

Modelo para la solución de un problema de ruteo de vehículos con capacidad y ventanas de tiempo, en el servicio de transporte de canje y correo bancario

Segura Peñuela Ángel Duvan
Padua Dueñas Andrea Katheryne

Universitaria Agustiniana
Facultad de Ingenierías
Ingeniería Industrial
Bogotá D.C.
2018

Modelo para la solución de un problema de ruteo de vehículos con capacidad y ventanas de tiempo, en el servicio de transporte de canje y correo bancario

Segura Peñuela Ángel Duvan
Padua Dueñas Andrea Katheryne

Asesor del trabajo
Msc. Ing. Rodríguez William Camilo

Trabajo de grado para optar al título como profesional en Ingeniería Industrial

Universitaria Agustiniiana
Facultad de Ingenierías
Ingeniería Industrial
Bogotá D.C.
2018

Contenido

1	Resumen	6
2	Introducción	6
3	Tema de investigación.....	8
3.1	Problema de ruteo de vehículos, Vehicle Routing Problem o VRP por sus siglas en inglés 8	
4	Problema de investigación	9
4.1	Características Generales.....	9
4.2	CVRP.....	11
4.3	VRPTW	11
4.4	Formulación del problema.....	12
5	Objetivos	13
5.1	Objetivo general	13
5.2	Objetivos específicos.....	13
6	Caracterización teórico-practica.....	14
6.1	Modelo de operación del caso de estudio.....	14
6.2	Productos ofertados por la empresa.....	15
6.2.1	Distribuciones especializadas.....	15
6.2.2	Mensajería Express.	15
6.2.3	Back Office.	16
6.2.4	Interoficinas.....	16
6.3	Modelo Operacional del servicio de Transporte de Canje Bancario	17
6.4	Marco teórico del problema de ruteo de vehículos.....	18
6.4.1	El Problema de Ruteo de Vehículos (generalidades y tipos).	18
6.4.2	Componentes de un problema de Ruteo de Vehículos.....	19
6.5	Caracterización Teórico Práctica.....	21

7	Justificación.....	22
8	Formulación matemática.....	24
8.1	Definición de las variables y parámetros del modelo CVRPTW.....	24
8.2	Formulación programación lineal del CVRPTW.....	25
8.2.1	Función objetivo.....	25
8.3	Formulación (TSPTW) Agente viajero con ventanas de tiempo.....	27
9	Evaluación métodos de solución de problemas de ruteo de vehículos.	29
9.1	Métodos de Solución.....	29
9.1.1	Métodos Exactos (generalidades y tipos).....	29
9.1.2	Heurísticas (generalidades y tipos).	29
9.1.3	Metaheurísticas (generalidades y tipos).....	30
9.2	Comparación Métodos de Solución.....	35
9.3	Base de datos metaheurísticas.....	36
10	Implementación método de solución para el CVPRTW.....	37
10.1	Algoritmo de barrido.....	40
10.2	Programación de Xpress con el algoritmo de barrido.....	43
11	Resultados obtenidos.....	47
11.1	Resultados obtenidos con el desarrollo del modelo.....	47
11.2	Cluster obtenidos con la programación del algoritmo de barrido en Xpress.....	48
11.3	Rutas actuales VS Rutas propuestas.....	58
11.4	Validación del modelo.....	58
12	Conclusiones.....	60
13	Lista de referencias.....	61
14	Anexos.....	63

1 Resumen

Mediante el presente trabajo de grado se pretende modelar un problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas de tiempo, en adelante CVRPTW, por sus siglas en inglés (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows) del servicio de mensajería llamado transporte de correo y canje bancario. El servicio consiste en el transporte programado de documentos los cuales se empacan en unidades de carga selladas, la recolección y posterior entrega se lleva a cabo en ventanas de tiempo pactadas con los clientes. Para modelar el servicio se integrarán las siguientes restricciones estudiadas en los VRP tradicionales, ventanas de tiempo, capacidad de carga de los vehículos y recogidas simultáneas. Para la investigación primero se diagnosticó un caso real en una empresa de mensajería en Colombia, con el cual se determinaron las variables y restricciones del servicio. Donde tenemos como pregunta central de esta investigación: ¿Cómo se puede solucionar el problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas de tiempo que representa el servicio de transporte de canje y correo bancario, de tal forma que se optimicen los recursos requeridos? Para solucionar el CVRPTW se dividió en dos etapas el problema, una primera fase de agrupamiento o creación de clústeres y luego se solucionó por cada cluster un problema de diseño de rutas por medio del problema de agente viajero con ventanas de tiempo (TSPTW). La fase de agrupamiento se solucionó con el algoritmo de barrido, el cual fue programado en Excel, luego la segunda fase diseño de rutas se solucionó con programación lineal entera, la cual se programa en el software FICO Xpress. Los resultados fueron principalmente la optimización de recursos ya que se pasó de 20 a 18 rutas en Bogotá.

Palabras Clave: Ruteo de Vehículos, Transporte de canje y correo bancario, Xpress, Agente viajero con ventanas de tiempo.

2 Introducción

En la actualidad en Bogotá existen una gran variedad de empresas de mensajería que ofrecen diferentes servicios en su portafolio, uno de ellos es el transporte de canje y correo bancario el cual es la base para el desarrollo de este trabajo de grado. La rapidez y la seguridad son elementos trascendentales dentro del ámbito de actividades comerciales, por esto el servicio de mensajería especializada ha comenzado a ser un socio importante para aquellas organizaciones que generan un alto volumen de correspondencia y que además necesitan seguridad en la entrega de sus envíos.

La responsabilidad que adquieren las compañías de correo al ofrecer sus servicios constituye el aspecto más importante para que éstas deban preparar su operación y recursos, para cumplir con las expectativas y requerimientos que los clientes puedan tener. Dentro del inicio del proceso de operación del servicio de mensajería, es fundamental el conocimiento de los clientes y del mercado en el que se va a mover, para establecer las oportunidades de negocio que permitan el éxito de la organización. Igualmente, por el ánimo de crecer, la operación de ese tipo de empresas se torna complicada pero aun así se siguen utilizando procesos manuales y las competencias individuales de sus colaboradores para desarrollar sus procesos, incluyendo la programación y planeación de las rutas de distribución. Lo anterior se puede convertir en una baja competitividad del servicio por que las decisiones se toman básicamente en la experiencia del personal.

El presente trabajo plantea la problemática actual del servicio de transporte de canje y correo bancario y establece una metodología aplicando algunos de los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Industrial específicamente en el área de investigación de operaciones, para resolver la problemática, estos conocimientos se verán reflejados en la formulación y solución de un modelo matemático para solventar un CVRPTW. El caso de estudio será una empresa que opera a nivel nacional, pero nuestra investigación se centrara a sus operaciones dentro de la ciudad Bogotá, misma que por motivos de seguridad y confidencialidad no podemos revelar ciertos datos que para ellos son relevantes.

El trabajo está constituido de la siguiente manera, primero se define el tema a investigar, seguido se encuentra la descripción de la problemática en la cual se encuentra enmarcado el tema de estudio y se diagnostica la organización, luego están el objetivo general y los objetivos específicos que nos definen que es lo que se quiere lograr con el desarrollo del trabajo, posteriormente la justificación nos sintetiza el porqué del desarrollo del proyecto. A continuación, el marco de referencia nos

centra en las teorías que contienen la problemática y finalmente encontramos la metodología esta contiene la estrategia para la solución de la problemática, conclusiones y recomendaciones.

3 Tema de investigación

3.1 Problema de ruteo de vehículos, Vehicle Routing Problem o VRP por sus siglas en inglés

El VRP se basa generalmente en la necesidad de programar las rutas para una determinada cantidad de vehículos que parten de un depósito y estos deben o no regresar al mismo lugar, ejecutando visitas o entregas en algunos puntos definidos. Igualmente es uno de los problemas de optimización combinatorios más famosos. (Francisco Baptista Pereira, 2009) En términos simples, el objetivo es determinar un conjunto de rutas con un costo mínimo general que pueda satisfacer varias demandas geográficas dispersas. Una flota de vehículos ubicados en uno o más depósitos está disponible para cumplir las solicitudes. Existe una gran cantidad de variantes, que añaden diferentes restricciones a la definición original. Algunos ejemplos están relacionados con el número de depósitos, el orden para visitar a los clientes o a las ventanas de tiempo especificando un deseable período para llegar a un lugar determinado. (Francisco Baptista Pereira, 2009)

En la figura 1 se representa de manera general mediante una infografía un VRP relacionado con el servicio de transporte de canje y correo bancario, existe un depósito centro de operaciones de donde parten mensajeros motorizados hacia cada uno de los puntos donde deben estar presentes en un intervalo de tiempo determinado, en cada uno de los puntos reciben tanto correspondencia como canje bancario, de allí deben regresar al punto de inicio. En este caso se representa con tres mensajeros motorizados y un único depósito, pero dadas las características de diferentes operaciones tanto la cantidad de mensajeros y depósitos puede aumentar.

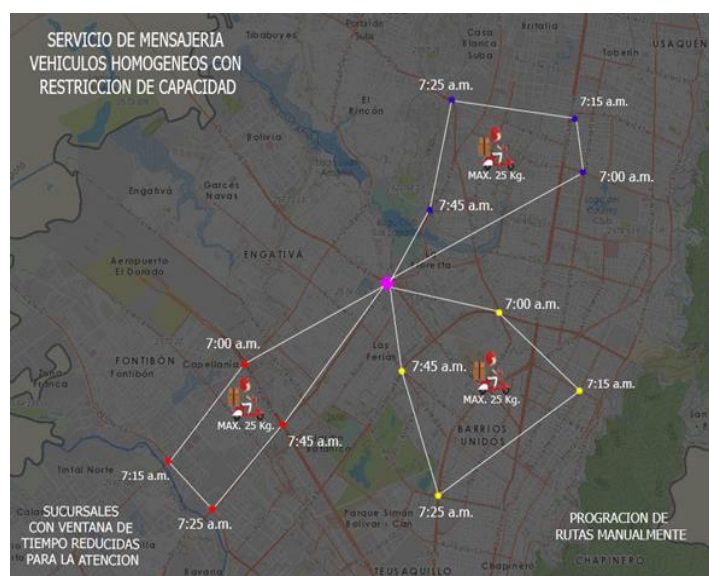


Figura 1. Infografía VRP servicio de transporte de canje y correo bancario. Producción propia.

4 Problema de investigación

4.1 Características Generales

La problemática a estudiar se encuentra enmarcada en el servicio de transporte de canje y correo bancario prestado por una organización a diferentes sucursales de entidades financieras reconocidas en el país como Banco de Bogotá, Banco Davivienda, Bancolombia, los Bancos del grupo Aval, entre otras. Para el caso de estudio estas sucursales están ubicadas en su gran mayoría en el centro de Bogotá, zona que se tomará como referente para realizar este trabajo.

El servicio de transporte de canje y correo bancario se puede clasificar dentro del servicio de mensajería expresa, definida según la legislación colombiana como un servicio postal urgente que exige la aplicación y adopción de características especiales para la recepción, recolección, clasificación, transporte y entrega de objetos postales hasta de 5 kilogramos. (Congreso de Colombia, 2009)

Este servicio consiste en el transporte programado de documentos los cuales se empacan en unidades de carga selladas, la recolección y posterior entrega se lleva a cabo en rangos de tiempos pactados con anterioridad según las exigencias del cliente. Este servicio conecta todos los puntos de operación del usuario para que transporte con seguridad y oportunidad sus cheques y correspondencia bancaria. El mayor desafío para el área de operaciones y de logística en una empresa de mensajería es aumentar la eficiencia de los recursos en la recolección y entrega de correspondencia. En la actualidad algunas de las empresas, como la del caso de estudio, diseñan las rutas de recolección y entrega a través de procesos manuales, utilizando principalmente su experiencia, por lo cual, los recursos no se usan de forma eficiente.

Luego de realizar un análisis de causa raíz, a través de la herramienta 5 por qué, figura 2, se concluyó que la ineficiencia de recursos se debe a que cuando se presentan cambios en las rutas por cierre o apertura de nuevas oficinas, unificación de horarios de recogida o por servicios adicionales, la programación de las rutas se convierte en un problema complejo de resolver, dada sus características de optimización combinatoria, (Sanchez Garcia) nos dice “que la optimización combinatorio es la búsqueda de la mejor configuración” De acuerdo con lo anterior y por tratarse de un servicio de mensajería esta operación se puede identificar como un VRP esto teniendo en cuenta que dentro de un servicio de mensajería intervienen vehículos que a través de un recorrido previamente programado recogen y/o entregan correspondencia en diferentes puntos distribuidos en un área geográfica determinada. El problema de ruteo de vehículos (VRP Vehicle Routing

Problem) es uno de los problemas de optimización combinatoria más estudiados y consiste en el diseño óptimo de rutas de una flota de vehículos para atender un conjunto de clientes. (Bruce Golden, 2008).

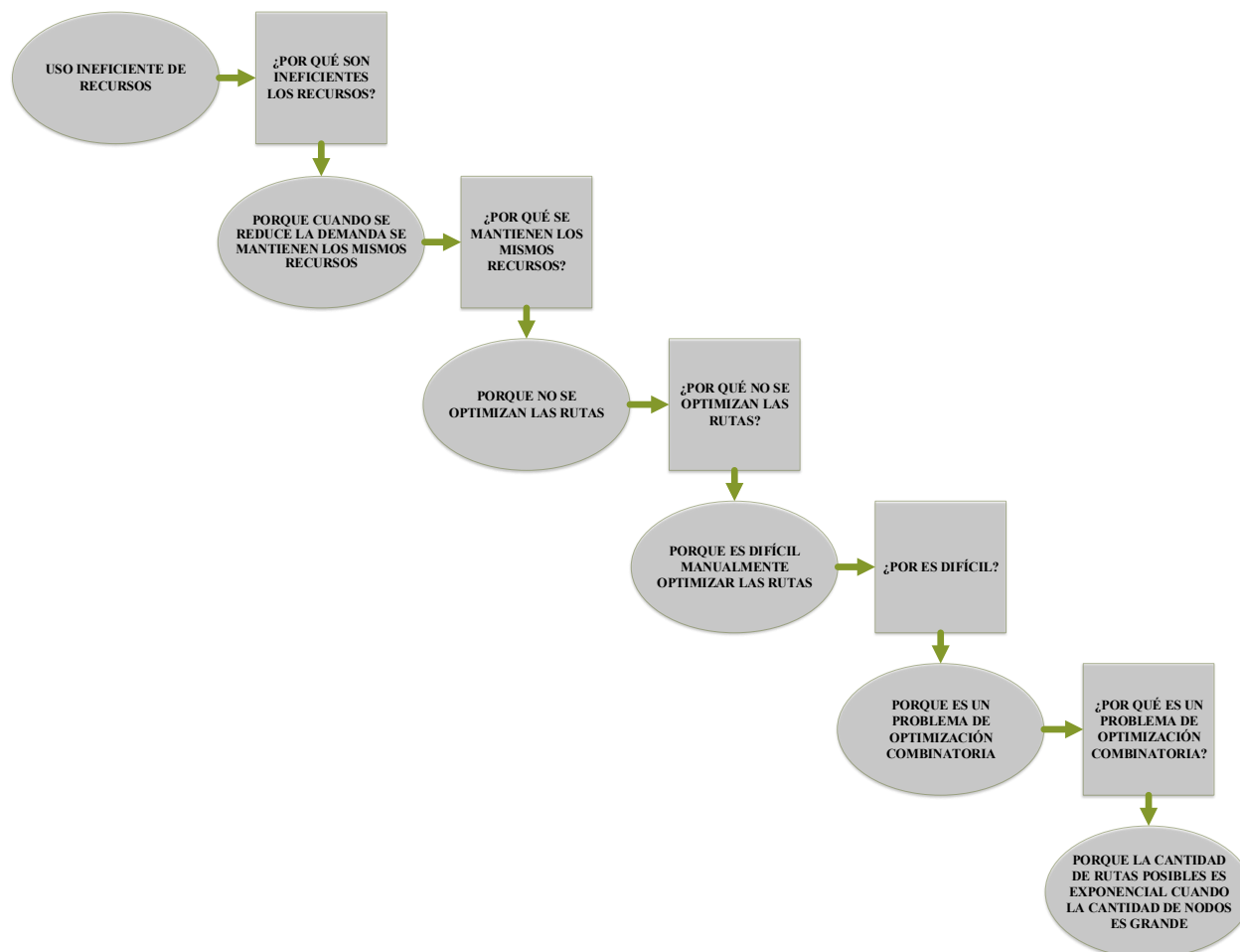


Figura 2. Análisis causa raíz 5 por qué. Producción propia

Otra de las características que hace que el servicio de transporte de canje y correo bancario se considere como un VRP son las ventanas de tiempo establecidas por el cliente para la recolección o entrega de correspondencia y la restricción de capacidad de los vehículos utilizados para la prestación de este servicio como se explica a continuación. En el VRP estas restricciones se conocen como las variaciones del problema. Las variantes básicas son VRP con capacidad (CVRP), VRP con restricción de distancia y capacidad (DCVRP), VRP con ventanas de tiempo (VRPTW), VRP con viajes de regreso (backhauls) (VRPB), VRP con recogidas y entregas (VRPPD) y cualquier combinación de estas variantes. (Reza Zanjirani Farahani, Logistics Operations and Management Concepts and Models, 2011) Para el caso de la operación del tema de estudio a continuación se presentan las variaciones que aplican.

4.2 CVRP

En el CVRP, todos los clientes corresponden a las entregas y las demandas son deterministas, conocidas de antemano y no pueden dividirse. Los vehículos son idénticos y están basados en un único depósito central, y sólo se imponen las restricciones de capacidad para los vehículos. El objetivo es minimizar el costo total. (Paolo Toth, 2002) El servicio de transporte de canje y correo bancario igualmente se presta por medio de mensajeros motorizados los cuales máximo pueden transportar 25 Kg según la Resolución 2400 de 1979 art. 392 “La carga máxima que un trabajador, de acuerdo a su aptitud física, sus conocimientos y experiencia podrá levantar será de 25 kilogramos de carga compacta; para las mujeres, teniendo en cuenta los anteriores factores será de 12,5 kilogramos de carga compacta.” (Marin Bernal & Jacome Illera, 1979) y parten de un depósito central al cual deben regresar al finalizar el recorrido.

4.3 VRPTW

El VRP con ventanas de Tiempo VRPTW es la extensión del VRP donde el servicio de cada cliente debe comenzar dentro de un intervalo de tiempo asociado y el vehículo debe permanecer en la ubicación del cliente durante el servicio. Las ventanas de tiempo suaves pueden ser violadas a un costo, mientras que las ventanas de tiempo difícil no permiten que un vehículo llegue a un cliente después de la última hora para comenzar el servicio. En este último caso, si llega antes de que el cliente esté listo para comenzar el servicio debe esperar. (Paolo Toth, 2002) En el servicio de transporte de canje y correo bancario las sucursales tienen establecidas ventanas de tiempo para la recolección de los elementos a transportar, los mensajeros deben hacer presencia a la hora establecida por el cliente o máximo 10 minutos después.

Diversos métodos de solución para el VRP y sus variaciones se han propuesto, desde, métodos exactos como el Branch and Bound, heurísticas, como el algoritmo de los ahorros o el algoritmo de barrido y hasta metaheurísticas que buscan una posible solución y luego la optimizan, dando así una muy buena solución. (Alireza Rahimi Vahed, 2015)

En resumen, teniendo presente que la problemática del servicio de mensajería estudiada está enmarcada en los problemas de ruteo de vehículos y que se deben considerar restricciones de capacidad y ventanas de tiempo, se plantea resolverla con la implementación de uno o varios algoritmos utilizados para la solución del CVRPTW.

