">8. En promedio, ¿cuántos productos vende al mes en la tienda?</td></tr>
<tr><td colspan="2">6. ¿Cuantas veces al mes surte los productos mas rotativos de su tienda?</td><td>De 0 a 99 productos</td><td>De 100 a 300 productos</td></tr>
<tr><td colspan="2">Una vez al mes</td><td>De 301 a 600 productos</td><td>De 601 a 999 productos</td></tr>
<tr><td colspan="2">Dos veces al mes</td><td>Más de 1000</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Tres veces o más</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="4">9. ¿Cuál es el tiempo promedio de espera en las operaciones de carga y descarga?</td></tr>
<tr><td>Menos de 30 min.</td><td>30 min.</td><td>45 min.</td><td>Más de 60 min.</td></tr>
</table>

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Entrevistas a proveedores.

La encuesta (Anexo 2) se realiza una vez identificados los tres principales proveedores en el centro histórico de la ciudad de Popayán, cabe resaltar que se realiza una visita a cada una de las empresas correspondientes para la obtención de la información.

Anexo 2. Encuesta a proveedores.

ENCUESTA PROVEEDORES (ALPINA, SAN FERNANDO Y LOS COMUNEROS)
1. Coordenadas y nombre de la empresa.
2. ¿Con que sistema cuentan para las órdenes de compra?
3. ¿Qué sistema de ruteo utilizan?
4. ¿Qué problemas de ruteo presentan?
5. En promedio, ¿Cuánto es el valor de los costos de transporte?
6. ¿Cuál es el tiempo promedio en la entrega de los productos una vez realizado el pedido?
7. ¿Cuántos vehículos tienen disponibles para la entrega de mercancía y cuál es su máxima capacidad?
8. ¿Cómo manejan la tasa de vencidos y productos no conformes?
9. ¿Cómo logran optimizar sus rutas de entrega?
10. ¿Qué medidas toman en caso de retrasos o problemas en la entrega?

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Evidencia fotográfica visita empresas.

En el anexo 3 se presenta la evidencia fotográfica correspondiente a las visitas en las empresas, en donde se realizó la encuesta con los colaboradores correspondientes.

Anexo 3. Evidencia fotográfica.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Código