4.4 Formulación del problema

¿Cómo se puede solucionar el problema de ruteo de vehículos considerando restricciones de capacidad y ventanas de tiempo que representa el servicio de transporte de canje y correo bancario, de tal forma que se optimicen los recursos requeridos?

5 Objetivos

5.1 Objetivo general

Aplicar un modelo para la solución del problema de ruteo de vehículos que permita optimizar los recursos utilizados en el servicio de transporte de canje y correo bancario.

5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar de forma teórica y práctica el CVRPTW asociado a la empresa estudiada.
- Seleccionar el modelo de programación lineal del CVRPTW.
- Evaluar los métodos de solución aplicables al modelo formulado.
- Implementar el método de solución en Visual Basic de Excel o en Xpress.
- Validar los resultados obtenidos del modelo propuesto.

6 Caracterización teórico-práctica

6.1 Modelo de operación del caso de estudio

Para el caso de estudio se tuvo en cuenta una organización que presta el servicio de mensajería de correspondencia y canje bancario a nivel nacional, esta empresa actualmente cuenta con 18 depósitos en todo Colombia, sin embargo el presente trabajo está basado en un único depósitos que de acuerdo con su capacidad y ubicación en la zona centro de la ciudad de Bogotá, es uno de los más importantes en el cual se deben atender 123 puntos que en la actualidad están siendo visitados por 20 mensajeros motorizados, en la figura 3 podemos observar la ubicación de los clientes que se manejan para esta zona, en la parte izquierda de esta observamos todos los clientes que se manejan y en la parte derecha ya la asignación de los rutas para estos donde cada color representa una ruta diferente.

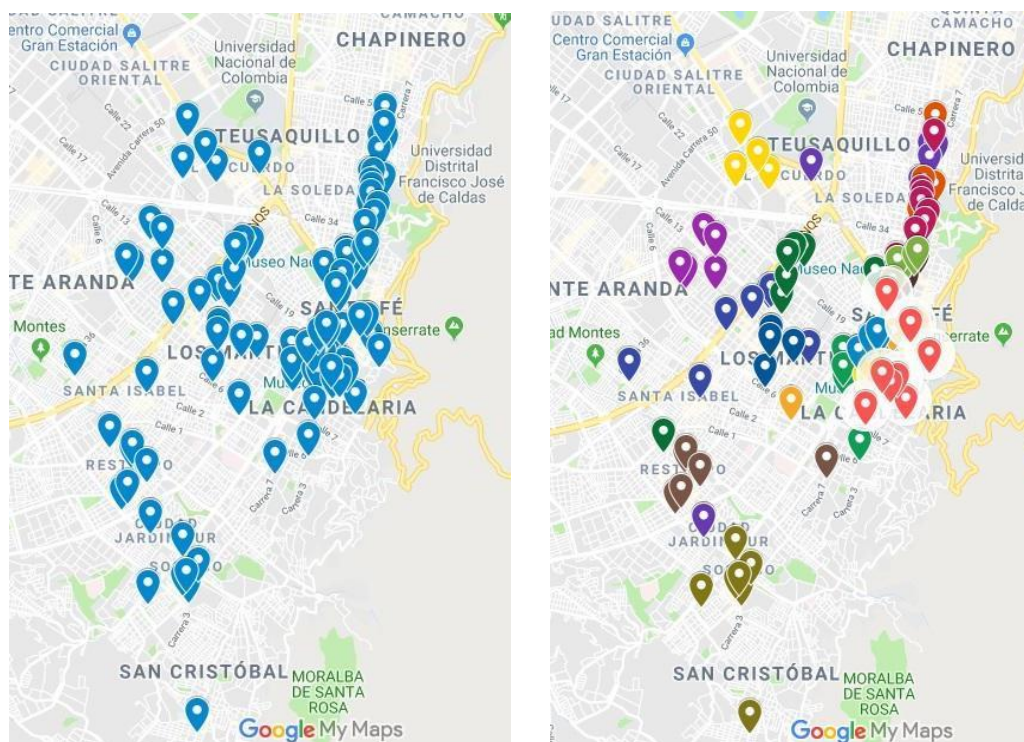


Figura 3. Clientes zona centro. Producción propia

En la figura número 4 podemos observar un ejemplo de una de las rutas manejadas para la zona centro de Bogotá, si miramos detenidamente podemos evidenciar que se muestra el camino que debe hacer el motociclista para visitar cada uno de estos puntos.

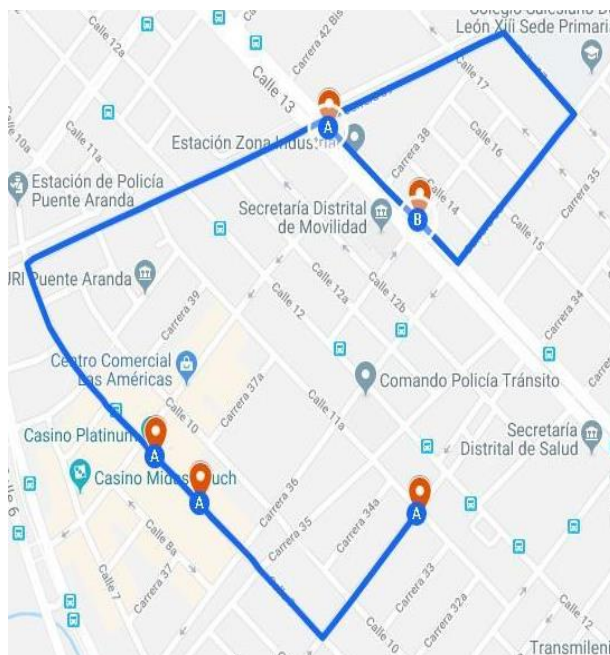


Figura 4. Ejemplo ruta zona centro

6.2 Productos ofertados por la empresa

A continuación, se mencionan los servicios y/o productos ofrecidos por la empresa entre los que se encuentran: interoficinas, distribuciones especializadas, mensajería exprés y back office.

6.2.1 Distribuciones especializadas.

Esta empresa ha liderado y transformado la entrega especializada de documentos de riesgo a usuarios finales, a través de soluciones ágiles, controladas, seguras y confiables, que permiten a sus clientes construir una entrega individual a la medida de las necesidades de su negocio. Ha diseñado soluciones que permiten ajustarse a las necesidades del cliente con tiempos de entrega que se adaptan a sus planes, contando con entregas desde el mismo día, y con diferentes modalidades de distribución: Personalizada, autorizada y certificada.

Las soluciones incluyen custodia y empaque individual para todos los productos; y gestión telefónica para entregas personalizadas y autorizadas. (paquetería de hasta 5 kg).

6.2.2 Mensajería Express.

El servicio de Mensajería exprés es el servicio postal con características especiales de recolección, clasificación, transporte, distribución de sobres o paquetes con peso hasta 5 kilos. Incluye: Recolección, registro individual, cobertura, tiempos de entrega, seguimiento, devoluciones, tarifas, servicios adicionales o complementarios y reportes e indicadores.

6.2.3 Back Office.

Solución integral para facilitar la gestión y el control de los documentos físicos y electrónicos desde que se producen o reciben hasta el archivo, garantizando el acceso adecuado a la información.

Esta solución tiene como eje central los centros logísticos inhouse o outhouse. Back Office incluye:

- Administración: Control de documentos críticos desde la radicación hasta la entrega, seguimiento al flujo del documento y suministro de información gerencial.
- Elaboración, actualización y aplicación de Tablas de retención documental.
- Ventanilla.
- Radicación.
- Administración de centros de correspondencia.
- Digitalización.
- Administración de archivos de Gestión.
- Administración de archivos centrales.
- Administración de proveedores.
- Extracción de información.
- Administración de centros de correspondencia.

6.2.4 Interoficinas.

Es la solución confiable y económica para el transporte programado de documentos en unidades de carga selladas y transporte de canje bancario. Soportados en una red estructurada realiza sus recolecciones y entregas en los rangos de tiempo pactados. Este servicio se complementa con el producto Pick up para sus clientes empresariales; y Transporte de la Compensación Bancaria, soluciones que facilitan sus procesos de recolección y entrega, y le permiten aumentar su competitividad.

Cuentan con una estricta garantía de calidad que ofrece:

- Minimizar el riesgo en el transporte por pérdida, fraude o hurto.
- Cumplimiento garantizado de sus entregas programadas en los rangos de tiempo acordados.
- Tener un flujo continuo de información entre sus puntos de operación.
- Atención oportuna a sus eventualidades.
- Minimizar los reclamos de sus puntos de operación.
- 100% de sus entregas en menos de 24 horas.

- Control de la operación permanente a través de herramientas diseñadas bajo la cultura de servicio y administración del riesgo, apoyadas en un sistema de comunicación de doble vía.
- Planes de contingencia que garanticen la operación permanente.
- Supervisión de los tiempos de entrega a las rutas críticas.

Cabe resaltar que el servicio interoficinas es el producto caso de estudio y al cual se aplica el modelo CVRPTW.

6.3 Modelo Operacional del servicio de Transporte de Canje Bancario

Nuestro caso de investigación se centra en el transporte de canje y correo bancario, el cual está dentro del portafolio que ofrece la empresa de estudio y se encuentra señalado en el servicio y/o producto interoficinas que estos ofrecen. Este servicio, cuenta actualmente con 20 motorizados quienes día a día realizan los recorridos asignados mediante rutas fijas, detallando que el Supervisor de operaciones de Bogotá de manera manual, diariamente puede realizar ajustes que vea pertinentes sin una debida planeación, esto claramente puede señalar a la investigación posibles fallas puesto que incluir nuevos puntos o eliminar alguno de ellos a última hora, puede presentar un mal manejo de los recursos disponibles.

Como se observa en la figura 5, cuando el motorizado llega al depósito de la empresa se debe reportar y recoger la ruta con los clientes que se le han sido asignados, este se debe disponer a realizar la ruta en el orden indicado para cumplir con las ventanas de tiempo de cada uno de los clientes, desde el cliente 1 hasta el N dependiendo de asignación recibida, recogiendo de cada uno de ellos el canje y correo bancario. Siempre teniendo presente que cuando finalice su ruta debe regresar al depósito de donde partió.

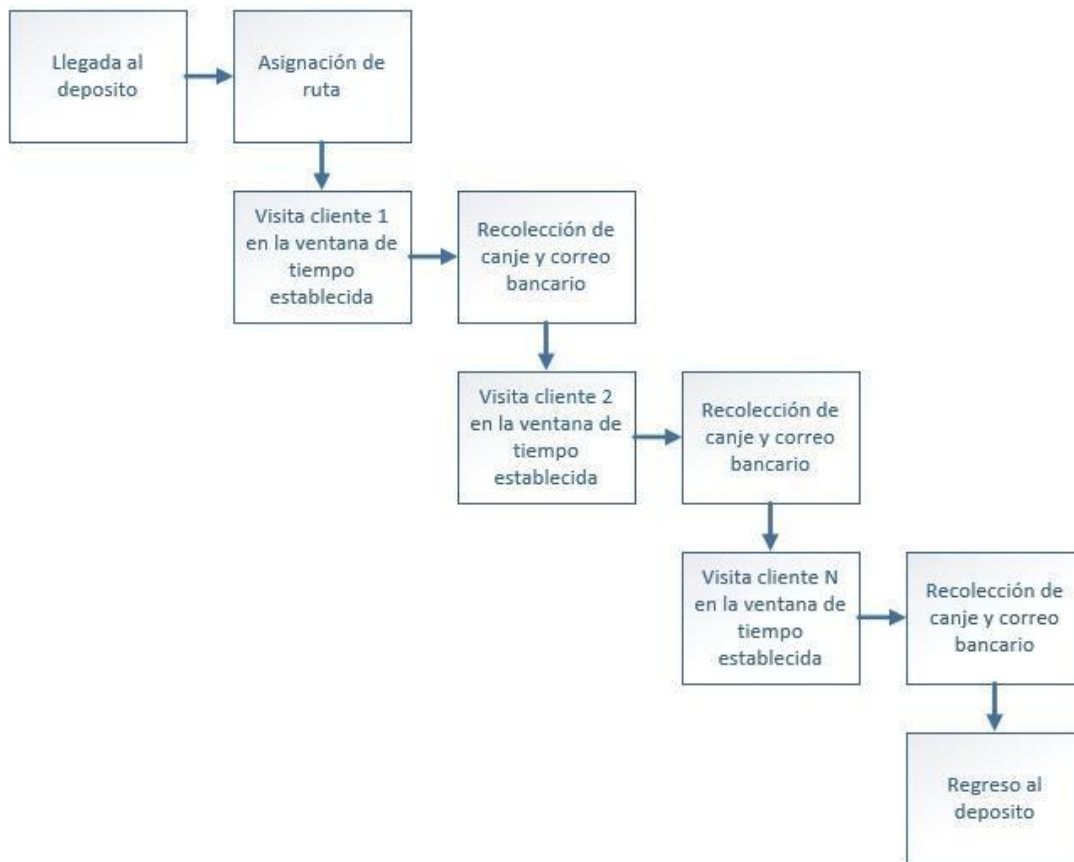


Figura 5. Proceso que realiza un motorizado Producción propia

6.4 Marco teórico del problema de ruteo de vehículos

6.4.1 El Problema de Ruteo de Vehículos (generalidades y tipos).

El problema de Ruteo de Vehículos VRP surge por primera vez cuando (Dantzig & Ramser, 1959) realizan una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible. En este artículo ellos definen dicho problema como: “la determinación de la ruta óptima para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos (almacenes) para satisfacer la demanda de varios clientes dispersos geográficamente”. (Sarmiento Lepesqueur, 2014).

La solución del problema de ruteo vehicular (VRP) determina un conjunto de rutas que comienza y termina en su propio depósito, cada una realizada por un solo vehículo de una manera que minimiza el costo global de transporte y cumple con las demandas de los clientes y restricciones operacionales. El VRP tiene muchas aplicaciones en casos del mundo real. Algunas aplicaciones son la recolección de residuos sólidos, limpieza de calles, rutas de autobuses escolares,

rutas de vendedores y unidades de mantenimiento, transporte de personas discapacitadas, etc. (Reza Zanjirani Farahani, Logistics Operations and Management Concepts and Models, 2011)

Los problemas de ruteo de vehículos consideran un conjunto de clientes $V_c = \{1, 2, \dots, N\}$ geográficamente distribuidos, en donde cada cliente tiene una demanda. Los vehículos que visitan los clientes son idénticos $K = \{1, 2, \dots, m\}$ y pertenecen a un depósito central $\{0\}$ el cual se considera el punto de inicio y fin de todos los vehículos. Todos los clientes deben ser visitados una única vez por un solo vehículo. El problema se puede definir como un grafo completo dirigido $G = \{V, A\}$ en donde $V = V_c \cup \{0\}$ es el conjunto de vértices y $A = \{(i, j) \in V, i \neq j\}$ es el conjunto de arcos. Cada arco (i, j) tiene un valor no negativo asociado c_{ij} el cual representa el costo de viajar desde i hasta j . (Paolo Toth, 2002).

6.4.2 Componentes de un problema de Ruteo de Vehículos.

Según lo planteado por (Oliveira, 2004) un problema de ruteo de vehículos puede presentar diferentes características en cuanto a los clientes, depósitos y vehículos.

Los clientes. Los clientes pueden manejar demandas las cuales pueden ser determinísticas o estocásticas. Estas deben ser cubiertas por algún vehículo y si la demanda no es un bien si no es servicio se da por cumplido el objetivo al momento de visitarlo sin embargo hay excepciones donde se permite que el cliente sea atendido por varios vehículos y varios momentos. Los clientes pueden establecer el horario en el cual deben ser atendidos y debe cumplirse con este intervalo de tiempo pactado, en nuestro caso de estudio se maneja esta restricción y se le llamará ventanas de tiempo.

Los Depósitos. Los vehículos usualmente parten de un solo depósito y se tienen que comenzar la ruta y finalizar en el depósito, pueden existir excepciones que se consideran problemas multi-depósito en los que cada depósito tiene características propias como lo son su ubicación y la capacidad máxima de almacenamiento.

Los Vehículos. La flota de vehículos puede ser homogénea o heterogénea en cuanto a su capacidad, tipo de producto que puede transportar y el costo fijo en el que se incurre al usar cada vehículo. (Sarmiento Lepesqueur, 2014)

Problema de ruteo de vehículos con restricción de capacidad (CVRP). En el CVRP, todos los clientes corresponden a las entregas y las demandas son deterministas, conocidas de antemano y no pueden dividirse. Los vehículos son idénticos y están basados en un único depósito central, y solo se imponen las restricciones de capacidad para los vehículos. El objetivo es minimizar el costo

total (es decir, una función ponderada del número de rutas y su duración o tiempo de viaje) para atender a todos los clientes. (Paolo Toth, 2002)

Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). El VRP con ventanas de tiempo VRPTW es la extensión del CVRP en la que se imponen restricciones de capacidad y cada cliente i está asociado con un intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$, llamado ventana de tiempo. El instante de tiempo en que los vehículos salen del depósito, el tiempo de viaje, t_{ij} , para cada arco $(i, j) \in A$ (o t_e para cada $e \in E$) y un tiempo de servicio S_i adicional para cada cliente i , también se proporcionan. El servicio de cada cliente debe comenzar dentro de la ventana de tiempo asociada, y el vehículo debe detenerse en la ubicación del cliente por instantes de tiempo. Además, en caso de llegar temprano a la ubicación del cliente i , el vehículo generalmente puede esperar hasta el instante inmediato a , *i.e.*, es decir, hasta que el servicio pueda comenzar. (Paolo Toth, 2002)

VRPTW consiste en encontrar una colección de exactamente K circuitos simples con un costo mínimo, de tal forma que.

- i. Cada circuito visita el vértice del depósito;
- ii. cada vértice del cliente es visitado por exactamente un circuito;
- iii. la suma de las demandas de los vértices visitados por un circuito no excede la capacidad del vehículo, C ; y
- iv. para cada cliente i , el servicio comienza dentro del intervalo de tiempo, $[a_i, b_i]$, y el vehículo se detiene para instantes de tiempo S_i . (Paolo Toth, 2002)

TSPTW Problema del viajero con ventanas de tiempo. Consiste en buscar la ruta que minimice los costos, iniciando y regresando a un mismo y único depósito y visitando a los clientes una sola vez, de acuerdo al intervalo horario que estos hayan establecido, conocido como ventana de tiempo. No se permite llegar al nodo después del tiempo más alto, pero es posible llegar antes de la unidad horaria más temprana y esperar hasta poder empezar el servicio. (Pérez de Vargas Moreno, 2015)

De esta forma podemos considerar un grafo completo donde los vértices representan a los clientes a visitar y nuestro almacén y las aristas representan el coste de ir de un punto a otro. Además cada vértice posee asociado un intervalo de tiempo el cual debe respetar el vehículo, este intervalo de tiempo es representado por $[a_i, b_i]$ donde a_i representa la hora de apertura de la ventana y b_i representa la hora de clausura de la ventana. Las condiciones que se imponen es que el vehículo debe llegar al cliente i entre los tiempos a_i, b_i si este llega antes del tiempo a_i deberá esperar hasta que se abra la ventana. Esta espera supondrá un aumento en el costo de la ruta. Por

otro lado no podrá llegar al vértice i después del tiempo bi . Por último consideremos ti,j el tiempo empleado en ir de la ciudad i a la ciudad j y si el tiempo de servicio en cada ciudad.