Se presenta el código utilizado en la ejecución de: la ruta, los tiempo y mapas, presentados en el transcurso del documento.

```
%pip install gurobipy

!pip install osmnx

import osmnx as ox # Make sure to import the osmnx module

import networkx as nx # Make sure to import the networkx module

import matplotlib.pyplot as plt

import folium
```

```
# Coordenadas de proveedores y tiendas
coordenadas_proveedores = {
    'Alpina': (2.50012, -76.55883),
    'Los Comuneros': (2.43123, -76.60954),
    'San Fernando': (2.43225, -76.6123)
}

coordenadas_tiendas = [
    (2.44392, -76.61083), (2.44419, -76.61162), (2.44296, -76.61387),
    (2.44243, -76.61456), (2.44118, -76.61476), (2.44071, -76.61284),
    (2.44041, -76.60935), (2.4378, -76.60528), (2.43727, -76.60462),
    (2.43823, -76.60612), (2.43819, -76.60788), (2.43815, -76.60823),
    (2.43857, -76.60892), (2.44047, -76.60356), (2.44105, -76.60321),
    (2.44464, -76.61235)
]

# Capacidades de los vehículos
capacidades = {
    'Alpina': 3,
    'Los Comuneros': 1,
    'San Fernando': 3
}

# Costos de transporte por proveedor (en pesos)
costos_transporte = {
    'Alpina': 621251,
    'Los Comuneros': 466676,
    'San Fernando': 505563
}

# Costo por hora de trabajo (en pesos)
```

```
costo_hora = {
    'Alpina': 6593,
    'Los Comuneros': 6593,
    'San Fernando': 6593
}

# Costo de combustible por kilómetro (en pesos)
costo_combustible_km = {
    'Alpina': 1595,
    'Los Comuneros': 1913 ,
    'San Fernando': 1595
}

# Cantidad de vehículos por proveedor
cantidad_vehiculos = {
    'Alpina': 15,
    'Los Comuneros': 2,
    'San Fernando': 4
}

# Velocidad promedio de entrega (km/h)
velocidad_entrega = 50

# Tiempo máximo de entrega (horas)
tiempo_maximo_entrega = 8

# Define el área de interés: Popayán
place_name = "Popayán, Colombia"

# Descargar el grafo de la red vial de la zona
G = ox.graph_from_place(place_name, network_type='drive')
```

```
# Convertir las coordenadas a nodos en el grafo
nodos_proveedores = {p: ox.distance.nearest_nodes(G, coord[1], coord[0]) for p, coord in coordenadas_proveedores.items()}
nodos_tiendas = [ox.distance.nearest_nodes(G, coord[1], coord[0]) for coord in coordenadas_tiendas]


# Calcular las rutas óptimas desde cada proveedor a todas las tiendas
rutas = {} # Reinitialize the 'rutas' dictionary
for proveedor, nodo_proveedor in nodos_proveedores.items():
    rutas[proveedor] = []
    for nodo_tienda in nodos_tiendas:
        ruta = nx.shortest_path(G, nodo_proveedor, nodo_tienda, weight='length')
        rutas[proveedor].append(ruta)


# Calcular el costo total de cada ruta
costos_rutas = {}
for proveedor, rutas_proveedor in rutas.items():
    costos_rutas[proveedor] = []
    for ruta in rutas_proveedor:
        # Get the length of each edge in the route as numeric values
        longitudes_aristas = [G[u][v][0].get('length', 0) for u, v in zip(ruta[:-1], ruta[1:])]
        distancia_ruta = sum(longitudes_aristas) # Sum the lengths to get the total distance


        # Calcular el tiempo de entrega en horas
        tiempo_entrega = distancia_ruta / (velocidad_entrega * 1000) # Convertir km a metros


        # Calcular el costo de combustible
        costo_combustible = distancia_ruta * costo_combustible_km[proveedor] / 1000 # Convertir metros a km
```

```
        # Calcular el costo de mano de obra
        costo_mano_obra = tiempo_entrega * costo_hora[proveedor]

        # Calcular el costo total de la ruta
        costo_total = costos_transporte[proveedor] + costo_combustible
+ costo_mano_obra

        # Agregar el costo total a la lista de costos para el proveedor
actual
        costos_rutas[proveedor].append(costo_total)

# Imprimir los costos de las rutas para cada proveedor
for proveedor, costos in costos_rutas.items():
    print(f"Costos de las rutas para {proveedor}:")
    for i, costo in enumerate(costos):
        print(f"  Ruta {i+1}: ${costo:,.2f}")



# Crear una figura y un eje
fig, ax = ox.plot_graph(G, figsize=(10, 10), show=False, close=False)

# Iterar sobre los proveedores y sus rutas
for proveedor, rutas_proveedor in rutas.items():
    # Obtener el color para el proveedor (puedes personalizar esto)
    color = {'Alpina': 'red', 'Los Comuneros': 'blue', 'San Fernando':
'green'}.get(proveedor, 'black')

    # Iterar sobre las rutas del proveedor
    for ruta in rutas_proveedor:
        # Obtener las coordenadas de los nodos en la ruta
        nodos_ruta = [G.nodes[nodo] for nodo in ruta]
```

```
        coordenadas_ruta = [(nodo['x'], nodo['y']) for nodo in
nodos_ruta]

        # Dibujar la ruta en el mapa
        x, y = zip(*coordenadas_ruta)
        ax.plot(x, y, color=color, linewidth=1, label=proveedor)

# Mostrar la leyenda (opcional)
ax.legend()

# Mostrar el mapa
plt.show()

# Define el centro del mapa en Popayán
mapa_popayan = folium.Map(location=[2.44, -76.61], zoom_start=13)

# Iterar sobre los proveedores y sus rutas
for proveedor, rutas_proveedor in rutas.items():
    # Obtener el color para el proveedor
    color = {'Alpina': 'red', 'Los Comuneros': 'blue', 'San Fernando':
'green'}.get(proveedor, 'black')

    # Iterar sobre las rutas del proveedor
    for ruta in rutas_proveedor:
        # Obtener las coordenadas de los nodos en la ruta
        nodos_ruta = [G.nodes[nodo] for nodo in ruta]
        coordenadas_ruta = [(nodo['y'], nodo['x']) for nodo in
nodos_ruta] # Invertir latitud y longitud para folium

        # Dibujar la ruta en el mapa
        folium.PolyLine(locations=coordenadas_ruta,       color=color,
weight=2.5, opacity=1).add_to(mapa_popayan)
```

```
# Agregar marcadores para proveedores y tiendas
for proveedor, nodo_proveedor in nodos_proveedores.items():
    folium.Marker(
        location=[G.nodes[nodo_proveedor]['y'],
G.nodes[nodo_proveedor]['x']], # Invertir latitud y longitud
        popup=proveedor,
        icon=folium.Icon(color='blue', icon='industry', prefix='fa')
    ).add_to(mapa_popayan)

for nodo_tienda in nodos_tiendas:
    folium.Marker(
        location=[G.nodes[nodo_tienda]['y'],
G.nodes[nodo_tienda]['x']], # Invertir latitud y longitud
        popup='Tienda',
        icon=folium.Icon(color='green',          icon='shopping-cart',
prefix='fa')
    ).add_to(mapa_popayan)

# Mostrar el mapa
mapa_popayan
```

A continuación, se presenta el código utilizado para la simulación de los tiempos por ruta.

```
# Calcular las rutas óptimas desde cada proveedor a todas las tiendas
rutas = {} # Reinitialize the 'rutas' dictionary
for proveedor, nodo_proveedor in nodos_proveedores.items():
    rutas[proveedor] = []
    for nodo_tienda in nodos_tiendas:
        ruta   =   nx.shortest_path(G,   nodo_proveedor,   nodo_tienda,
weight='length')
        rutas[proveedor].append(ruta)

# Calcular el tiempo total de cada ruta
tiempos_rutas = {}
```

```
for proveedor, rutas_proveedor in rutas.items():
    tiempos_rutas[proveedor] = []
    for ruta in rutas_proveedor:
        # Get the length of each edge in the route as numeric values
        longitudes_aristas = [G[u][v][0].get('length', 0) for u, v in zip(ruta[:-1], ruta[1:])]
        distancia_ruta = sum(longitudes_aristas) # Sum the lengths to get the total distance

        # Calcular el tiempo de entrega en horas
        tiempo_entrega = distancia_ruta / (velocidad_entrega * 1000)  # Convertir km a metros

        # Agregar el tiempo total a la lista de tiempos para el proveedor actual
        tiempos_rutas[proveedor].append(tiempo_entrega)

# Imprimir los tiempos de las rutas para cada proveedor
for proveedor, tiempos in tiempos_rutas.items():
    print(f"Tiempos de las rutas para {proveedor}:")
    for i, tiempo in enumerate(tiempos):
        print(f"  Ruta {i+1}: {tiempo:.2f} horas")
```

REFERENCIAS

[1] «Sapigiuc - EL PAPEL DE LOS HUBS URBANOS PARA UNA DISTRIBUCION URBANA DE MERCANCIAS SOSTENIBLE ANT....pdf». Accedido: 2 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/199179/Sapigiuc%20-%20EL%20PAPEL%20DE%20LOS%20HUBS%20URBANOS%20PARA%20UNA%20DISTRIBUCION%20URBANA%20DE%20MERCANCIAS%20SOSTENIBLE%20ANT....pdf?sequence=1&isAllowed=y

[2] C. M. G. Zuluaga, G. M. Osorno, J. D. S. Mosquera, y J. C. U. Fontal, «LOGÍSTICA URBANA Y POLÍTICAS PÚBLICAS MODELADA DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS: UN ENFOQUE GENERAL USANDO ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO», *Semest. Económico*, vol. 25, n.º 59, Art. n.º 59, 2022, doi: 10.22395/seec.v25n59a3.

[3] «El DNP reveló que el costo logístico nacional se ubicó en 17,9%, 5 p.p. por encima de la meta de 12,9%». Accedido: 10 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dnp.gov.co/Prensa_/Noticias/Paginas/el-dnp-revelo-que-el-costo-logistico-nacional-se-ubico-en-17-9-5-p-p-por-encima-de-la-meta-de-12-9.aspx

[4] «Los retos del sector logístico para el 2024, según Analdex y Fitac | Industrias | Negocios | Portafolio». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.portafolio.co/negocios/industrias/los-retos-del-sector-logistico-para-el-2024-segun-analdex-y-fitac-596528

[5] J. Garcia-Pajoy, N. Paz Ruiz, M. Chong, y A. Luna, «Utilising PLS-SEM and Km2 Methodology in Urban Logistics Analysis: A Case Study on Popayan, Colombia», *Sustainability*, vol. 15, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2023, doi: 10.3390/su151712976.