Con estos datos debemos satisfacer las siguientes condiciones para solucionar un TSPTW:

$$ai + si + ti,j \leq bi \quad \forall i, j \in N$$

$$ai \leq ti \leq bi \quad \forall i \in N$$

Donde ti es el tiempo acumulado en el nodo i . (Trigos Muriel & Utrera Jaén)

6.5 Caracterización Teórico Práctica

El servicio de transporte de canje y correo bancario se caracteriza por contar con un depósito central, así como en el VRP, el cual es el centro de operaciones en este caso para zona centro, allí inician y terminan todas las rutas. La operación es desarrollada por 20 mensajeros motorizados (hombres) los cuales en el VRP corresponden a los vehículos, así mismo, estos vehículos tienen una capacidad restringida lo cual nos presenta la primera variación del VRP es decir un VPR con restricción de capacidad “CVRP”. Cabe recordar que estos mensajeros solo pueden llevar 25 kg esto debido a que la Resolución 2400 de 1979 art. 392 “La carga máxima que un trabajador, de acuerdo a su aptitud física, sus conocimientos y experiencia podrá levantar será de 25 kilogramos de carga compacta; para las mujeres, teniendo en cuenta los anteriores factores será de 12,5 kilogramos de carga compacta.”

Además de las rutas que se deben cumplir estrictamente, también se deben cumplir con las ventanas de tiempo de los clientes o puntos a atender, Estos puntos corresponden a sucursales bancarias las cuales cuentan con ventanas muy complejas de 10 minutos para recibir y atender el mensajero motorizado lo cual no asemeja el caso de estudio a otra de las variaciones del VRP en este momento se tendría un VRP con capacidad y ventanas de tiempo “VRPTW”

Cabe resaltar que toda la información de la operación de la organización en la cual se basa el trabajo es confidencial lo anterior por la seguridad de sus clientes, operarios o mensajeros y el contenido transportado por lo cual es imposible mostrar ubicaciones exactas como la del depósito central y puntos a atender.

7 Justificación

Teniendo en cuenta el reto que representa la aplicación de nuevas técnicas o técnicas científicamente comprobadas en las diferentes situaciones del día a día de la industria colombiana con la aplicación de este trabajo se pretende involucrar en un caso real un CVRPTW que influya positivamente en el desarrollo de las actividades de la organización del caso de estudio.

Dantzig y Ramser (1959) fueron los primeros en introducir el “Truck Dispatching Problem”, (problema de despacho de camiones) que consiste en modelar cómo una flota de camiones homogéneos podría servir a la demanda de petróleo de una serie de estaciones de servicio desde un cubo central y con una distancia mínima recorrida. Cinco años después, Clarke y Wright (1964) generalizan este problema a un problema de optimización lineal que se encuentra comúnmente en el campo de la logística y el transporte, es decir, la forma de servir a un conjunto de clientes, geográficamente dispersos alrededor del depósito central, utilizando una flota de camiones con diferentes capacidades. Esto llegó a ser conocido como el “Vehicle Routing Problem” (VRP), uno de los temas más estudiados en el campo de la investigación de operaciones. (Kris Braekers, 2016)

El VRP ha sido bastante estudiado durante el transcurso de la historia de la investigación de operaciones (Paolo Toth, 2002) por razones como que es bastante aplicable a situaciones existentes en organizaciones con sistemas de distribución que constituyen planteamientos con una solución compleja, como lo es la operación del caso de estudio donde interviene una gran cantidad de puntos a atender y restricciones de capacidad y ventanas de tiempo.

Toth y Vigo (2002) concluyen que con el uso de métodos computarizados en los procesos de distribución reales suele disminuir los costos de transporte entre un 5% y un 20 % y describen varios casos de estudio reales donde la aplicación de algoritmos VRP logra disminuciones sustanciales en los costos de transporte. Con el desarrollo de este trabajo se busca, impactar positivamente en la prestación del servicio de transporte de canje y correo bancario, al demostrar que mediante un modelo para la solución del VRP se pueden optimizar la utilización de recursos, y este tipo de organizaciones pueden ser estimuladas a aplicar la optimización combinatoria en su operación.

El número de métodos de soluciones introducidas en la literatura académica (por edad, así como las nuevas variantes de la VRP) ha crecido rápidamente en los últimos decenios. Por otra parte, la capacidad de velocidad de procesamiento y la memoria de los ordenadores actuales ha aumentado de forma exponencial, lo que permite resolver grandes casos de la VRP, que estimula la progresión

en la investigación de campo y el desarrollo de software comercial para la VRP. Hoy en día el software VRP está siendo utilizado por miles de empresas, entre otros Coca-Cola Enterprises y Anheuser-Busch InBev, en una gran variedad de sectores industriales (Kris Braekers, 2016) de acuerdo con lo anterior se pretende hacer uso y demostrar que las herramientas que existen para la solución de problemas de optimización combinatoria NP-hard son totalmente aplicables a la industria y las situaciones reales de estas organizaciones.

8 Formulación matemática

8.1 Definición de las variables y parámetros del modelo CVRPTW

A continuación, se presentan las variables y parámetros a utilizar en el modelo matemático.

$G = (V, A)$ Representa el grafo completo de la red de transporte donde.

$V = \{0, \dots, n\}$ Es el conjunto de vértices.

$A \times (i, j)$ Es el conjunto de arcos, donde $i \neq j$ y un grafo posee aristas de todos a todos los nodos.

$i = 1 \dots, n$ Corresponde a las sucursales bancarias.

0 o $n+1$ Corresponden al depósito, Aunque corresponden a un mismo punto, son distintos debido a las restricciones asociadas a cada uno, ya que las horas de apertura y cierre son diferentes se deben manejar dos parámetros.

$[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$ E y L Representan la salida del depósito más temprana posible y la llegada al depósito más tarde posible respectivamente.

Cada ruta factible corresponde a un camino $G = (V, A)$ que debe comenzar en el nodo 0 y finaliza en el nodo $n + 1$ estos dos nodos no cuentan con demanda y ventanas de tiempo de servicio definidos.

k : Representa al vehículo k con una capacidad limitada de 25 kg según la Resolución 2400 de 1979 art. 392. El número de vehículos no se considera una retracción del problema ya que se cuenta con una flota de vehículos muy grande.

- Para cada arco $A \times (i, j)$, Se define:

c_{ij} : Costo de viajar por cada arco $A \times (i, j)$ es decir el valor ponderado de viajar del nodo i al nodo j

t_{ij} : Representa el tiempo de viaje para cada arco $A \times (i, j)$ equivalente a una unidad de costo

X_{ijk} : Si el vehículo k viaja del nodo i al nodo j o viceversa. Es una variable de naturaleza binaria.

$X_{ijk} = 1$ Si en la solución, el vehículo k viaja de i a j

$X_{ijk} = 0$ Si en la solución, el vehículo k NO viaja de i a j

- Para cada nodo $V = \{0, \dots, n\}$ se define:

s_i : Tiempo de servicio en el nodo i o en cada sucursal bancaria

d_i : Demanda del nodo i

$[a_i, l]$, con $i \in V$, Un intervalo de tiempo, llamado ventana de tiempo, dentro del cual un cliente puede ser servido.

a_i : Límite inferior de la ventana de tiempo

b_i : Límite superior de la ventana de tiempo

w_{ik} : Inicio del servicio en el nodo i por el vehículo k

w_{jk} : Inicio del servicio en el nodo j por el vehículo k

8.2 Formulación programación lineal del CVRPTW

8.2.1 Función objetivo.

Pretende optimizar el tiempo total de recorrido, donde t_{ij} es el tiempo de recorrido entre dos clientes i e j . El valor de la función objetivo es el tiempo total utilizado para visitar todos los clientes.

Minimizar

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} x_{i,jk} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta+(i)} x_{ijk} = 1 ; \forall i \in N \quad (2)$$

Dado $N = V/\{0, n + 1\}$ que representa el conjunto de clientes, a excepción del depósito; la restricción (2) asigna a cada cliente exactamente una ruta de vehículo $j \in \Delta + (i)$. Es el conjunto de grafos completos que parten de i y llegan a j .

$$\sum_{j \in \Delta+(0)} x_{0jk} \leq 1 ; \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Delta-(n+1)} x_{i,n+1,k} \leq 1 ; \forall k \in K \quad (4)$$

Las restricciones (3) y (4) limitan el número de rutas por vehículo a una, y caracterizan el flujo que debe seguir la flota. La primera hace referencia al número de veces que un vehículo sale del depósito y la segunda, el número de veces que llega. $j \in \Delta + (0)$, es el conjunto de grafos completos que parten del depósito a todos los clientes y $i \in \Delta - (n + 1)$ es el conjunto de grafos que parten de todos los clientes hacia el depósito.

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{ijk} = 0 ; \forall k \in K, \quad j \in N$$

(5)

La restricción (5) asegura que a cada cliente solo llegue un vehículo y el mismo salga de él. Esta restricción permite que en el modelo no se formen ciclos. Al activarse el nodo x_{ijk} , este se elimina del conjunto de clientes no visitados para evitar repeticiones en la asignación de rutas.

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - x_{ijk})M_{ij} ; \forall k \in K, \quad (i, j) \in A$$

(6)

La restricción (6) asegura que el vehículo k no pueda comenzar el servicio, si la suma del tiempo de viaje de i a j , la duración del servicio en i y el tiempo total acumulado al inicio del servicio en i (w_{ik}) es mayor que la ventana de tiempo de j o del cliente siguiente.

$$a_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} ; \forall k \in K, \quad i \in N$$

(7)

Para un vehículo k dado, la restricción (7) hace que $w_{ik} = 0$ cada vez que el cliente i no es visitado por el vehículo k . Igualmente, garantiza que el inicio de servicio en el cliente i se lleve a cabo dentro de la ventana de tiempo correspondiente.

$$E_i \leq w_{ik} \leq L ; \forall k \in K, \quad i \in \{0, n + 1\}$$

(8)

La restricción (8) hace que cada cliente sea servido dentro del intervalo de tiempo general $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$, asociada a los nodos de llegada y de salida (depósito).

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq Q ; \forall k \in K$$

(9)

La restricción (9) indica que la suma de las demandas de los clientes de una ruta no debe exceder la Capacidad del vehículo k .

$$w_{ik} \geq 0 ; \forall k \in K, \quad (i, j) \in A$$

(10)

La restricción (10) impone condiciones de no negatividad a las variables del modelo

$$x_{ijk} \in \{0,1\}; \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (11)$$

La restricción (11) indica la naturaleza binaria de las variables.

En resumen, el VRPTW se formula formalmente así:

Minimizar

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} x_{i,jk}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} &= 1; \forall i \in N \\ \sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0jk} &\leq 1; \forall k \in K \\ \sum_{i \in \Delta^-(n+1)} x_{i,n+1,k} &\leq 1; \forall k \in K \\ \sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{ijk} &= 0; \forall k \in K, j \in N \\ w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} &\leq (1 - x_{ijk})M_{ij}; \forall k \in K, (i,j) \in A \\ \alpha_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq w_{ik} &\leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk}; \forall k \in K, i \in N \\ E_i \leq w_{ik} \leq L; \forall k \in K, i &\in \{0, n+1\} \\ \sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} &\leq Q; \forall k \in K \\ w_{ik} \geq 0; \forall k \in K, (i,j) &\in A \\ x_{ijk} \in \{0,1\}; \forall k \in K, (i,j) &\in A \end{aligned}$$

(Paolo Toth, 2002)

8.3 Formulación (TSPTW) Agente viajero con ventanas de tiempo

El TSPTW puede ser formulado como un grafo $G = (V,A)$ donde $V = \{1, 2, \dots, n\}$ es el conjunto de clientes a visitar, 0 representa el almacén, y $A = \{(i,j): i,j \in V \cup \{0\}, i \neq j\}$ es el conjunto de arcos entre clientes. El coste de viajar desde i hasta j se representa por c_{ij} que incluye tanto el tiempo de servicio del cliente i como el tiempo necesario para viajar de i a j . Cada cliente

o nodo tiene asociado una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ donde a_i y b_i representan el tiempo de inicio y final de servicio, respectivamente. El problema consiste en encontrar una ruta Hamiltoniana que empiece y termine en el almacén, satisfaga todas las restricciones de ventanas de tiempo y minimice la distancia total recorrida.

Siendo i igual a 1 si y sólo si el cliente j (o el almacén en caso de que $j = 0$) es visitado inmediatamente después del cliente i (o el almacén en caso de que $i = 0$) y 0 en caso de que no se cumplan esta condición, β_i el tiempo en el que el cliente i es visitado (tiempo inicio servicio) y M una constante muy grande; el TSPTW puede formularse como (Pérez de Vargas Moreno, 2015)

Minimizar

$$\sum_{i \in V \cup \{0\}} \sum_{j \in V \cup \{0\}} C_{ij} x_{i,jk}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in V \cup \{0\}, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \cup \{0\} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{0\}, j \neq i} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \cup \{0\} \quad (2)$$

$$\beta_j \geq \beta_i + C_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in V \cup \{0\}, j \neq 0 \quad (3)$$

$$\alpha_i \geq \beta_i \leq b_i \quad \forall i \in V \cup \{0\} \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \cup \{0\}$$

$$\beta_i \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \forall i \in V \cup \{0\}$$

Como vemos la función objetivo es minimizar el coste de la ruta. Las restricciones (1) y (2) indican que cada cliente ha de ser visitados exactamente una vez. La restricción (3) asegura que el tiempo de llegada de un cliente no sea menor que el tiempo de visita del cliente anterior inmediato ($\beta_j = \text{tiempo de llegada}$). Además, gracias a que todos los costes son positivos en la restricción (3) se evita la formación de subtours. Finalmente, la restricción (4) es la que impone que se cumplan las ventanas de tiempo.

9 Evaluación métodos de solución de problemas de ruteo de vehículos.

A continuación, se presenta un compendio con las definiciones de conceptos claves en los cuales se enmarca el tema de investigación.

9.1 Métodos de Solución

En lo que concierne a los métodos de solución, para el VRP se han clasificado tres categorías, las cuales son métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas.

9.1.1 Métodos Exactos (generalidades y tipos).

Los métodos exactos se dividen en; primero método de búsqueda de árbol, como la ramificación y vinculación, segundo programación dinámica y tercero métodos enteros que son basados en programación. Aunque estos métodos producen soluciones óptimas, pueden ser computacionalmente costosos, incluso para instancias relativamente pequeñas. (Francisco Baptista Pereira, 2009)

9.1.2 Heurísticas (generalidades y tipos).

Las heurísticas son procedimientos que proporcionan soluciones de aceptable calidad mediante una exploración limitada del espacio de búsqueda. La mayoría de las heurísticas clásicas para resolver el VRP fueron desarrolladas entre 1960 y 1990. Estos métodos parten de rutas que contienen un único nodo para encontrar el mejor par (nodo, ruta) que representa la mejor intersección. Los métodos heurísticos se han clasificado en; métodos constructivos, métodos de dos fases y heurísticas de mejora. (Linda Bibiana Rocha Medina, 2011)

Dependiendo de cómo acometen su labor, las heurísticas (para el problema de rutas de vehículos) pueden clasificarse, como se expone:

Constructivas. No parten de una solución factible, sino que la van elaborando a medida que progresan. Una de las más conocidas es la heurística de ahorros, donde se crean n rutas factibles, y se va probando a unir una ruta que termina en i con otra que comienza en j , agregando el arco $[i, j]$, calculando el ahorro de cada posible movimiento. Otro ejemplo típico son las heurísticas angulares o de pétalo, donde las soluciones se van agregando en el orden angular que presentan respecto al centro de distribución, respetando las restricciones de capacidad, o de distancia máxima de viaje, según sea el caso. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

De mejora. Trabajan sobre una solución factible. Existen del tipo intra-ruta, que mueven arcos dentro de una misma ruta, entre los que se encuentran las heurísticas 2-opt, 3-opt y más

generalmente la heurística de Lin-Kernighan y extra-ruta que los intercambian entre dos o más rutas distintas, como la heurística 2-swap. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Técnicas de relajación. son métodos asociados a la programación lineal entera. La más conocida es la llamada Relajación Lagrangeana, que consisten en descomponer un modelo lineal entero en un conjunto de restricciones difíciles y otras más fáciles, relajando las primeras, al pasarlas a la función objetivo multiplicándolas por una penalidad, en forma análoga al método de multiplicadores de Lagrange. Esto sirve para obtener cotas al problema original, acelerando el proceso de resolución. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Heurística de Barrido o Sweep. En la heurística de barrido los clusters se forman girando una semirrecta con origen en el depósito e incorporando los clientes “barridos” por dicha semirrecta hasta que se viole la restricción de capacidad. Cada cluster es luego ruteado resolviendo un TSP de forma exacta o aproximada. Este algoritmo puede aplicarse en problemas planos, es decir, en los que cada nodo se corresponde con un punto en el plano y las distancias entre ellos se definen como la distancia euclídea. Se supone que cada cliente i está dado por sus coordenadas polares las cuales se representan de la siguiente manera (ρ_i, θ_i) en un sistema que tiene al depósito como origen.