[6] «DANE - Encuesta Anual de Comercio (EAC)». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/index.php/component/content/article/46-encuesta-anual-de-comercio-eac?Itemid=123&phpMyAdmin=3om27vamm65hhkhrtgc8rrn2g4

[7] W. A. Fontalvo Delgado, «Sistema Inteligente de Ruteo». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uniandes.edu.co/flip/?pdf=/bitstreams/cd631b87-90f4-472c-b1b3-87ea72184fc0/download

[8] «Rutas de reparto: ¿Qué son y cómo funcionan?» Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.netlogistik.com/es/blog/que-son-las-rutas-de-reparto

[9] N. B. Perico, «Tenderos de barrio: un pilar importante para la economía local», El Tiempo. Accedido: 31 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en:

https://www.eltiempo.com/economia/por-que-los-tenderos-son-un-pilar-fundamental-para-la-economia-de-los-barrios-803351

[10] «¿Cuánto crecieron las ventas de las tiendas de barrio en el primer semestre de 2024?», Portafolio.co. Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.portafolio.co/negocios/comercio/cuanto-crecieron-las-ventas-de-las-tiendas-de-barrio-de-colombia-en-el-primer-semestre-de-2024-609827

[11] «Adaptación de las tiendas de barrio en Colombia ante impuestos - AmericaRetail & Malls». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://america-retail.com/paises/colombia/adaptacion-de-las-tiendas-de-barrio-en-colombia-ante-impuestos/

[12] «Planificación de rutas de reparto». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://driv.in/planificacion-de-rutas-de-reparto-guia

[13] J. O. Moyano Albarracin y F. F. Taborda Aislant, «Aplicación de los modelos matemáticos y estadísticos en la cadena de suministro», *Application of mathematical and statistical models in the supply chain*, jul. 2024, Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/29600

[14] «Mejora de la recolección de residuos sólidos municipales en la ciudad de Tayabamba mediante la aplicación del modelo VRP». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.esan.edu.pe/server/api/core/bitstreams/28f62aaf-00e5-4d3b-8e3e-739a63a605ce/content

[15] J. del C. Peralta-Abarca, P. M. Bernal, F. de J. B. Sánchez, y J. A. H. Aguilar, «Optimización y su relación con la logística», *Inventio*, pp. 1-8, jun. 2024, doi: 10.30973/inventio/2024.20.50/7.

[16] «Gurobi Optimizer», Gurobi Optimization. Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.gurobi.com/faqs/gurobi-optimizer/

[17] «Google Colab». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://research.google.com/colaboratory/intl/es/faq.html

[18] A. Velázquez, «¿Qué es la investigación operativa?», QuestionPro. Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-operativa/

[19] «Extension_de_un_sistema_de_validacion_automatica_para_modelos_de_VRP.pdf». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://accesoabierto.uh.cu/files/original/2177065/Extension_de_un_sistema_de_validacion_automatica_para_modelos_de_VRP.pdf

[20] «Optimización de Rutas de Entrega: Claves para una Logística Efectiva». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.nomadia-group.com/es/recursos/blog/optimizacion-de-rutas-de-entrega-claves-para-una-logistica-efectiva/

[21] «Encuesta Mensual de Comercio (EMC) Mayo 2024». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/operaciones/EMC/bol-EMC-may2024.pdf

[22] «Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC) Mayo 2024». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/operaciones/ICTC/bol-ICTC-may2024.pdf

[23] admin, «¿Cuáles son las medidas de seguridad en la carga de contenedores?», South Express Perú. Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.southexpress.pe/cuales-son-las-medidas-de-seguridad-en-la-carga-de-contenedores/

[24] «Movilidad urbana, la importancia de tener un plan para satisfacer las necesidades de las personas». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/grgroup/docs/web_revista_mye-91

[25] «Estudio Sobre Logística Última Milla». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://observatorioecommerce.mintic.gov.co/797/articles-198595_recurso_1.pdf

[26] R. Guarnizo y H. Augusto, «Logística de distribución capilar empleada en la entrega de mercancías por transportadores de carga en Girardot», Thesis, 2019. Accedido: 3 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6486

[27] W. Ying Ying, W. Rong Yu, y Z. Yu Jun, «Cooperative Truck–Drone Delivery Path Optimization under Urban Traffic Restriction». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.mdpi.com/2504-446X/7/1/59