Por la forma en que se generan los clusters, las rutas obtenidas no se superponen, lo que puede ser bueno en algunos casos. Se propone además un procedimiento para eliminar clientes de cada ruta finalizada e insertar clientes que aún no fueron visitados, en el caso que esto disminuya el costo de la ruta. Los clientes eliminados de la ruta serán barridos por alguna ruta posterior. (Olivera, 2004)

9.1.3 Metaheurísticas (generalidades y tipos)

En los primeros años, la heurística especializada solía desarrollarse para resolver problemas complejos de optimización combinatoria, como el VRP. Luego, se diseñaron esquemas de solución más genéricos, llamados metaheurísticos por Fred Glover en 1986. El desafío es entonces adaptar los esquemas de solución genéricos a los problemas en cuestión. Este ejercicio generalmente requiere mucho menos trabajo que desarrollar una heurística especializada desde cero. Además, una buena implementación metaheurística puede proporcionar soluciones casi óptimas en tiempos de cálculo razonables. Los problemas de enrutamiento de vehículos, en particular, exhiben un registro impresionante de implementaciones metaheurísticas exitosas. (Bruce Golden, 2008)

Dentro de las características deseables de una metaheurística, están:

- Ser algoritmos de optimización global. Esto implica la existencia de mecanismos que le permitan escapar de óptimos locales, ya sea perturbando la solución actual, generando basada en otras anteriores, aceptando con una cierta probabilidad alguna que no mejora la evaluación de la función objetivo, etc.
- Brindar suficiente libertad a quien la implemente, mediante la posibilidad de trabajar con distintos parámetros, estrategias de paralelización, adición de heurísticas complementarias, etc.
- Lograr un rendimiento consistente y estable en los problemas de la clase que resuelven. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Algunas de las metaheurísticas más comúnmente utilizadas en problemas de optimización combinatoria, se encuentran:

Algoritmos genéticos. Corresponden a una clase de algoritmos evolutivos. Cada solución del problema se codifica en un cromosoma, donde cada elemento de éste se le llama gen. El conjunto de cromosomas forman una población, que para una iteración corresponde a una generación. Se les aplican diversos operadores, para generar nuevos individuos, que son agregados a la población, en un proceso iterativo que trata de escapar de mínimos locales. Han tenido éxito en resolver problemas de rutas de vehículos, así como de localización y cobertura, entre muchos otros. Han sido aplicados recientemente en su forma pura para el VRP original y en forma híbrida, combinando características de otras metaheurísticas. Por otra parte, se ha trabajado en ellos como algoritmos meméticos (algoritmos genéticos con algún procedimiento adicional de búsqueda local). (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Búsqueda en vecindarios variables. Comúnmente denominada VNS por su sigla en inglés, parte desde una solución inicial aleatoria, a partir de la que se van explorando, usando algún algoritmo de búsqueda local eficiente, vecindarios progresivamente más lejanos (y grandes); en caso de que se encuentre una mejor solución, la búsqueda se mueve hasta ella, reiniciándose la búsqueda en los vecindarios de esta. Esta metaheurística nace con el tiempo un conjunto de variantes para la resolución de problemas muy grandes o para lograr mejoras de velocidad. Es un método de trayectoria. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Recocido simulado. Se trata de asemejar el proceso de manufactura donde un material (metal) es calentado hasta altas temperaturas, para luego ser enfriado lentamente, de tal manera que sus estructuras cristalinas se reorganicen en la configuración de mínima energía. En la versión

computacional, la temperatura es discretizada, y para realizar una analogía con la situación física, se admiten soluciones peores que la mejor encontrada con una probabilidad proporcional a la distribución termodinámica de Boltzmann, permitiendo escapar de óptimos locales. Es fácil de implementar, y posee varios parámetros que se pueden cambiar para buscar mejoras, como el patrón de enfriamiento, o la probabilidad de aceptar una peor solución. Es un método de trayectoria. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Búsqueda tabú. En esta metaheurística, se busca en la proximidad de la solución actual otra que mejore la evaluación de la función objetivo, almacenando las soluciones anteriores (o alguna característica de éstas), las que son marcadas como tabú. Esto evita que el algoritmo entre en un ciclo, pudiendo escapar de óptimos locales. Era la metaheurística que obtenía las mejores soluciones para los problemas de gran tamaño. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Colonias de hormigas. Basadas en la naturaleza, varias hormigas (procesos, hilos, agentes, etc.) exploran distintas direcciones del espacio de soluciones factibles, dejando tras de sí un rastro de feromonas, que le indican a la siguiente hormiga las direcciones más ‘interesantes’ de ser exploradas, las que toma con una probabilidad proporcional al nivel de feromona existente, en un intento por no caer en un óptimo local. Junto con esto, por su naturaleza multi-agente de búsqueda aparece como una estrategia trivialmente paralelizable. Además, los niveles de feromonas disminuyen tras cada iteración (se evapora). Como trabaja con distintos agentes, se le considera un algoritmo basado en poblaciones. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

Enjambre de partículas. Se busca simular la búsqueda realizada por entes colaborativos, considerando las interacciones entre ellos y cómo se orientan hacia una búsqueda eficiente. (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009)

A continuación de nombraran algunos autores que utilizaron algunas de estas metaheurísticas para sus trabajos de investigación:

- (Jun , Kien , Kim , & Kwong , 2014) presenta un problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo con flota heterogénea, donde estas ventanas son limitadas junto con el número de vehículos. Proponen un método metaheurístico, el cual es uno de los más usados como es la búsqueda tabú para resolver el problema para evaluarlo se realizan experimentos de casos de prueba lo cual arroja que el método propuesto da resultados razonables para estos problemas.

- (Yunyun , Zehua , Ping , & Jianhua , 2017) La externalización de las operaciones logísticas se ha convertido en una forma eficiente de reducir los costos de transporte esto puede modelarse como una variante de problema de ruteo de vehículos abierto donde en este caso a diferencia de nuestro caso de estudio los vehículos no regresan al depósito después de visitar los clientes, describieron el modelo matemático del problema de enrutamiento de vehículo abierto verde con ventanas de tiempo (GOVRPTW) basado en el modelo de emisión modal integral (CMEM). Ellos diseñaron un algoritmo de búsqueda tabú quien involucro la búsqueda de vecindario para poderlo resolver.
- (Ilker & Nursel , 2014) presentaron un algoritmo metaheurístico híbrido avanzado (HMA) para resolver el problema de enrutamiento del vehículo con backhauls y ventanas de tiempo (VRPBTW). Donde el objetivo era minimizar la distancia total.
- (Huey, Huey, & Chia, 2011) abordan el problema de enrutamiento del vehículo del alimentador de línea con depósitos virtuales y ventanas de tiempo LFVRPTW donde los vehículos pequeños en ruta pueden recargar los productos desde el depósito físico o desde el vehículo más grande en un depósito virtual antes de continuar. Para esto propusieron una solución heurística de dos fases con búsqueda de tabú para resolver este problema. Los resultados de las pruebas muestran que el LFVRPTW funciona mejor que el problema de enrutamiento del vehículo con las ventanas de tiempo en términos de valor objetivo y la cantidad de vehículos pequeños despachados.
- (Ali , Mahdi , & Fahime , 2017) El cross-docking es una nueva política de almacenamiento en logística que se usa ampliamente en todo el mundo ellos presentan un problema de enrutamiento y programación de vehículos con cross-docking y ventanas de tiempo en una cadena de suministro de tres niveles que considera la satisfacción del cliente y usan a un modelo de programación lineal de enteros mixtos para este problema para minimizar el costo de transporte y las entregas anticipadas / tardías con la programación de vehículos de entrada y salida para aumentar la satisfacción del cliente, desarrollando un algoritmo genético de dos fases (GA) para el problema.
- (Merve & Bülent , 2016) El problema de enrutamiento de vehículos eléctricos con ventanas de tiempo (EVRPTW) es una extensión del conocido problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) donde la flota se compone de vehículos eléctricos (EV). Formulan este problema como un programa lineal de enteros mixtos 0–1 y desarrollan un

algoritmo de búsqueda de gran vecindario adaptable (ALNS) para resolverlo de manera eficiente.

- (Rincon Garcia, Waterson, & Cherrett, 2016) presentan un algoritmo metaheurístico híbrido para resolver el problema de enrutamiento del vehículo dependiente del tiempo con ventanas de tiempo difícil este algoritmo presentado hace uso de los enfoques de búsqueda de vecindarios grandes y las técnicas de búsqueda de vecindarios variables para guiar la búsqueda. Una primera etapa está diseñada específicamente para reducir la cantidad de vehículos requeridos en un espacio de búsqueda mediante la reducción de las penalizaciones generadas por las infracciones de la ventana de tiempo con los procedimientos de búsqueda de vecindarios grandes y una segunda etapa minimiza la distancia de viaje y el tiempo de viaje en un espacio de búsqueda "siempre factible".
- (Shaoqiang , Cuicui , Yanan , & Linjie , 2016) se maneja problema de entrega de alimentos al estilo occidental en la ciudad de Dalian, China, que puede describirse como un problema de ruta de un vehículo con ventanas de tiempo. Desarrollan un modelo lineal entero para el problema, y proponen un algoritmo mejorado de colonia de abejas artificiales, que posee una nueva estrategia llamada estrategia adaptativa, una operación de cruce y una operación de mutación para resolver el problema.
- (Armas & Melián Batista, 2015) Un problema dinámico de enrutamiento de vehículos ricos en ventanas de tiempo, donde tuvieron en cuenta varias limitaciones reales, como la flota heterogénea de vehículos, las ventanas de tiempo múltiple y flexible y las prioridades de los clientes. El uso de métodos exactos no es una solución adecuada para este tipo de problemas, dado que la llegada de una nueva solicitud debe ir seguida de una rápida fase de optimización para incluirla en la solución en cuestión. Por lo tanto, propusieron un procedimiento metaheurístico basado en la búsqueda de vecindad variable para resolver este problema en particular.
- (Sutherland, Zhao, Mu, & Wang, 2015) abordan una variante del problema de enrutamiento del vehículo en el que los clientes requieren la recolección y entrega simultáneas de productos durante ventanas de tiempo individuales específicas (VRPSPDTW). Emplearon un modelo general de programación de enteros mixtos para minimizar el costo de enrutamiento debido a: el costo de los vehículos y el costo de viaje de los vehículos. Desarrollaron y aplicaron un algoritmo paralelo de recocido simulado (p-SA) que incluye una heurística basada en la

inserción de la capacidad residual y la sobrecarga radial (RCRS) para resolver este problema de optimización NP-hard.

- (Kassem & Chen, 2013) estudiaron un problema de enrutamiento del vehículo con la recogida y entrega simultáneas en la optimización de la red logística de circuito cerrado. Proponen un modelo de programación de enteros mixtos para formular el problema considerado desarrollan un enfoque de solución heurística para resolver el modelo debido a la naturaleza difícil de NP de resolver el modelo. La solución heurística se utiliza como una solución inicial de un procedimiento de recocido simulado para soluciones mejoradas.

9.2 Comparación Métodos de Solución

En la siguiente tabla se encontrará una breve descripción de los métodos de solución y porque cada uno de estos se aplicó o no al presente trabajo de grado

Tabla 1.

Métodos de Solución

Metaheurísticas	Cuando se empezó la investigación de este proyecto se quería realizar la solución del problema mediante la metaheurística Búsqueda Tabú, una de las más utilizadas como se puede observar en la siguiente base de datos, sin embargo al momento de entender su funcionamiento notamos que es bastante extensa y no era viable realizarla por el corto tiempo para el desarrollo del proyecto.
Métodos exactos	Se probaron en Excel y en Xpress sin embargo, con ninguno fue posible resolver el CVRPTW. Por la complejidad que representan las ventanas de tiempo se llevó a cabo la programación entera para el modelo pero se empleó un método de dos fases para la solución.
Heurísticas	Las Heurísticas son métodos de solución sencillos en comparación con las metaheurísticas por lo que se dispuso de un pseudocódigo de fácil programación en Visual Basic de Excel como fase inicial correspondiente al algoritmo de barrido este se implementó para hacer una agrupación de rutas factibles que pudieran ser diseñadas en la segunda fase, es decir definir el orden de visitas.

Nota: Fuente propia

9.3 Base de datos metaheurísticas

Con el fin de evaluar los posibles métodos de solución al modelo del CVRPTW se llevó a cabo una taxonomía de los métodos empleados en diferentes casos de estudio sobre el CVRPTW del año 2008 al año 2018 e indexados en la plataforma Scopus.

Como se explica en la tabla anterior se quería realizar la solución de este problema mediante una metaheurística por lo que se realizó una investigación de diferentes artículos para mirar que metaheurística era la más utilizada y así basarnos en esta. Al realizar este proceso se obtuvo la Tabla2. Ubicada en la sección de anexos, donde se encuentran 117 artículos donde se tiene la información del título de estos, autores, métodos de solución aplicados y el link donde se pueden encontrar estos documentos.

Analizando los datos recopilados, se concluye que la Búsqueda Tabú ha sido el método más utilizado para la solución del CVRPTW sin embargo representa un alto grado de complejidad, de acuerdo con lo anterior se optó por resolver el problema en dos fases, el algoritmo de barrido y el TSP.

10 Implementación método de solución para el CVRPTW

Inicialmente se realizó el modelo matemático del CVRPTW en Excel para resolver este por medio de Solver, la prueba se hizo con 9 nodos (el nodo 0 y 10 representan el depósito) de los 123 que tenemos en este caso de estudio; se decidió tomar 9 nodos como un número al azar el cual no fuera alto y que nos permitiera realizar la programación respectiva y las pruebas para esta, después de los intentos se llegó a la conclusión que Solver no cuenta con la capacidad de resolver un problema de este magnitud debido a la cantidad de restricciones que contiene.

De la figura 6 a la 8 se puede observar como quedo la configuración del excel con los nueve nodos donde tenemos el nodo 0 y 10 como depósito, allí están modeladas cada una de las restricciones junto con la función objetivo.

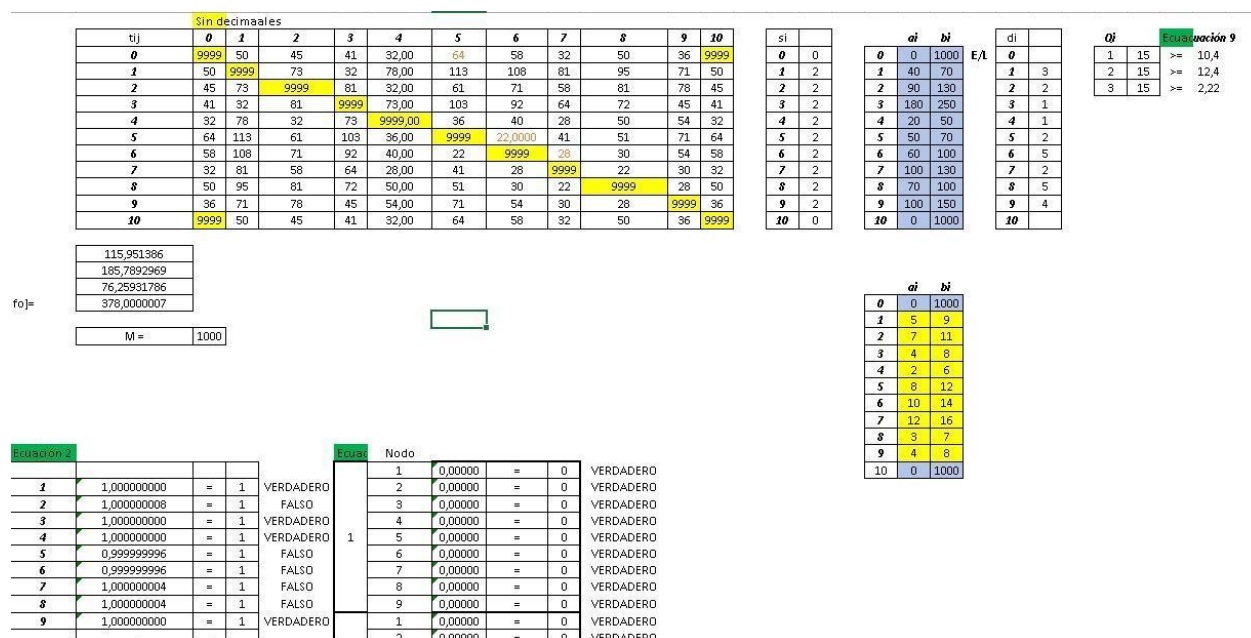


Figura 6. Modelo VRPTW en Excel. Producción propia.

Xijk												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	0	0	0,125	0	0	0	0	0	0	0,975	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12545
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,948	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0,948	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,87455
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0,874	0	0,125	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0,847	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,87431	0
	3	0	0,847	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12569
	5	0	0	0	0	0	0,965	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0,965	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0,052	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0,052	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	2E-04	0	0,874	0	0	0	0	0,125	0
	1	0	0	0	0,153	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00023
	3	0	0,153	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,87431
	5	0	0	0	0	0	0	0,024	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0,024	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12545
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

i		wik		
0	0	0,0000	0,0000	
1	1	0,0000	0,0000	
2	2	11,2909	16,3099	
3	3	0,0000	0,0000	
4	4	0,0000	0,0000	
5	5	0,0000	64,0000	
6	6	0,0000	88,0000	
7	7	94,7573	118,0000	
8	8	66,3301	0,0000	
9	9	87,4545	0,0000	
10	10	0,0000	152,0000	
2	0	0	0,0000	
	1	1	33,8947	0,0000
	2	2	78,6981	0,0000
	3	3	152,5263	0,0000
	4	4	2,5138	39,6228
	5	5	48,3168	0,0000
	6	6	57,2922	0,0000
	7	7	5,2427	0,0000
	8	8	3,6699	85,6228
	9	9	0,0000	115,6228
	10	10	0,0000	153,6783
3	0	0	0,0000	
	1	1	6,1053	52,0000
	2	2	0,0210	127,0000
	3	3	27,4737	210,0000
	4	4	17,4862	0,0000
	5	5	1,6932	0,0000
	6	6	2,0186	0,0000
	7	7	0,0000	0,0000
	8	8	0,0000	0,0000
	9	9	12,5455	0,0000
	10	10	0,0000	259,2311

i		wik=ai		wik=bi		
0	0	0	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	
2	2	11,2909	16,3099	0	0	
3	3	0	0	0	0	
4	4	0	0	0	0	
5	5	0	0	0	0	
6	6	0	0	0	0	
7	7	94,7573	123,1845	0	0	
8	8	66,3301	94,7573	0	0	
9	9	87,4545	131,1818	0	0	
10	10	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	
	1	1	33,89474	59,31572	0	0
	2	2	78,68807	113,6096	0	0
	3	3	152,5263	211,8421	0	0
	4	4	2,513761	6,284404	0	0
	5	5	48,3168	67,64356	0	0
	6	6	57,2922	96,63964	0	0
	7	7	5,242718	6,815834	0	0
	8	8	3,669903	5,242718	0	0
	9	9	0	0	0	0
	10	10	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	
	1	1	6,105263	10,68421	0	0
	2	2	0,021018	0,030359	0	0
	3	3	27,47368	38,1579	0	0
	4	4	17,48624	43,7156	0	0
	5	5	1,693168	2,356436	0	0
	6	6	2,018602	3,366337	0	0
	7	7	0	0	0	0
	8	8	0	0	0	0
	9	9	12,54546	18,81818	0	0
	10	10	0	0	0	0

dj		0
1	*	1
2	*	1
3	*	1
4	*	1
5	*	1
6	*	1
7	*	1
8	*	1
9	*	1

Va en el solve
wik=E
wik=L

Figura 7. Modelo VRPTW en Excel. Producción propia.

Eq.8	Xijk	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0		-950	-841	-959	-968	-936	-942	-1063	-1016	-177		
	1		-948		-936	-966	-920	-885	-890	-1012	-969	-1014	-948
	2		-942	-914		-906	-955	-926	-916	-1023	-972	-996	-816
	3		-957	-966	-928		-925	-895	-906	-1029	-992	-1040	-957
	4		-966	-920	-977	-925		-962	-958	-1065	-1014	-1031	-966
	5		-934	-885	-948	-895	-962		-976	-1052	-1013	-1014	-934
	6		-940	-890	-938	-906	-958	-976		-1065	-1034	-1031	-940
	7		-871	-822	-857	-839	-875	-862	-875		0	-961	-871,24
	8		-882	-837	-862	-860	-882	-881	-902	-57		-991	-882
	9		-875	-840	-844	-866	-857	-840	-857	-975	-949		0
	10		-950	-966	-959	-968	-936	-942	-1063	-1016	-1051		
2	0		-984	-159	-1112	-845	-984	-1000	-973	-954	-964		
	1		-914		-970	-237	-889	-899	-914	-888	-873	-893	-914
	2		-874	-880		-991	-890	-907	-906	-867	-842	-841	0
	3		-804	0	-843		-775	-791	-811	-787	-777	-800	-804
	4		-963	-951	-1042	-1075		-1008	-1013	-973	-949	-941	-838
	5		-886	-871	-967	-999	-916		-19	-914	-902	-879	-886
	6		-882	-866	-948	-1001	-903	0		-917	-914	-886	-882
	7		-961	-946	-1013	-1081	-967	-1000	-1023		-922	-963	-961
	8		-944	-933	-992	-1075	-947	-992	-1022	-925		-966	-944
	9		-962	-961	-999	-1106	-947	-975	-1002	-973	-974		-962
	10		-984	-1034	-1112	-971	-984	-1000	-973	-954	-964		
3	0		-956	-955	-986	-111	-938	-944	-968	-950	-851		
	1		-942		-919	-835	-931	-881	-886	-911	-897	-933	-942
	2		-953	-931		-944	-983	-939	-929	-940	-917	-933	-953
	3		-930	-792	-890		-915	-869	-881	-907	-899	-938	-930
	4		-949	-909	-949	-935		-946	-943	-953	-931	-939	-74
	5		-932	-889	-935	-921	-978		-943	-955	-945	-938	-932
	6		-938	-894	-925	-931	-973	-942		-968	-966	-955	-938
	7		-966	-923	-940	-961	-987	-959	-972		-976	-981	-966
	8		-948	-909	-917	-953	-965	-949	-970	-976		-983	-948
	9		-949	-921	-907	-968	-949	-916	-933	-955	-957		-824
	10		-956	-955	-986	-985	-938	-944	-968	-950	-977		

Figura 8. Modelo VRPTW en Excel. Producción propia.