[28] T. Fadul y K. María, «Estrategias de sostenibilidad para la Distribución Urbana de Mercancías en Santo Domingo (República Dominicana). Diagnóstico de la situación actual y propuestas de mejora.», nov. 2021, Accedido: 3 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/handle/10251/175885

[29] M. A. Padilla Muñoz, «Optimización matemática basada en el modelo de ruteo de vehículos para mejorar la distribución de los productos de la Compañía Limitada PRODUALBA, ubicada en el cantón Pallatanga.», jul. 2023, Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/19553

[30] D. M. Huarcaya Huallullo, «Propuesta de optimización en el abastecimiento de tiendas de conveniencia utilizando algoritmos de packing y ruteo de vehículos»,

sep. 2023, Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/26045

[31] S. R. Chopo, «Modelos estáticos de localización de instalaciones competitivas. Una aplicación».

[32] «Azocar - Planificacion y tecnicas de mejora de planes para smart cities.pdf». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/196568/Azocar%20-%20Planificacion%20y%20tecnicas%20de%20mejora%20de%20planes%20para%20smart%20cities.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[33] J. Dornemann, «Solving the capacitated vehicle routing problem with time windows via graph convolutional network assisted tree search and quantum-inspired computing», *Front. Appl. Math. Stat.*, vol. 9, jun. 2023, doi: 10.3389/fams.2023.1155356.

[34] «El problema del Transporte: Una interpretación del dual». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=277&IdBoletin=93

[35] U. Pineda Zapata, H. Carabalí Ararat, U. Pineda Zapata, y H. Carabalí Ararat, «Un Problema de Enrutamiento del Vehículo con Enfoque de Ventanas de Tiempo Para Mejorar el Proceso de Entregas», *Ingeniería*, vol. 25, n.º 2, pp. 117-143, ago. 2020, doi: 10.14483/23448393.15271.

[36] L. A. S. Echeverri, N. J. T. Perilla, y L. P. C. Murillo, «Problema De Ruteo De Vehículos. Importancia Para La Logística Y Métodos De Solución», *Doc. Trab. ECBTI*, vol. 3, n.º 1, Art. n.º 1, nov. 2022, doi: 10.22490/ECBTI.5860.

[37] «Modelos VRP». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://es.linkedin.com/pulse/modelos-vrp-fabian-cerda

[38] A. García, «Optimización de Rutas de Vehículos. Orígenes y variantes», OGA. Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.oga.ai/blog/optimizacion-de-rutas-de-vehiculos-origenes-y-variantes/

[39] M. López Brufal, «Análisis de problemas de rutas de vehículos con capacidad», jun. 2023, Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.umh.es/handle/11000/29748

[40] «Cap6ARBOLES.pdf». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/icbi/asignatura/Cap6ARBOLES.pdf

[41] «FAEDIS». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://virtual.umng.edu.co/distancia/ecosistema/odin/odin_desktop.php?path=Li4vb

3Zhcy9pbmdlbmllcmlhX2NpdmlsL2ludmVzdGlnYWNpb25fZGVfb3BlcmFjaW9uZXNfaWkvdW5pZGFkXzQv

[42] «PROGRAMACIÓN DINÁMICA». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://cursos.virtual.uniandes.edu.co/isis1105/wp-content/uploads/sites/80/2015/11/4.pdf

[43] «Programacion lineal entera». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dm.uba.ar/materias/investigacion_operativa/2006/2/capit_5.pdf

[44] «PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.uv.es/~sala/Clase14.pdf

[45] «Metodología basada en un algoritmo natural metaheurístico para programar el ruteo de los vehículos de la pastelería ubicada en la región cafetera». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78373/1053776771.2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y

[46] «¿Qué es el Método Heurístico? | Inteciencia». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://inteciencia.wordpress.com/2013/01/22/que-es-el-metodo-heuristico/

[47] «Dialnet-ElMetodoHeuristicoComoRecursoEnLaResolucionDeProbl-6756262.pdf».

[48] «METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200009

[49] D. Muriyatmoko, A. Djunaidy, y A. Muklason, «Heuristics and Metaheuristics for Solving Capacitated Vehicle Routing Problem: An Algorithm Comparison», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 234, pp. 494-501, ene. 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.03.032.

[50] P. M. Llerena Aguilar *et al.*, «Desarrollo y evaluación de un algoritmo educativo basado en inteligencia artificial para mejorar la enseñanza de la división en estudiantes de secundaria utilizando Python y Google Cola», *Polo Conoc. Rev. Científico - Prof.*, vol. 9, n.º 1 (ENERO 2024), pp. 940-956, 2024.

[51] H. P. Orozco, «Aplicación de un método heurístico y modelación matemática para el diseño de rutas vehiculares en la empresa Eco Urban SA de la ciudad de Toluca Estado de México», *Publicaciones E Investig.*, vol. 14, n.º 1, 2020, Accedido: 18 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/3835

[52] H. Mawengkang, M. R. Syahputra, S. Sutarman, y A. Salhi, «A Non-Linear Optimization Model for the Multi-Depot Multi-Supplier Vehicle Routing Problem with Relaxed Time Windows», *Vehicles*, vol. 6, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2024, doi: 10.3390/vehicles6030070.

[53] M. Reusken, G. Laporte, S. U. K. Rohmer, y F. Cruijssen, «Vehicle routing with stochastic demand, service and waiting times — The case of food bank collection problems», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 317, n.º 1, pp. 111-127, ago. 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2024.03.031.

[54] P. Sitek, J. Wikarek, K. Rutczyńska-Wdowiak, G. Bocewicz, y Z. Banaszak, «Optimization of capacitated vehicle routing problem with alternative delivery, pick-up and time windows: A modified hybrid approach», *Neurocomputing*, vol. 423, pp. 670-678, ene. 2021, doi: 10.1016/j.neucom.2020.02.126.

[55] «Rediseño de rutas de distribución propia de una empresa minorista de productos farmacéuticos». Accedido: 18 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/56546/1/T-112881%20Canchingre%20Lara%20Alisson%20Dessire%20%26%20S%c3%a1nchez%20Aguilar%20Geovanny%20Alejandro.pdf

[56] M. L. Brufal y M. L. Ruiz, «ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE RUTAS DE VEHÍCULOS CON CAPACIDAD».

[57] H. Zhang, H. Ge, J. Yang, y Y. Tong, «Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms», *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 29, n.º 1, pp. 195-221, ene. 2022, doi: 10.1007/s11831-021-09574-x.

[58] «Repositorio Universidad Técnica de Ambato: Diseño de un modelo matemático para optimizar las rutas de recorrido del proceso de recolección de desechos sólidos para el Cantón Valencia». Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32215

[59] S.-Y. Tan y W.-C. Yeh, «The Vehicle Routing Problem: State-of-the-Art Classification and Review», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 21, Art. n.º 21, ene. 2021, doi: 10.3390/app112110295.

[60] B. Niu, W. Li, y W. Yi, «An Improved Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Window Requirements», en *Advances in Swarm Intelligence*, Y. Tan y Y. Shi, Eds., Singapore: Springer Nature, 2024, pp. 13-25. doi: 10.1007/978-981-97-7184-4_2.

[61] A. P. Bravo Quispe, C. L. Yupanqui Aguilar, C. V. Cribillero Meza, D. A. Ocharan Rojas, y V. G. Patricio Miranda, «Gestión de rutas a través del uso de modelos basados en algoritmos», 2021, Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/13293

[62] «Nuestra Geografía». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.popayan.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Nuestra-Geografia.aspx#gsc.tab=0

[63] «Cauca, Colombia - Suramérica». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.colombia-sa.com/departamentos/cauca/cauca.html

[64] «How Route Optimization Can Save Time and Money - GoFleet Tracking». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.gofleet.com/how-route-optimization-can-savetime-and-money/

[65] M. D. Villanueva Malca, «Propuesta de optimización de rutas de distribución en la empresa DD & D S. A. C. para reducir costos operativos», 2024, Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/7503

[66] «A green vehicle routing problem with multi-depot, multi-tour, heterogeneous fleet and split deliveries: a mathematical model and heuristic approach | Journal of Combinatorial Optimization». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://link.springer.com/article/10.1007/s10878-023-01016-7

[67] «Historia de Vida de ALPINA». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://alpina.com/nuestra-historia

[68] «Somos Alival - Alival». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://alival.com.co/somos-alival/

[69] «Analisis de una marca de producto local - popayán | Monografías Plus». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.monografias.com/docs/Analisis-de-una-marca-de-producto-local-PK5CGNGZSQVS

[70] «Choosing the right algorithm - Gurobi Optimization». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.gurobi.com/documentation/current/refman/choosing_the_right_algorit.html