A continuación, en la figura 9 se puede detallar como quedo la configuración del modelo en solver. Allí se colocan datos como la función objetivo, si este es maximizar o minimizar que en nuestro caso de estudio es minimizar y todas las restricciones de este.

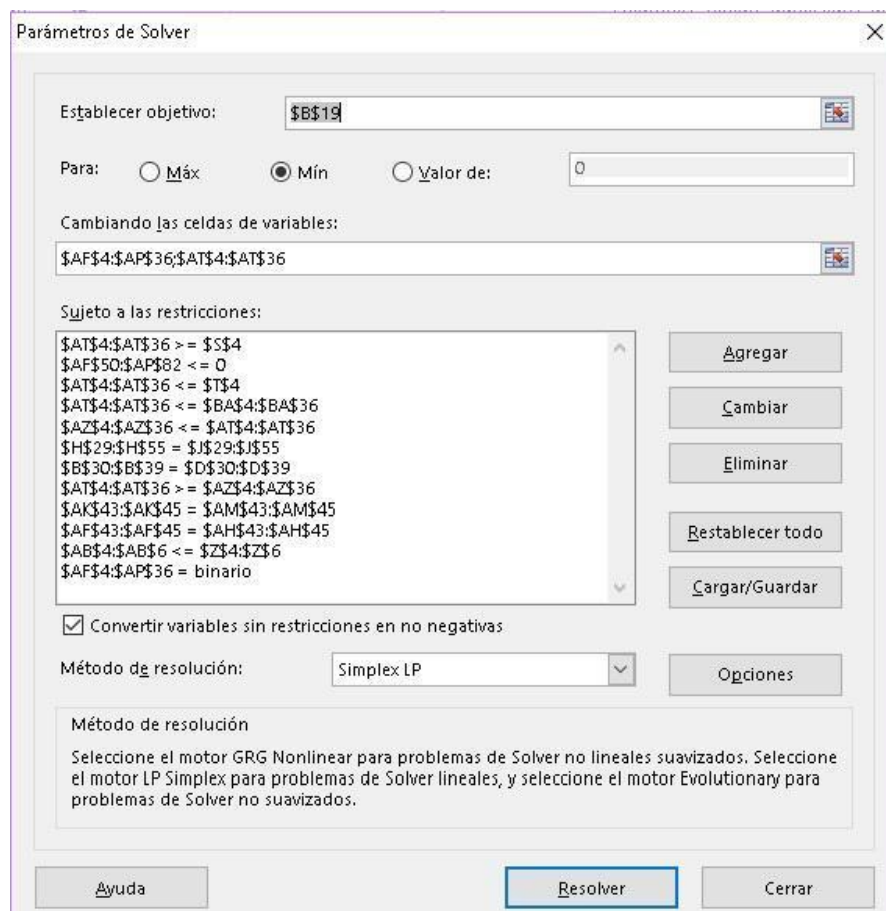


Figura 9. Modelo VRPTW configuración Solver. Producción propia.

La figura 10 nos muestra que el Open Solver a la configuración anterior no encontró una solución factible con 9 nodos donde nuestro caso de estudio es de 123 nodos.

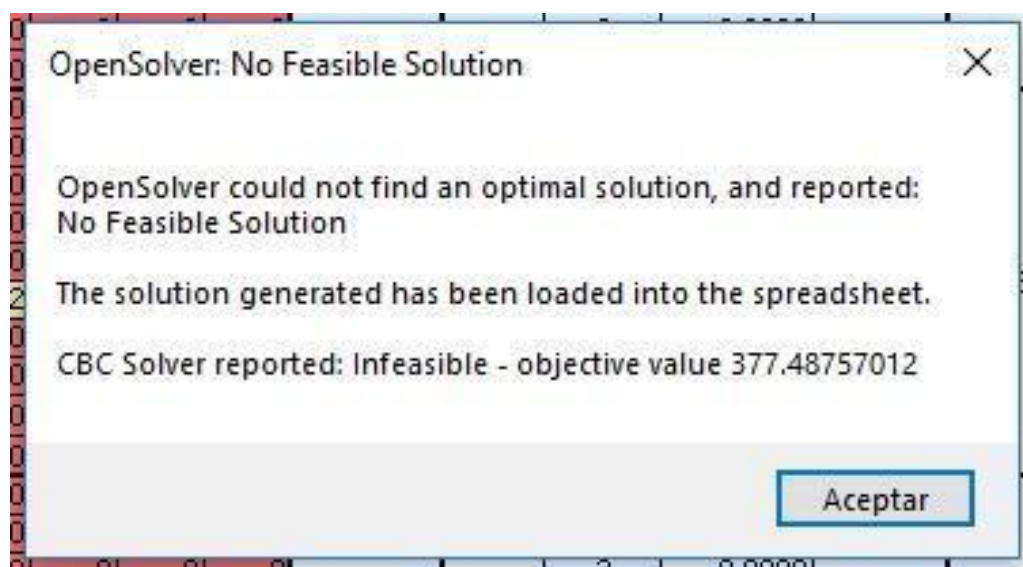


Figura 10. Open Solver – No solución. Producción propia.

Al no encontrarse una solución factible por medio del Open Solver se optó por realizar el modelo matemático del VRPTW en Xpress pero este tampoco se pudo solucionar debido a cantidad de filas. por esta razón se decidió solucionar este problema en dos etapas: una primera fase de agrupamiento o creación de clústeres y luego se soluciona por cada cluster un problema de diseño de rutas por medio del problema de agente viajero con ventanas de tiempo (TSPTW). La fase de agrupamiento se soluciona con el algoritmo de barrido, el cual fue programado en Visual Basic de Excel, luego la segunda fase diseño de rutas se soluciona con programación lineal entera, la cual se programa en el software FICO Xpress.

10.1 Algoritmo de barrido

A continuación, se muestra el pseudocódigo para agrupar a los clientes según el algoritmo de barrido. El primer paso es el proceso de inicialización, que consiste en calcular las coordenadas polares y ordenarlas en orden ascendente. Además, los grupos $L = \{l_0, l_1, \dots, l_k\}$, están ordenados por tiempo programado. El segundo paso es la construcción del cluster. Comienza desde un punto de origen, una línea recta que gira y crea una zona en la que se deben asignar los clientes. El área abordada en el proceso de barrido constituye el grupo, siempre que cumpla con la restricción de capacidad indicada para cada uno de ellos. El algoritmo selecciona v_j entre los nodos no agrupados e incluye v_j a l_0 solo si la demanda de v_j no excede la capacidad disponible de l_0 y su ventana de tiempo pertenece al calendario laboral de l_0 . Si se agrega v_j al cluster l_0 , su capacidad se reduce por la demanda de v_j . Los mismos procesos anteriores se llevan a cabo hasta que la capacidad disponible de l_0 se vuelve más pequeña que la demanda del nodo más cercano desde GC (l_0). Luego seleccionamos el siguiente grupo, l_1 y el proceso se repite hasta que no exista ningún nodo no visitado, es decir, i.e. $v_p = \emptyset$. Al igual que el algoritmo basado en centroide, las heurísticas de barrido se modificaron para tener en cuenta las ventanas de tiempo asociadas con los clientes y los horarios disponibles de los vehículos. La complejidad del tiempo de este algoritmo es $O(n^2)$. (López-Santana, Rodríguez-Vásquez, & Méndez-Giraldo, 2018).

- 1: Primer Paso // Inicialización
- 2: Establecer $i=0$ y $Q =$ capacidad del vehículo
- 3: Calcular las coordenadas polares de los clientes (p_i, θ_i)
- 4: Ordenar L_k clúster por horario
- 5: Ordenar clientes según valor θ_i
- 6: Si $(\theta_i = \theta_{i+1})$

- 7: Ordenar clientes en orden ascendente según el valor
- 8: Terminara si
- 9: Fin del primer pasó
- 10: Segundo paso // Generación de Cluster
- 11: Para todos $k \in l_k$ // Del primer al último grupo en l_k
- 12: Seleccione un cliente inicial v_j
- 13: $k = 0$ y $l_k = \{v_j\}$
- 14: $Q_{l_k} = Q_{l_k} - d(v_j)$
- 15: $N_p = N_p - j$
- 16: Mientras ($N_p \neq \emptyset$)
- 17: Seleccione el siguiente cliente v_{j+1}
- 18: Si ($[e, l]_{v_{j+1}} \in [e, l]_{l_k}$ y $d(v_{j+1}) \leq Q_{l_k}$)
- 19: $l_k = l_k \cup \{v_{j+1}\}$
- 20: $Q_{l_k} = Q_{l_k} - d(v_j)$
- 21: $N_p = N_p - j$
- 22: Terminara si
- 23: Terminar mientras
- 24: $k = k + 1$
- 25: Final para
- 26: Final segundo pasó

Tabla 2.

Coordenadas de los clientes.

ID	CX2	CY2	HORA INICIO	HORA FIN	VENTANA DE TIEMPO	PESO TOTAL TULAS	Tipo de Tula	CENTRO DE OPERACIÓN ASIGNADO
1	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:05	16:25	0:20:00	2	Liviana	Centro
3	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:30	16:40	0:10:00	3	Liviana	Centro
4	-7,xxxxx	4,6xxxxx	16:35	16:45	0:10:00	3	Liviana	Centro
5	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:40	16:50	0:10:00	2	Liviana	Centro
6	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:00	16:10	0:10:00	1	Liviana	Centro
7	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:10	16:20	0:10:00	1	Liviana	Centro
8	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:30	16:40	0:10:00	2	Liviana	Centro
9	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:50	17:00	0:10:00	3	Liviana	Centro
10	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:55	17:05	0:10:00	3	Liviana	Centro
11	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:05	17:15	0:10:00	2	Liviana	Centro
12	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:15	17:25	0:10:00	3	Liviana	Centro
13	-7,xxxxx	4,6xxxxx	16:35	16:45	0:10:00	2	Liviana	Centro
14	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:40	16:50	0:10:00	3	Liviana	Centro
15	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:45	16:55	0:10:00	3	Liviana	Centro
16	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:50	17:00	0:10:00	1	Liviana	Centro
17	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:00	17:10	0:10:00	2	Liviana	Centro
18	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:30	16:40	0:10:00	3	Liviana	Centro
19	-7,xxxxx	4,6xxxxx	16:40	16:50	0:10:00	2	Liviana	Centro
20	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:45	16:55	0:10:00	1	Liviana	Centro
21	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:50	17:00	0:10:00	1	Liviana	Centro
22	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:55	17:05	0:10:00	3	Liviana	Centro
23	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:00	17:10	0:10:00	2	Liviana	Centro
24	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:10	17:20	0:10:00	2	Liviana	Centro
25	-7,xxxxx	4,6xxxxx	17:20	17:30	0:10:00	3	Liviana	Centro
26	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:40	16:50	0:10:00	3	Liviana	Centro
27	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:50	17:00	0:10:00	2	Liviana	Centro
29	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:00	17:10	0:10:00	2	Liviana	Centro
30	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:05	17:15	0:10:00	2	Liviana	Centro
31	-74,xxxxx	4,6xxxxx	17:20	17:30	0:10:00	3	Liviana	Centro
32	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:25	16:35	0:10:00	1	Liviana	Centro
33	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:45	16:55	0:10:00	1	Liviana	Centro
34	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:50	17:00	0:10:00	2	Liviana	Centro
35	-74,xxxxx	4,6xxxxx	16:55	17:05	0:10:00	2	Liviana	Centro

Nota: Fuente propia.

En la Tabla 2 podemos encontrar una base de datos que se manejó donde se pueden observar algunos de los 123 clientes que esta empresa maneja en la zona centro donde se utilizan sus coordenadas latitud y longitud junto con las ventanas de tiempo que se tienen pactadas con cada uno de los clientes. El tipo de tula que se debe manejar por cada uno de ellos y el peso respectivos de estas.

Tabla 3.

Cluster Análisis Barrido.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Pun	CX	CY	HorIni	HoraFin	Rango	Peso	Centro de Operacion	Clust
2	59	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:00:00 p. m.	5:10:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	10C
3	68	-74,XXXXX2	4,XXXXXX	4:30:00 p. m.	4:40:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	10C
4	74	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:35:00 p. m.	5:45:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	10C
5	76	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	4:25:00 p. m.	4:35:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	10C
6	83	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:00:00 p. m.	5:10:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	10C
7	100	-74,XXXXX5	4,XXXXXX	3:00:00 p. m.	3:10:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	10C
8	69	-74,XXXXX1	4,XXXXXX	4:45:00 p. m.	4:55:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	11C
9	75	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:40:00 p. m.	5:50:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	11C
10	82	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	4:55:00 p. m.	5:05:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	11C
11	88	-74,XXXXX7	4,XXXXXX	4:35:00 p. m.	4:45:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	11C
12	90	-74,XXXXX1	4,XXXXXX	5:05:00 p. m.	5:15:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	11C
13	102	-74,XXXXX5	4,XXXXXX	3:20:00 p. m.	3:30:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	11C
14	127	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:20:00 p. m.	5:30:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	11C
15	73	-74,XXXXX2	4,XXXXXX	5:30:00 p. m.	5:40:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	12C
16	78	-74,XXXXX5	4,XXXXXX	4:35:00 p. m.	4:45:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	12C
17	89	-74,XXXXX2	4,XXXXXX	4:45:00 p. m.	4:55:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	12C
18	111	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	4:25:00 p. m.	4:35:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	12C
19	115	-74,XXXXX2	4,XXXXXX	4:50:00 p. m.	5:00:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	12C
20	124	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:05:00 p. m.	5:15:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	12C
21	80	-74,XXXXX7	4,XXXXXX	4:45:00 p. m.	4:55:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	13C
22	84	-74,XXXXX5	4,XXXXXX	5:05:00 p. m.	5:15:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	13C
23	85	-74XXXXX3	4,XXXXXX	5:10:00 p. m.	5:20:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	13C
24	93	-74,XXXXX7	4,XXXXXX	4:10:00 p. m.	4:20:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	13C
25	98	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:30:00 p. m.	5:40:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	13C
26	109	-74,XXXXX1	4,XXXXXX	5:15:00 p. m.	5:25:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	13C
27	92	-74,XXXXX1	4,XXXXXX	4:00:00 p. m.	4:10:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	14C
28	94	-74,XXXXX1	4,XXXXXX	4:20:00 p. m.	4:30:00 p. m.	0,006944444	3	Centro	14C
29	96	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:00:00 p. m.	5:10:00 p. m.	0,006944444	2	Centro	14C
30	97	-74,XXXXX3	4,XXXXXX	5:10:00 p. m.	5:20:00 p. m.	0,006944444	1	Centro	14C

Nota: Fuente propia.

En la tabla 3 podemos encontrar algunos clientes con sus respectivas ventanas de tiempo pactadas con la empresa, su ubicación que se encuentra mediante latitud y longitud; el peso de la tula que manejan, el centro de operación quien lo atiende que para este caso en Zona centro y la ruta quien atiende el servicio.

10.2 Programación de Xpress con el algoritmo de barrido

La programación lineal del TSPTW se realizó en Xpress, se incluyen en la figura 12 los parámetros y las variables, igualmente en la figura 13 se programa el importe de la información de

entrada que se encuentra en Excel a Xpress finalmente en las figuras 14 y 15 se programan las restricciones del modelo.

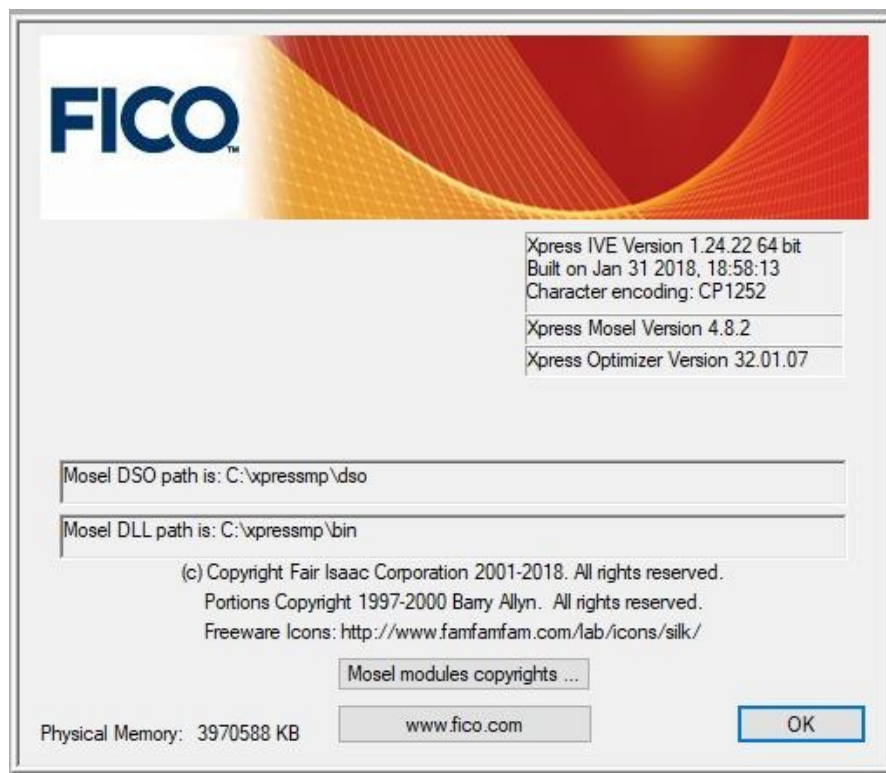


Figura 11. Software FICO® Xpress Producción propia.

```

!@encoding CP1252
model ModelName
uses "mmsxls"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver
uses "mmsheet"; !(versiones mayores al 7) - Obtener acceso a libros de excel

!optional parameters section
parameters
! SAMPLEPARAM1='c:\test\'
! SAMPLEPARAM2=false
PROJECTDIR='' ! for when file is added to project
end-parameters

!sample declarations section
declarations
!conjuntos
N:set of integer      !El conjunto de nodos
V:set of integer      !Cantidad de vehiculos

!Parametros

T: array (N,N) of real !tiempo de viaje de i a j
S: array (N) of real   !tiempo de servicio en el nodo i
D: array (N) of real   !demanda del nodo i
C: array (V) of real   !Capacidad de carga
a: array (N) of real   !limite inferior ventana de tiempo
b: array (N) of real   !limite superior ventana de tiempo

E: integer             !Salida mas temprana del deposito
L: integer             !llegada mas tarde

!Variables de decisión
x: array (N,N,V) of mvar !Variable binaria si el vehiculo k va del nodo i al nodo j
W: array (N,V) of mvar

```

Figura 12. Programación del algoritmo de barrido del TSPTW en Xpress. Producción propia.

```

end-declarations
!Leer datos desde el archivo de excel PozosPetroco.xlsx
initializations from "mmsheet.excel:VRPTW_Cluster11C.xlsx"
!initializations from "mmodbc.excel:VRPTW.xlsx"
T as "[Datos_de_entrada$A2:C82]"
S as "[Datos_de_entrada$E2:F8]"
C as "[Datos_de_entrada$H2:I2]"
D as "[Datos_de_entrada$K2:L8]"
a as "[Datos_de_entrada$N2:O8]"
b as "[Datos_de_entrada$Q2:R11]"
E as "[Datos_de_entrada$U1:U1]"
L as "[Datos_de_entrada$U2:U2]"

end-initializations

!Restricciones
!Creacion de variables y de su naturaleza dinamica
forall (i in N, j in N, k in V)
    x(i,j,k) is_binary

!Asigna a cada cliente una ruta de vehiculo
forall (i in N|i<>0 and i<>1000)
    sum (j in N, k in V) x(i,j,k)= 1

!Limita numero de rutas por vehiculo y salida del deposito
forall (k in V)
    sum (i in N|i=0, j in N) x(i,j,k)= 1

!Limita numero de rutas por vehiculo y llegada del deposito
forall (k in V)
    sum (i in N, j in N|j=1000) x(i,j,k)= 1

```

Figura 13. Programación del algoritmo de barrido del TSPTW en Xpress. Producción propia.

```

!Conservación de flujo
forall (k in V,j in N|j<>0 and j<>1000)
    sum (i in N) x(i,j,k)-sum (i in N) x(j,i,k)=0

!Capacidad vehiculos
forall (k in V)
    sum (i in N|i<>0 and i<>1000,j in N) x(i,j,k)*D(i)<=C(k)

!no puede comenzar servicio
forall (i in N,j in N,k in V)
    if i<>j then
        W(i,k)+S(i)+T(i,j)-W(j,k)-(1-x(i,j,k))*1000000<=0
    end-if

forall (i in N|i=0 ,k in V)
    W(i,k)>=E

forall (i in N| i=10,k in V)
    W(i,k)<=L

forall (k in V,i in N|i<>0 and i<>1000)
    W(i,k)>=sum (j in N|j<>0 ) x(i,j,k)* a(i)

forall (k in V,i in N |i<>0 and i<>1000)
    W(i,k)<=sum (j in N|j<>0) x(i,j,k)* b(i)

```

Figura 14. Programación del algoritmo de barrido del TSPTW en Xpress. Producción propia.

```

!-----
!Función Objetivo
z := sum (i in N, j in N, k in V) x(i,j,k)*T(i,j)
minimize (z)
!-----

if PROJECTDIR <> '' then
  setparam('workdir', PROJECTDIR)
  writeln("Project directory: " + PROJECTDIR)
end-if

writeln("Begin running model")
!...
writeln(getobjval)

  !writeln(T(0,0))
  !writeln(T(5,5))

writeln("End running model")

!forall (j in N)
!forall (i in N)
  !write(T(0,j))

end-model

```

Figura 15. Programación del algoritmo de barrido del TSPTW en Xpress Producción propia.

11 Resultados obtenidos

11.1 Resultados obtenidos con el desarrollo del modelo

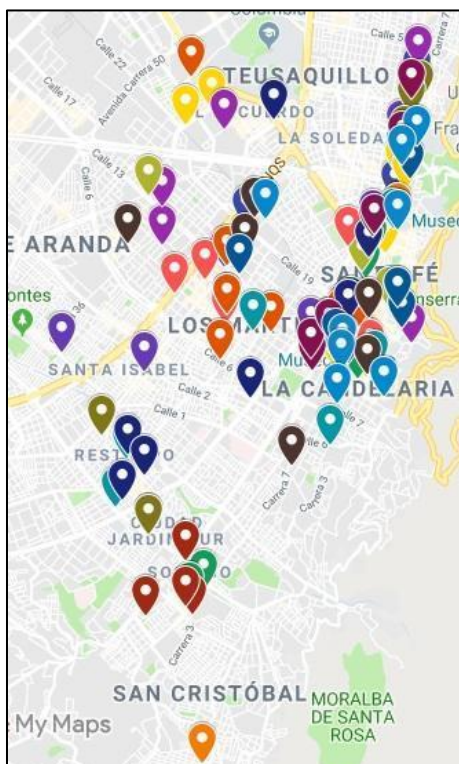


Figura 16. Cobertura de clientes zona centro con 18 rutas. Producción propia

Ya que la empresa que tomamos como base para nuestro caso de estudio solicitó confidencialidad debido a que los datos tratados pueden representar alguna clase de riesgo para desempeñar sus labores, se mostrará a continuación la representación gráfica de una sola de las rutas.

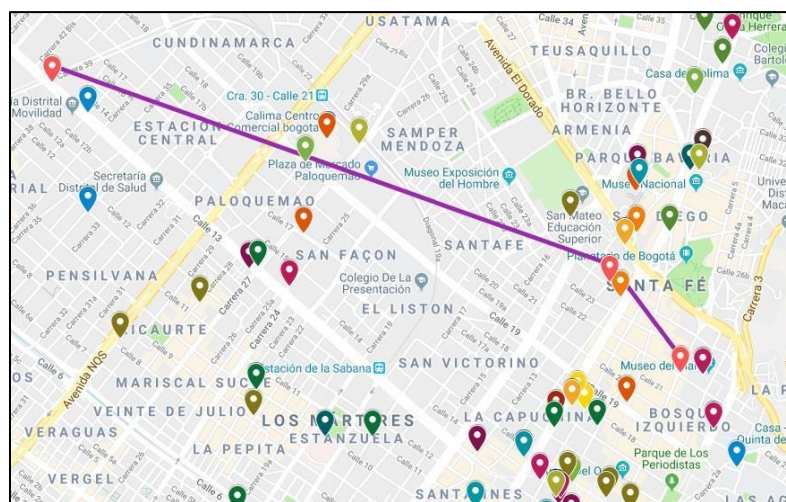


Figura 17. Ruta 18 lineal obtenida, Producción propia.

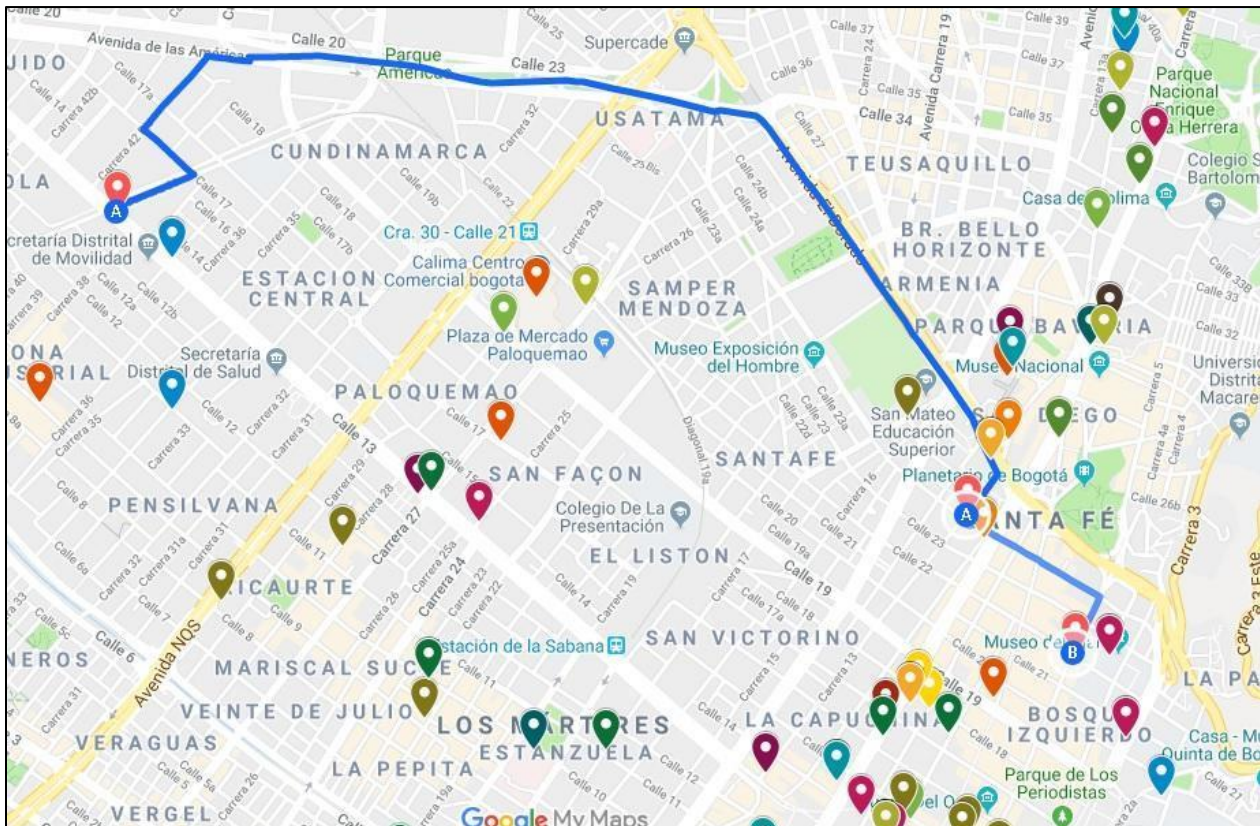


Figura 18. Ruta 18 obtenida, recorrido que realizada por el motorizado. Producción propia

11.2 Cluster obtenidos con la programación del algoritmo de barrido en Xpress

De la tabla 4 a la 21 se pueden observar los diferentes cluster obtenidos, donde:

$N = A$ la ruta que debe seguir el motorizado, es decir el orden en el cual debe visitar a los clientes. Teniendo presente que el 0 y 1000 significan el depósito.

$W =$ Tiempo, es el minuto en el cual el motorizado se debe estar acercando a realizar la recolección y entrega a los diferentes clientes.

Tabla 4.

Cluster obtenido 1

Cluster1C		
N	V	W
0	1	840
6	1	960
7	1	970
67	1	984,3
8	1	995
50	1	1005
27	1	1010
30	1	1025
37	1	1025
86	1	1040
1000	1	1043,6

Nota: Fuente propia.

Tabla 5.

Cluster obtenido 2

Cluster1N		
N	V	W
0	1	840
1	1	965
3	1	995,6
4	1	997,7
5	1	1000
55	1	1008,6
9	1	1016,2
17	1	1020
29	1	1025,8
48	1	1035
12	1	1041,6
1000	1	1050

Nota: Fuente propia.

Tabla 6.

Cluster obtenido 3

Cluster2C		
N	V	W
0	1	840
116	1	970
87	1	990
18	1	996,8
13	1	1005
15	1	1015
16	1	1017,1
10	1	1021,2
11	1	1029,5
49	1	1045
1000	1	1048,3

Nota: Fuente propia.

Tabla 7.

Cluster obtenido 4

Cluster3C		
N	V	W
0	1	840
39	1	910
14	1	1000
21	1	1010
20	1	1015
108	1	1034,1
126	1	1042,3
53	1	1048
1000	1	1061

Nota: Fuente propia.

Tabla 8.

Cluster obtenido 5

Cluster4C		
N	V	W
0	1	840
101	1	910
41	1	930
32	1	985
44	1	1000
36	1	1020
22	1	1025
23	1	1029
24	1	1032,1
1000	1	1050,3

Nota: Fuente propia.

Tabla 9.

Cluster obtenido 6

Cluster5C		
N	V	W
0	1	840
63	1	960
19	1	1000
35	1	1015
34	1	1020
38	1	1035
60	1	1039,4
1000	1	1045

Nota: Fuente propia.

Tabla 10.

Cluster obtenido 7

Cluster6C		
N	V	W
0	1	840
103	1	950
112	1	990
26	1	1003,9
56	1	1013,4
58	1	1017
47	1	1025,7
25	1	1040
31	1	1046,8
1000	1	1056,4

Nota: Fuente propia.

Tabla 11.

Cluster obtenido 8

Cluster7C		
N	V	W
0	1	840
42	1	940
62	1	955
77	1	990
105	1	1000
33	1	1008,1
45	1	1020
51	1	1026,3
52	1	1028,8
91	1	1035
1000	1	1043,7

Nota: Fuente propia.

Tabla 12.

Cluster obtenido 9

Cluster8C		
N	V	W
0	1	840
40	1	915
61	1	945
65	1	970
66	1	975
54	1	995
81	1	1010
46	1	1017,6
71	1	1022,8
1000	1	1031,7

Nota: Fuente propia.

Tabla 13.

Cluster obtenido 10

Cluster9C		
N	V	W
0	1	840
99	1	900
64	1	975
79	1	1002,4
57	1	1010,7
70	1	1020
125	1	1030
72	1	1045
129	1	1058,6
1000	1	1069,8

Nota: Fuente propia.

Tabla 14.

Cluster obtenido 11

Cluster10C		
N	V	W
0	1	840
100	1	900
76	1	985
68	1	998,8
59	1	1020
83	1	1030
74	1	1055
1000	1	1059,6

Nota: Fuente propia.

Tabla 15.

Cluster obtenido 12

Cluster11C		
N	V	W
0	1	840
102	1	920
88	1	995
69	1	1009,5
82	1	1019,9
90	1	1031
127	1	1046,4
75	1	1060
1000	1	1063,8

Nota: Fuente propia.

Tabla 16.

Cluster obtenido 13

Cluster12C		
N	V	W
0	1	840
111	1	985
78	1	998,2
89	1	1008,1
115	1	1014,4
124	1	1034,4
73	1	1050
1000	1	1057,9

Nota: Fuente propia.

Tabla 17.

Cluster obtenido 14

cluster13C		
N	V	W
0	1	840
93	1	970
80	1	1005
84	1	1025
85	1	1030
109	1	1036,4
98	1	1050,6
1000	1	1072,2

Nota: Fuente propia.

Tabla 18.

Cluster obtenido 15

Cluster14C		
N	V	W
0	1	840
92	1	960
94	1	980
118	1	996
96	1	1020
97	1	1030
1000	1	1050,1

Nota: Fuente propia.

Tabla 19.

Cluster obtenido 16

Cluster15C		
N	V	W
0	1	840
117	1	980
95	1	1005
107	1	1010
110	1	1050
1000	1	5303,2

Nota: Fuente propia.

Tabla 20.

Cluster obtenido 17

Cluster17C		
N	V	W
0	1	840
120	1	1000
119	1	1002,8
121	1	1005
106	1	1010,7
1000	1	1014,5

Nota: Fuente propia.

Tabla 21.

Cluster obtenido 18

Cluster18C		
N	V	W
0	1	840
114	1	1005
122	1	1016,9
123	1	1020,8
1000	1	4126,8

Nota: Fuente propia.

11.3 Rutas actuales VS Rutas propuestas

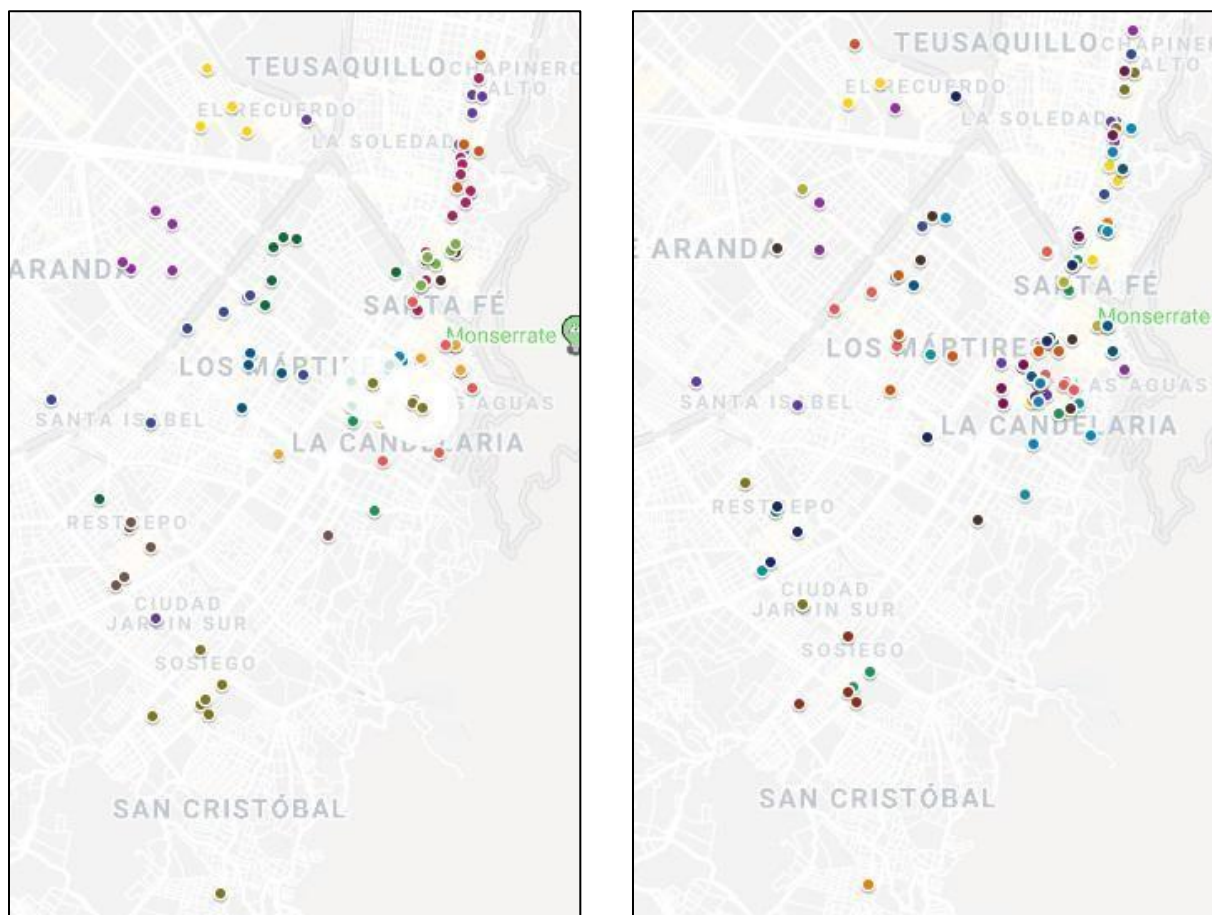


Figura 19. Izquierda 20 rutas actuales, derecha 18 rutas obtenidas. Producción propia

Después de realizado el algoritmo en Xpress nos arrojó las rutas que encontramos en el ítem anterior, se da cobertura a los clientes del centro con 18 rutas lo cual nos está ayudando a optimizar recursos ya que en la empresa actualmente se está dando cobertura a esta zona centro con 20 rutas es decir con 20 motorizados.

11.4 Validación del modelo

El modelo realizado es válido gracias porque:

- En el algoritmo de barrido que se implementó todos los puntos fueron asignados, es decir cada uno de los clientes quedo con su respectiva ruta.
- Todos los TSPTW en el software fueron factibles.
- Al verificar las rutas obtenidas respetaron las ventanas de tiempo.

Para finalizar nuestra investigación debemos dejar en claro ciertas incertidumbres que puede presentar el lector, dentro de las mismas se puede evidenciar que no se realiza ningún tipo de

anotación, aclaración o evidencia de los costos que puedan arrojar nuestra investigación, esto se debe a la confidencialidad y seguridad de la información que se tiene con la empresa base de análisis, puesto que el mostrar estos indicadores podría poner en riesgo su estructura como empresa, por otro lado, así se deseara señalar, se debería contar con la información para investigar y esta no fue posible de adquirir ya que no fue otorgada.

12 Conclusiones

- Teniendo en cuenta el modelo desarrollado se puede evidenciar que empresas que prestan el servicio de mensajería, en el cual recogen, transportan y distribuyen cualquier elemento como el de la muestra, pueden desarrollar y aplicar modelos matemáticos de problemas de ruteo de vehículos y sus variaciones, con el fin de mejorar su eficiencia para prestar el servicio.
- Como se logró evidenciar en el desarrollo de la investigación, si fue posible aplicar el modelo matemático CVRPTW dentro de nuestra muestra de estudio, obteniendo mejores resultados en su rendimiento según lo teórico y demostrando que su aplicabilidad permite señalar una mejoría en la asignación de rutas.
- Durante la investigación se evaluaron diferentes métodos de solución, estas fueron las metaheurísticas, heurísticas y métodos de solución exactos. En las metaheurísticas se investigó específicamente búsqueda tabú de la cual se concluyó que por su nivel de complejidad no podía ser desarrollada en el tiempo estipulado por lo tanto se realizó un algoritmo de barrido.
- Basados en los diferentes métodos de solución evaluados y en los métodos de solución utilizados en el presente trabajo para el VRPTW se concluye que el campo de la investigación de operaciones nos permite resolver de diferentes maneras un gran número de problemas cotidianos de las industrias y estas deben ser motivadas a su utilización.
- Se logró implementar el método de solución por medio de Xpress quien nos arrojó los diferentes clusters los cuales cumplían con todas las restricciones asignadas, sin embargo, en Excel no se logró implementar puesto que el Solver no cuenta con la capacidad de resolver un problema de esta magnitud debido a la cantidad de restricciones que contiene.
- Se pueden optimizar los recursos de una empresa aplicando un modelo matemático, esto basados en que aplicando el modelo se redujeron la cantidad de rutas y por ende los recursos requeridos, para este caso en dos vehículos y dos mensajeros que representan el 10% de los recursos invertidos originalmente en la operación.

13 Lista de referencias

- Ali , B., Mahdi , B., & Fahime , Z. (26 de 04 de 2017). Two phase genetic algorithm for vehicle routing and scheduling. *J Ind Eng Int*, 16. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Alireza Rahimi Vahed, T. G. (Enero de 2015). *Computers & Operations Research*. Obtenido de sciencedirect.com: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.004>
- Armas, J., & Melián Batista, B. (21 de 03 de 2015). Variable Neighborhood Search for a Dynamic Rich Vehicle Routing. *Elsevier Ltd.*, 12. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Bruce Golden, S. R. (2008). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances And New Challenges*. New York: Springer.
- Congreso de Colombia. (2009). *Ley 1369 de 2009*. Bogotá D. C.: Congreso de Colombia.
- Francisco Baptista Pereira, J. T. (2009). *Bio-inspired Algorithms for the Vehicle Routing Problem*. Warsaw: Springer.
- Huey, K., Huey, W., & Chia, Y. (17 de 09 de 2011). The Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem with. *Hindawi Publishing Corporation*, 16. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Ilker , K., & Nursel , Ö. (29 de 10 de 2014). An advanced hybrid meta-heuristic algorithm for the vehicle routing. *Elsevier Ltd.*, 9. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Jun , J., Kien , M., Kim , L., & Kwong , M. (2014). Vehicle routing problem with a heterogeneous fleet and time windows. *Elsevier Ltd.*, 13. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Kassem, & Chen. (12 de 01 de 2013). Solving reverse logistics vehicle routing problems. *Int J Adv Manuf Technol*, 12. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Kris Braekers, K. R. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review.
- Linda Bibiana Rocha Medina, E. C. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. Bogotá.
- Lüer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (03-04 de Diciembre de 2009). El problema de rutas de vehículos:Extensiones y métodos de resolución, estado del arte. *El problema de rutas de vehículos:Extensiones y métodos de resolución, estado del arte*. Temuco, Chile, Chile.
- Marin Bernal, R., & Jacome Illera, C. E. (22 de Mayo de 1979). *Regimen legal de Bogota D.C*. Obtenido de <http://www.bogotajuridica.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=53565>
- Merve , K., & Bülent , Ç. (10 de 02 de 2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing. *Elsevier Ltd.*, 17. Recuperado el 01 de 12 de 2018

- Olivera, A. (Agosto de 2004). *Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería*. Obtenido de Universidad de la República, Montevideo: <https://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>
- Paolo Toth, D. V. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM.
- Pérez de Vargas Moreno, B. (Junio de 2015). *Bitstream*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE VALLADOLID: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/13378/1/TFG-I-252.pdf>
- Reza Zanjirani Farahani, S. R. (2011). *Logistics Operations and Management Concepts and Models*. London: Elsevier.
- Reza Zanjirani Farahani, S. R. (2011). *Logistics Operations and Management Concepts and Models*. London: Elsevier.
- Rincon Garcia, Waterson, & Cherrett. (16 de 06 de 2016). A hybrid metaheuristic for the time-dependent vehicle routing problem with hard. *Growing Science Ltd.*, 20. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Sanchez Garcia, M. (s.f.). Obtenido de <http://www.sinewton.org/numeros/numeros/43-44/Articulo22.pdf>
- Sarmiento Lapesqueur, A. (20 de Febrero de 2014). Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: aplicacion de la meta-heuristica Busqueda Tabú. *Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: aplicacion de la meta-heuristica Busqueda Tabú*. Chía, Colombia, Colombia.
- Shaoqiang , Y., Cuicui , T., Yanan , L., & Linjie , G. (2016). An improved artificial bee colony. *Advances in Mechanical Engineering*, 9. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Sutherland, Zhao, Mu, & Wang. (21 de 02 de 2015). problem, A parallel simulated annealing method for the vehicle routing. *Elsevier Ltd.*, 12. Recuperado el 01 de 12 de 2018
- Yunyun , N., Zehua , Y., Ping , C., & Jianhua , X. (09 de 10 de 2017). Optimizing the green open vehicle routing problem with time. *Elsevier Ltd.*, 10. Recuperado el 01 de 12 de 2012

14 Anexos

Tabla 22.

Base de datos Artículos - Metaheurísticas

Nº	TÍTULO	AUTOR	MÉTODO SOLUCIÓN	LINK
1	A stochastic time-dependent green capacitated vehicle routing and scheduling problem with time window, resiliency and reliability: a case study	Masoud Rabbani*, Soroush Aghamohammadi Bosjin, Reza Yazdanparast and Niloufar Akbarian Saravi	Recocido simulado (SA)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85043792703&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917dfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sd t=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=0&citeCnt=1&searchTerm=
2	A multi-stage algorithm for a capacitated vehicle routing problem with time constraints	Lucia Cassettari, Melissa Demartini *, Roberto Mosca, Roberto Revetria and Flavio Tonelli	Algoritmo de ahorro	http://www.mdpi.com/1999-4893/11/5/69
3	Algorithms for the multi-objective vehicle routing problem with hard time windows and stochastic travel time and service time	Miranda, D.M, Branke, J.b, Conceição, S.V.,	un algoritmo memético multiobjetivo y una búsqueda local iterada de múltiples objetivos	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85047437006&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917dfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sd t=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=1&citeCnt=0&searchTerm=

4	Variable Neighborhood Search for Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows	Huggo Silva Ferreira a,1 Eduardo Theodoro Bogue a,b,2 Thiago F. Noronha a,3 Slim Belhaiza c,4 Christian Prins d,5	Búsqueda de Vecindad Variable	https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S1571065318300738?via%3DIuhub
5	The multi-pickup and delivery problem with time windows	Naccache, S.a , Côté, J.-F.,Coelho, L.C.ab	búsqueda de vecindad adaptable híbrida	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85043494120&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917dfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sd t=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=3&citeCnt=0&searchTerm=
6	Two-echelon location-routing optimization with time windows based on customer clustering	Wang, Y.ab,Assogba, K.a,Liu, Y.a,Ma, X.cd,Xu, M.a,Wang, Y.ef	Algoritmo Genético de Clasificación Modificado No Dominado-II (M-NSGA-II)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85046171351&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917dfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sd t=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=4&citeCnt=1&searchTerm=
7	Methods and algorithms to solve the vehicle routing problem with time windows and further conditions	Kovács George Yusupova Nafissa Smetanina Olga Rassadnikova Ekaterina	Algoritmo de Clarke y Wright modificado y la búsqueda de vecindad variable.	https://akademai.com/doi/pdf/10.1556/606.2018.13.1.6

8	A tissue P system based evolutionary algorithm for multi-objective VRPTW	Wenbo Dong a, Kang Zhoua,* , Huaqing Qib, Cheng Hec, Jun Zhanga	sistema P de tejido con MOEA de tres células	https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S2210650216305867?via%3Dihub
9	<u>Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms</u>	Nowakowski, P., Szwarc, K., Boryczka, U.	recocido simulado, búsqueda tabú, codicioso, optimización de colonia de abejas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85046376138&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=5&citeCnt=0&searchTerm=
10	A tabu search algorithm for distribution network optimization with discrete split deliveries and soft time windows	Yangkun Xia1 Zhuo Fu1	Búsqueda tabu	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs10586-018-2635-8
11	Solving the time-dependent multi-trip vehicle routing problem with time windows and an improved travel speed model by a hybrid solution algorithm	Sun, Y., Wang, D., Lang, M., Zhou, X.	vecino más cercano búsqueda tabú	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs10586-018-2637-6
12	<u>The generalized rollon-rolloff vehicle routing problem and savings-based algorithm</u>	Li, H., Jian, X., Chang, X., Lu, Y.	algoritmo de ahorro seguido Y fase de búsqueda local	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85047164060&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E

				+2007&relpos=8&citeCnt=0&searchTerm=
13	Vehicle routing problem with time windows using natural inspired algorithms	Pratiwi, A.B., Pratama, A., Sa'diyah, I., Suprajitno, H.	Algoritmo de Murciélago Recocido Simulado Optimización de enjambre de gato Algoritmo de búsqueda de cuervos	http://iopscience.iop.org.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1088/1742-6596/974/1/012025/meta
14	<u>Iterated local search algorithm with ejection chains for the open vehicle routing problem with time windows</u>	<u>Brandão, J.</u>	Algoritmo de búsqueda local iterado	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85046480929&origin=resultslist&sort=plf&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=10&citeCnt=0&searchTerm=
15	<u>Robust vehicle routing problem with hard time windows under demand and travel time uncertainty</u>	Hu, C., Lu, J., Liu, X., Zhang, G.	búsqueda de vecindario con una variable adaptativa	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042792853&origin=resultslist&sort=plf&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=11&citeCnt=0&searchTerm=

16	<u>Solving routing problems with pairwise synchronization constraints</u>	Parragh, S.N., Doerner, K.F.	algoritmo metaheurístico adaptado	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85041539939&origin=resultslist&sort=plf&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=13&citeCnt=1&searchTerm=
17	<u>Branch-price-and-cut for the Mixed Capacitated General Routing Problem with Time Windows</u>	Ciancio, C., Laganá, D., Vocaturro, F.	algoritmo de precio de corte	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85037043858&origin=resultslist&sort=plf&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=15&citeCnt=0&searchTerm=
18	<u>Scheduling direct deliveries with time windows to minimise truck fleet size and customer waiting times</u>	Emde, S., Zehtabian, S.	heurísticas adecuadas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85047160125&origin=resultslist&sort=plf&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=16&citeCnt=0&searchTerm=
19	<u>Capacitated and multiple cross-docked vehicle routing problem with pickup, delivery, and time</u>	Ahkamiraad, A., Wang, Y.	algoritmo híbrido	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85044125815&origin=resultslist&sort=plf&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=17&citeCnt=0&searchTerm=

	<u>windows</u>			f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&st2=&sid=30ba917fdfebb71d1e75ff5a764985c5&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=18&citeCnt=0&searchTerm=
20	The time window assignment vehicle routing problem with time-dependent travel times	Spliet, R., Dabia, S., Woensel, T.V.	algoritmo de precio de rama y corte algoritmo de etiquetado exacto búsqueda tabú	https://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/trsc.2016.0705
21	<u>A membrane-based evolution algorithm with time classifier for VRPTW</u>	Duan, Y., Zhou, K., Qi, H., Zhang, H., Tong, X.	algoritmo de membrana	https://www.scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85044462124&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=60&citeCnt=0&searchTerm=
22	A decomposition-based chemical reaction optimization for multi-objective vehicle routing problem for simultaneous delivery and pickup with time windows	Li, H., Wang, L., Hei, X., Li, W., Jiang, Q.	optimización de la reacción química de optimización multiobjetivo	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs12293-016-0222-1
23	<u>Hybrid ant colony algorithm for logistics distribution problem with</u>	Gao, Y., Liu, C.	colonia de hormigas	https://www.scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-

	<u>time windows</u>			85047093002&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=62&citeCnt=0&searchTerm=
24	Two phase genetic algorithm for vehicle routing and scheduling problem with cross-docking and time windows considering customer satisfaction	Baniamerian, A., Bashiri, M., Zabihi, F.	algoritmo genético	https://link-springer.com/ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs40092-017-0203-0
25	<u>No-Load Backhaul Ratio Reduction by Interactive Routing for Small Goods Delivery with Time Window Constraints</u>	Huang, Z., Huang, Z., Li, J., (...), Fan, J., Ng, W.W.Y.	enrutamiento interactivo	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85047435130&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=63&citeCnt=0&searchTerm=
26	Improved tabu search algorithm for the open vehicle routing problem with soft time windows and satisfaction rate	Xia, Y., Fu, Z.	búsqueda tabú	https://link-springer.com/ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs10586-018-1957-x
27	<u>Formulations and branch-and-cut algorithms for</u>	Qiu, Y., Wang, L., Fang, X., Pardalos,	ramificación y corte	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-

	<u>production routing problems with time windows</u>	P.M., Goldengorin, B.		85041109360&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=64&citeCnt=0&searchTerm=
28	<u>Dispatch Model and Solution Strategy for Multimodal Transportation Based on Logistics Cloud Platform</u>	Zhao, C., Meng, Y., Liu, J., Xiong, W., Qiao, P.	análisis directo y resolución inversa	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85047165512&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=65&citeCnt=0&searchTerm=
29	An Integer Programming Model for Solving Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Hard Time Window considering Service Choice	Susilawati, E., Mawengkang, H., Efendi, S.	enfoque de vecindad factible	http://iopscience.iop.org.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1088/1757-899X/300/1/012023/meta
30	<u>Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost</u>	Niu, Y., Yang, Z., Chen, P., Xiao, J.	búsqueda tabú	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85034066940&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+tim

				e+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=66&citeCnt=1&searchTerm=
31	<u>Multi-depot periodic vehicle routing problem with due dates and time windows</u>	Cantu-Funes, R., Angélica Salazar-Aguilar, M., Boyer, V.	Procedimiento de búsqueda adaptable aleatorio reactivo codicioso	https://www.tandfonline.com.ezproxy.unal.edu.co/doi/full/10.1057/s41274-017-0206-7
32	<u>Service scheduling to minimise the risk of missing appointments</u>	Ji, C., Liret, A., Owusu, G., (...), Dorne, R., Rana, R.	método determinístico de búsqueda heurística	https://www.scopus.com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85046041446&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=67&citeCnt=0&searchTerm=
33	<u>Field services design and management of natural gas distribution networks: a class of vehicle routing problem with time windows approach</u>	Paolucci, M., Anghinolfi, D., Tonelli, F.	enfoque de descomposición de problema	https://www.tandfonline.com.ezproxy.unal.edu.co/doi/full/10.1080/00207543.2017.1398425
34	<u>Decomposition and distributed algorithms for home healthcare routing and scheduling problem</u>	Riazi, S., Wigström, O., Bengtsson, K., Lennartson, B.	algoritmo de chismes distribuido heurístico para resolver HHCRSP	https://www.scopus.com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85044479200&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+tim

				e+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=68&citeCnt=0&searchTerm=
35	Vehicle routing model and algorithm study for the network of container transportation with dumping trailers under hard time window constraint	Jiang, L., Yang, Y., Zhang, Y., Feng, X., Ji, J.	recocido simulado	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85026763976&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=72&citeCnt=0&searchTerm=
36	Un enfoque de generación de columna para el problema de enrutamiento de ubicación con ventanas de tiempo	Farham, M.S., Süral, H., Iyigun, C.	ramificación y precio	https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0305054817302411?via%3Dihub
37	A hybrid algorithm for the vehicle routing problem with backhauls, time windows and three-dimensional loading constraints	Koch, H., Bortfeldt, A., Wäscher, G.	búsqueda adaptativa de un gran vecindario	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs00291-018-0506-6
38	GRASP-VNS for a periodic VRP with time windows to deal with milk collection	Expósito, A., Raidl, G.R., Brito, J., Moreno-Pérez, J.A.	GRASP y VNS	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85041816237&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=72&citeCnt=0&searchTerm=

				3E+2007&relpos=73&citeCnt=0&searchTerm=
39	<u>A branch-and-cut algorithm for the Time Window Assignment Vehicle Routing Problem</u>	Dalmeijer, K., Spliet, R.	ramificación y corte	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85028767241&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=74&citeCnt=0&searchTerm=
40	<u>A comparative study of the PSO and GA for the m-MDPDPTW</u>	Ben Alaïa, E., Harbaoui Dridi, I., Borne, P., Bouchriha, H.	Algoritmos Genéticos Optimización de Enjambre de Partículas	http://univagora.ro/jour/index.php/ijccc/article/view/2970/pdf
41	<u>Why to climb if one can jump: a hill jumping algorithm for the vehicle routing problem with time windows</u>	Mester, D., Bräysy, O., Dullaert, W.	búsqueda de un gran vecindario metaheurística de búsqueda local guiada estándar	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007%2F978-3-319-54490-8_6
42	<u>A biased-randomized heuristic for the home healthcare routing problem</u>	Eliseu, M., Gomes, M.I., Juan, A.A.	heurística de ahorro	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042539203&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=74&citeCnt=0&searchTerm=

				3E+2007&relpos=75&citeCnt=0&searchTerm=
43	<u>A greedy randomized adaptive search for the surveillance patrol vehicle routing problem</u>	<u>Mancini, S.</u>	búsqueda adaptativa aleatorio codicioso (GRASP)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85032629380&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=77&citeCnt=0&searchTerm=
44	<u>The Time Window Vehicle Routing Problem Considering Closed Route</u>	Syahputri, N.I., Mawengkang, H.	vecindad factible	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85039421666&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=100&citeCnt=0&searchTerm=
45	<u>Modified discrete glowworm swarm optimization algorithm based on time window division for multi-objective VRPTW</u>	Dong, W., Zhou, K., Zhang, G., Chao, H.- C.	optimización de enjambre de luciérnaga discreto modificado	http://ericdata.com/tw/doi/?doi=10.3966/160792642018011901001
46	<u>A Memetic Algorithm for Multi Objective Vehicle Routing Problem with</u>	Sangamithra, B., Neelima, P., Kumar, M.S.	algoritmo memético	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85047213503&origin=resultslist&sort=

	<u>Time Windows</u>			plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=101&citeCnt=0&searchTerm=
47	<u>On efficiently solving the vehicle routing problem with time windows using the bat algorithm with random reinsertion operators</u>	Osaba, E., Carballedo, R., Yang, X.-S., (...), Lopez-Garcia, P., Del Ser, J.	algoritmo de murciélago	https://link.springer.com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007%2F978-3-319-67669-2_4
48	<u>Mathematical Formulation and Comparison of Solution Approaches for the Vehicle Routing Problem with Access Time Windows</u>	Grosso, R., Muñuzuri, J., Escudero-Santana, A., Barbadilla-Martín, E.	algoritmo de ahorro modificado	https://www.hindawi.com/journals/complexity/2018/4621694/
49	<u>Vehicle routing optimization with multiple fuzzy time windows based on improved Wolf pack algorithm</u>	Cao, Q.K., Yang, K.W., Ren, X.Y.	paquete Wolf mejorado	https://www.scopus.com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85038632329&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=103&citeCnt=0&searchTerm=
50	<u>A new approach for solution of vehicle routing problem with hard time</u>	Cömert, S.E., Yazgan, H.R., Sertvuran, I., Şengül, H.	MILP	https://www.scopus.com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85035106342&origin=resultslist&sort=

	<u>window: an application in a supermarket chain</u>			plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=104&citeCnt=0&searchTerm=
51	<u>Designing granular solution methods for routing problems with time windows</u>	Schneider, M., Schwahn, F., Vigo, D.	búsqueda tabú granular (GTS)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85019757497&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=105&citeCnt=0&searchTerm=
52	<u>A combined order selection and time-dependent vehicle routing problem with time windows for perishable product delivery</u>	Ma, Z.-J., Wu, Y., Dai, Y.	colonia de hormigas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85031824347&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=106&citeCnt=0&searchTerm=
53	<u>Methodology of mixed load customized bus lines and adjustment based on time windows</u>	Li, Z., Song, R., He, S., Bi, M.		http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0189763

54	<u>Empirical analysis for the VRPTW with a multigraph representation for the road network</u>	Ticha, H.B., Absi, N., Feillet, D., Quilliot, A.	algoritmos de ramificación y precio	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85021757062&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=108&citeCnt=1&searchTerm=
55	<u>A simple metaheuristic for the fleetsize and mix problem with TimeWindows</u>	Bräysy, O., Dullaert, W., Porkka, P.P.	búsqueda local	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007%2F978-3-319-54490-8_4
56	<u>An adaptive hybrid algorithm for vehicle routing problems with time windows</u>	Yassen, E.T., Ayob, M., Nazri, M.Z.A., Sabar, N.R.	algoritmo de búsqueda de armonía	https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0360835217304515?via%3DiHub
57	<u>Incorporating vehicle routing, location and supplier selection problems for reducing pollutants emission</u>	Teimoury, E., Amiri, S.O.H., Ketabchi, F.	recocido simulado (SA), algoritmo de búsqueda tabú (TS), algoritmo bat (BA) y algoritmo de búsqueda de vecindad variable basado en recocido simulado (VNS-SA)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85040463979&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=113&citeCnt=0&searchTerm=
58	<u>Solution of emergency logistics open-loop vehicle</u>	Guo, Y.-M., Hu, D.-W., Chen, X.	algoritmo mejorado de	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-

	<u>routing problem with time window based on improved ant colony algorithm</u>		colonia de hormigas	85040611783&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Vehicle+routing+problem+time+windows+&nlo=&nlr=&nls=&sid=ef59259a7442195dd4256a4fcbbc5fd&sot=b&sdt=b&sl=71&s=TITLE-ABS-KEY%28Vehicle+routing+problem+time+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=132&citeCnt=0&searchTerm=
59	<u>An adaptive large neighborhood search for the full truckload pickup and delivery problem with resource synchronization</u>	Grimault, A., Bostel, N., Lehuédé, F.	Búsqueda adaptativa de vecindarios (ALNS)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85021270494&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=bab8d3c9e8de27b934c23a9f1c8b091a&sot=b&sdt=b&sl=70&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+time+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=118&citeCnt=2&searchTerm=
60	<u>Improvement of a genetic algorithm approach for the solution of vehicle routing problem with time windows</u>	Göçken, T., Yaktubay, M., Kiliç, F.	algoritmo genético	https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.unal.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8090185
61	<u>Efficient Insertion Heuristic Algorithms for Multi-Trip Inventory Routing Problem with Time Windows, Shift Time Limits and Variable Delivery Time</u>	Karoonsoontawong, A., Kobkiattawin, O., Xie, C.	heurísticos de inserción eficientes heurística codiciosa de posprocesamiento	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs11067-017-9369-7
62	<u>Integrated production scheduling and vehicle</u>	Fu, L.-L., Aloulou, M.A., Triki, C.	heurística iterativa de dos	https://www-tandfonline-com.ezproxy.unal.edu.co/doi/full/10.1080/00207543.2017.1308572

	<u>routing problem with job splitting and delivery time windows</u>		fases	
63	<u>Vehicle Scheduling Problem Based on the Virtual Nodes and Weight Factors of Traffic Complexity</u>	Wang, X., Zheng, H., Meng, F.	búsqueda tabu	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85034233537&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=142&citeCnt=0&searchTerm=
64	<u>Fuzzy green vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows</u>	Majidi, S., Hosseini-Motlagh, S.-M., Yaghoubi, S., Jokar, A.	búsqueda adaptativa de gran vecindario	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85035201203&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=143&citeCnt=0&searchTerm=
65	<u>An exact algorithm for the container drayage problem under a separation mode</u>	Song, Y., Zhang, J., Liang, Z., Ye, C.	algoritmo de ramificación y precio y corte	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85028930556&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=144&citeCnt=0&searchTerm=

				R+%3E+2007&relpos=145&citeCnt=0&searchTerm=
66	<u>The electric vehicle routing problem with time windows using genetic algorithm</u>	Zhenfeng, G., Yang, L., Xiaodan, J., Sheng, G.	algoritmos genéticos	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85034603993&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=148&citeCnt=0&searchTerm=
67	<u>Probabilistic time-dependent vehicle routing problem</u>	Režnar, T., Martinovič, J., Slaninová, K., Grakova, E., Vondrák, V.	algoritmo de búsqueda adaptable	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84991822085&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=151&citeCnt=1&searchTerm=
68	<u>A bi-criteria evolutionary algorithm for a constrained multi-depot vehicle routing problem</u>	Agrawal, V., Lightner, C., Lightner-Laws, C., Wagner, N.	algoritmo genético (GA) bi-criterios	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84964010212&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=152&citeCnt=0&searchTerm=

				&searchTerm=
69	<u>Two-echelon location routing synchronized with production schedules and time windows</u>	Bala, K., Brcanov, D., Gvozdenović, N.	recocido simulado	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84997545313&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=153&citeCnt=0&searchTerm=
70	<u>Hybrid Differential Evolution Optimization for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Driver-Specific Times</u>	Pu, E., Wang, F., Yang, Z., (...), Li, Z., Huang, X.	optimización híbrida de evolución diferencial	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007%2Fs11277-017-4107-5
71	<u>A new Hybrid Genetic Variable Neighborhood search heuristic for the Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows</u>	Belhaiza, S., M'Hallah, R., Brahim, G.B.	Búsqueda híbrida de vecindad variable	https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.unal.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7969457
72	<u>Tackling Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows by means of ant colony system</u>	Necula, R., Breaban, M., Raschip, M.	colonia de hormigas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85027864772&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Vehicle+routing+problem+time+windows+&nlo=&nlr=&nls=&sid=4f7761aa518960974ce24f0e320a64a2&sot=b&sdt=b&sl=71&s=TITL E-ABS-KEY%28Vehicle+routing+problem+ti

				me+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=165&citeCnt=0&searchTerm=
73	<u>A memetic algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Time windows</u>	Gonzalez, O.M., Segura, C., Pena, S.I.V., Leon, C.	recocido simulado	https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.unal.edu.co/document/7969619/
74	<u>Evolving heuristics for Dynamic Vehicle Routing with Time Windows using genetic programming</u>	Jacobsen-Grocott, J., Mei, Y., Chen, G., Zhang, M.	programación genética	https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.unal.edu.co/document/7969539/
75	<u>Improved artificial bee colony algorithm for vehicle routing problem with time windows</u>	Yao, B., Yan, Q., Zhang, M., Yang, Y.	colonia artificial de abejas (IABC)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85030152138&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=157&citeCnt=0&searchTerm=
76	<u>Heuristics for the robust vehicle routing problem with time windows</u>	Braaten, S., Gjønnnes, O., Hvattum, L.M., Tirado, G.	búsqueda adaptativa de grandes barrios	https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S095741741730057X?via%3Dihub
77	<u>Un método híbrido exacto para el problema de enrutamiento del vehículo con ventanas de tiempo y múltiples repartidores</u>	Alvarez, A., Munari, P.	algoritmo de corte y precio de corte	https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0305054817300308?via%3Dihub
78	<u>Biased random key genetic algorithm with insertion and gender selection for</u>	Rochman, A.N., Prasetyo, H., Nugroho, M.T.	Algoritmo Genético de Llave Aleatoria	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85021443381&origin=resultslist&sort=

	<u>capacitated vehicle routing problem with time windows</u>		sesgada	plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=180&citeCnt=0&searchTerm=
79	<u>Branch-and-price and adaptive large neighborhood search for the truck and trailer routing problem with time windows</u>	Parragh, S.N., Cordeau, J.-F.	algoritmo de ramificación y precio algoritmo adaptativo de búsqueda de vecindario grande	https://www-science-direct-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0305054817300266?via%3Dihub
80	<u>New enhancements for the exact solution of the vehicle routing problem with time windows</u>	Pecin, D., Contardo, C., Desaulniers, G., Uchoa, E.	corte-precio-y-corte (BPC)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85025430264&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=182&citeCnt=3&searchTerm=
81	<u>Multi-trip pickup and delivery problem with time windows and synchronization</u>	Nguyen, P.K., Crainic, T.G., Toulouse, M.	Barrios múltiples Y BUSQUEDA TABU	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84961216388&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-

				KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=183&citeCnt=2&searchTerm=
82	<u>A discrete Bat Algorithm for the vehicle routing problem with time windows</u>	Taha, A., Hachimi, M., Moudden, A.	Algoritmo de murciélago	https://ieeexplore-ieee.org/ezproxy.unal.edu.co/document/7962875/
83	<u>Electric vehicle routing problem with simultaneously delivery and pick-up</u>	Shao, S., Bi, J.	algoritmo genético	https://www.scopus.com/ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85027693428&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=186&citeCnt=0&searchTerm=
84	<u>Generalized mixed integer and VNS heuristic approach to solving the multisize containers drayage problem</u>	Vidović, M., Popović, D., Ratković, B., Radivojević, G.	búsqueda de vecindad variable (VNS).	https://www.scopus.com/ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84958259771&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=191&citeCnt=0&searchTerm=
85	<u>A multi-objective optimization of Multi-depot Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with time window</u>	Guezouli, L., Abdelhamid, S.	algoritmo genético	https://ieeexplore-ieee.org/ezproxy.unal.edu.co/document/7958650/

86	<u>Routing optimization of cross-regional emergency rescue considering differentiated disaster impacts</u>	Zhu, L., Gu, J., Ma, Z., Xu, Y.-S.	colonia de hormigas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85026316040&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=193&citeCnt=0&searchTerm=
87	<u>A co-evolutionary approach using information about future requests for dynamic vehicle routing problem with soft time windows</u>	Barkaoui, M.	algoritmo genético híbrido	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85018826800&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=197&citeCnt=0&searchTerm=
88	<u>Variable neighborhood descent for solving the vehicle routing problem with time windows</u>	Harzi, M., Krichen, S.	Descenso de vecindad variable	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85017425808&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=200&citeCnt=0&searchTerm=

89	<u>Stochastic partially optimized cyclic shift crossover for multi-objective genetic algorithms for the vehicle routing problem with time-windows</u>	Pierre, D.M., Zakaria, N	algoritmo genético	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84992126241&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=205&citeCnt=4&searchTerm=
90	<u>Dynamic vehicle routing with time windows in theory and practice</u>	Yang, Z., van Osta, J.-P., van Veen, B., (...), Bäck, T., Emmerich, M.	búsqueda local	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84964027477&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=207&citeCnt=2&searchTerm=
91	<u>Models and algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and other conditions</u>	Guzairov, M.B., Yusupova, N.I., Smetanina, O.N., Rassadnikova, E.Y.	OPT_Route	https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.unal.edu.co/document/7806502/
92	<u>Route design for last-in, first-out deliveries with backhauling</u>	Lin, S., Bard, J.F., Jarrah, A.I., Zhang, X., Novoa, L.J.	búsqueda adaptativo aleatorizado codicioso (GRASP)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85009106035&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=207&citeCnt=2&searchTerm=

				E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=210&citeCnt=1&searchTerm=
93	<u>Green vehicle routing problem with heterogeneous fleet and time windows</u>	Komarudin, Gui, R., Rahmawan, A.	búsqueda tabú	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85019488310&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITLE-E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=211&citeCnt=0&searchTerm=
94	<u>The use of clonal selection algorithm for the vehicle routing problem with time windows</u>	Ogiolda, M.	selección clonal	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85021099158&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Vehicle+routing+problem+time+windows+&nlo=&nlr=&nls=&sid=4f7761aa518960974ce24f0e320a64a2&sot=b&sdt=b&sl=71&s=TITLE-ABS-KEY%28Vehicle+routing+problem+time+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=224&citeCnt=0&searchTerm=
95	<u>Modelling and solution of a large-scale vehicle routing problem at GE appliances & lighting</u>	Khodabandeh, E., Bai, L., Heragu, S.S., (...), Elrod, T., Shirkness, M.	recocido simulado	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84982166174&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITLE-E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+wit

				h+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=213&citeCnt=0&searchTerm=
96	<u>An improved ACO for the multi-depot vehicle routing problem with time windows</u>	Ma, Y., Han, J., Kang, K., Yan, F.	Optimización de Colonia de Hormigas	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007%2F978-981-10-1837-4_96
97	<u>Drivers-inspired ants for solving the Vehicle Routing Problem with Time Windows</u>	Bouallouche, D., Vioix, J.-B., Busvelle, E., Millot, S.	colonias de hormigas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85016038334&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=216&citeCnt=0&searchTerm=
98	<u>The Euclidean vehicle routing problem with multiple depots and time windows</u>	Song, L., Huang, H.		https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85038214102&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Vehicle+routing+problem+time+windows+&nlo=&nlr=&nls=&sid=4f7761aa518960974ce24f0e320a64a2&sot=b&sdt=b&sl=71&s=TITLE-ABS-KEY%28Vehicle+routing+problem+time+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=226&citeCnt=0&searchTerm=
99	<u>A Modified Harmony Search Algorithm for Solving the Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows</u>	Chen, S., Chen, R., Gao, J.	Algoritmo de búsqueda de armonía	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042727970&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=

				https://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/trsc.2015.0666
100	<u>Branch and price and cut for the split-delivery vehicle routing problem with time windows and linear weight-related cost</u>	Luo, Z., Qin, H., Zhu, W., Lim, A.	algoritmo exacto de ramificación y precio y corte	https://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/trsc.2015.0666
101	<u>A granular tabu search algorithm for a real case study of a vehicle routing problem with a heterogeneous fleet and time windows</u>	Bernal, J., Escobar, J.W., Linfati, R.	algoritmo de búsqueda tabu	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85032675769&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=246&citeCnt=0&searchTerm=
102	<u>An ILS heuristic for the waste collection vehicle routing problem with time windows</u>	Campos, A.A., Arroyo, J.E.C.	Búsqueda Local Iterada	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85014321662&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=248&citeCnt=0&searchTerm=

103	<u>A hybrid metaheuristic for the time-dependent vehicle routing problem with hard time windows</u>	Rincon-Garcia, N., Waterson, B.J., Cherrett, T.J.	Búsqueda de Vecindad Grande y las Técnicas de Búsqueda de Vecindad Variable	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84983410809&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=250&citeCnt=4&searchTerm=
104	<u>A hybrid algorithm for vehicle routing problem with time windows and target time</u>	Abbassi, A., El Bouyahyious, K., El Hilali Alaoui, A., Bellabdaoui, A.	búsqueda del vecindario colonias de hormigas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85010188946&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Vehicle+routing+problem+time+windows+&nlo=&nlr=&nls=&sid=4f7761aa518960974ce24f0e320a64a2&sot=b&sdt=b&sl=71&s=TITLE-ABS-KEY%28Vehicle+routing+problem+time+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=228&citeCnt=1&searchTerm=
105	<u>A novel method to handle route failure in fuzzy vehicle routing problem with hard time windows and uncertain demand</u>	Bansal, S., Goel, R.K., Katiyar, V.	colonias de hormigas	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85036657859&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITLE-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=251&citeCnt=0&searchTerm=

106	<u>The Vehicle Routing Problem with Occasional Drivers and Time Windows</u>	Macrina, G., Di Puglia Pugliese, L., Guerriero, F., Laganà, D.		https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007%2F978-3-319-67308-0_58
107	<u>An iterated local search with guided perturbation for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and three-dimensional loading constraints</u>	Turky, A., Moser, I., Aleti, A.	Búsqueda local	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85011411979&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=252&citeCnt=1&searchTerm=
108	<u>A heuristic for the solution of vehicle routing problems with time windows and multiple dumping sites in waste collection</u>	Sackmann, D., Hinze, R., Michael, B., Krieger, C., Halifeoglu, E.	algoritmo de ahorro extendido	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85019587342&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=254&citeCnt=0&searchTerm=
109	<u>A heuristic algorithm of vehicle routing problem with time windows and less-than-truckload carrier selection</u>	Wu, C.-S., Chu, C.-W., Hsu, H.-L.		http://www.airitilibrary.com/Publication/alDetailedMesh?DocID=10232796-201704-201705160020-201705160020-129-141
110	<u>A novel meta-heuristic combinatorial method for solving capacitated vehicle</u>	Hosseinabadi, A.A.R., Alavipour, F., Shamshirbnd, S.,	algoritmo de búsqueda de vecindad	https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/chapter/10.1007%2F978-3-319-38789-5_77

	<u>location-routing problem with hard time windows</u>	Balas, V.E.	variable	
111	<u>The emergency vehicle routing problem with uncertain demand under sustainability environments</u>	Qin, J., Ye, Y., Cheng, B.-R., Zhao, X., Ni, L.	algoritmo genético	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85013434408&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=258&citeCnt=2&searchTerm=
112	<u>Internal mail transport at processing & distribution centers</u>	Yang, Y., Bard, J.F.	búsqueda adaptativa aleatorizado codicioso	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85012164914&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=259&citeCnt=0&searchTerm=
113	<u>A branch-and-bound integrated simulated annealing algorithm for the electric vehicle routing problem with time windows</u>	Küçükoğlu, I., Cattrysse, D.	recocido simulado ramificación y enlace	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85040932957&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Vehicle+routing+problem+time+windows+&nlo=&nlr=&nls=&sid=4f7761aa518960974ce24f0e320a64a2&sot=b&sdt=b&sl=71&s=TITL E-ABS-KEY%28Vehicle+routing+problem+time+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=234&citeCnt=0&searchTerm=

				searchTerm=
114	On the Slot Optimization Problem in On-Line Vehicle Routing	Hungerländer, P., Rendl, A., Truden, C.	adaptativo de búsqueda barrio	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85039955457&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=263&citeCnt=0&searchTerm=
115	Genetic scatter search algorithm to solve the one-commodity pickup and delivery vehicle routing problem	Euchi, J.	Algoritmo de búsqueda de dispersión genética	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85013080184&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=264&citeCnt=1&searchTerm=
116	Variable-depth adaptive large neighbourhood search algorithm for open periodic vehicle routing problem with time windows	Chen, B., Qu, R., Ishibuchi, H.	búsqueda de vecindario de profundidad variable	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85035119130&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Vehicle+routing+problem+time+windows+&nlo=&nlr=&nls=&sid=4f7761aa518960974ce24f0e320a64a2&sot=b&sdt=b&sl=71&s=TITL E-ABS-KEY%28Vehicle+routing+problem+time+windows+%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=236&citeCnt=0&searchTerm=

				searchTerm=
117	<u>Optimization of vehicle routing problem with time windows for cold chain logistics based on carbon tax</u>	Wang, S., Tao, F., Shi, Y., Wen, H.	Algoritmo Genético Evolutivo de Ciclo (CEGA)	https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85019105048&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=vehicle+routing+problem+with+time+windows&nlo=&nlr=&nls=&sid=2a4426c502815c13e0a3d1b9cc5dab04&sot=b&sdt=b&sl=75&s=TITL E-ABS-KEY%28vehicle+routing+problem+with+time+windows%29+AND+PUBYEAR+%3E+2007&relpos=268&citeCnt=9&searchTerm=

Nota: Fuente propia