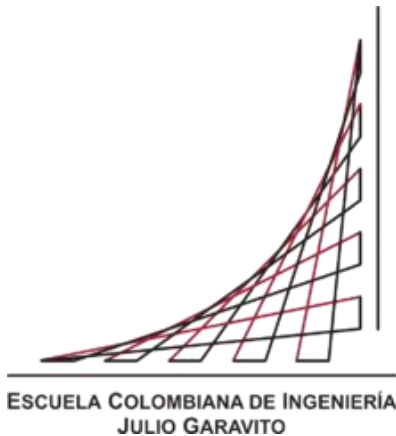


MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE VALORES CON RESTRICCIONES DE SEGURIDAD

Ing. CRISTIAN DAVID MARTINEZ AGATON



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ÉNFASIS EN
GESTION DE OPERACIONES
BOGOTÁ
2019**

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE VALORES CON RESTRICCIONES DE SEGURIDAD

Ing. CRISTIAN DAVID MARTINEZ AGATON

Trabajo de investigación para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial

Director
WILLIAM J. GUERRERO RUEDA Ph. D
ANGÉLICA SARMIENTO LEPESQUEUR M.Sc.

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ÉNFASIS EN
GESTION DE OPERACIONES
BOGOTÁ
2019**

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Cuando se use el material de la Escuela se debe incluir la siguiente nota “Derechos reservados a Escuela Colombiana de Ingeniería” en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Escuela.

Publicado en 2018 por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Avenida 13 No 205-59 Bogotá. Colombia
TEL: +57 – 1 668 36 00

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la sabiduría y la salud necesaria para afrontar cada día las metas y objetivos que me propongo.

A mi esposa, mis hijos, padres y hermanos los cuales son mi fuente de apoyo constante e incondicional.

Un agradecimiento especial a mis directores de tesis Ph D. William Guerrero y M.sc Angélica Sarmiento por su colaboración y orientación en la elaboración de mi trabajo de investigación.

Resumen

Este artículo presenta un estudio sobre el impacto que tiene la distribución de efectivo en corresponsales Bancarios geográficamente dispersos en términos de indicadores de riesgo, tiempos de servicio y costos logísticos. Se estudia el problema de gestión de inventario de múltiples clientes y transporte de efectivo, utilizando las bases de un modelo Inventory routing problem (IRP) con el fin de definir el modelo de distribución. El modelo de distribución de valores estudiado contempla el manejo de un único centro de efectivo con capacidad ilimitada, desde el cual se ejecutan entregas de efectivo vía terrestre por medio de un único vehículo que tiene todas las medidas de seguridad con capacidad limitada para la distribución de efectivo. El corresponsal bancario al cual se le realizan las entregas de efectivo maneja una capacidad limitada y es único por ciudad de distribución, con un horario de entrega continua, tiempo de entrega en el punto despreciable y sin pérdidas de efectivo por siniestralidad en punto. Este documento considera las decisiones de ruteo de vehículos con inventarios, restricciones de ventanas de tiempo duras y restricciones de riesgo enfocadas en la imprevisibilidad de ruta en una cadena de abastecimiento de efectivo compuesta por un depósito (Centro de efectivo) y múltiples minoristas (Puntos corresponsales y/o oficinas bancarias), por lo que se propone el estudio de un modelo Risk constraint inventory routing problem with time Windows (RcIRPTW). Se plantea una formulación matemática basada en programación entera mixta por el uso de variables enteras y continuas, estudiando el impacto de los riesgos de siniestralidad en el transporte de efectivo generando experimentos computacionales a 20 instancias de prueba donde se evalúan cuatro tipos de variaciones del IRP con varios escenarios de demanda aleatorias entre 0 y 120 Millones COP, contemplando ventanas de tiempo fuertes con una distribución aleatoria discreta uniforme tanto para ventanas amplias como cortas en un intervalo de 0-6 Horas y 0-2 Horas respectivamente. De igual manera se plantea una heurística basada en la lógica de vecino más cercano, manejo de inventarios y uso de ventanas de tiempo para la entrega de recursos en donde se modela bajo las condiciones de un inventory routing problem with time windows (IRPTW) y se compara con las diferentes variaciones del modelo matemático el cual contempla condiciones de riesgo con el fin de determinar soluciones factibles en un menor tiempo de cómputo. Los resultados muestran la importancia de optimizar simultáneamente las decisiones de inventario considerando costos de ruteo y de inventario junto con la consideración de estrategias de mitigación de riesgo. El implementar restricciones de riesgo y variación en las ventanas de tiempo de entrega permiten cambiar constantemente la ruta de un vehículo de valores, mejorar los índices de siniestralidad y la predictibilidad de ruta para una empresa de valores que actualmente maneja una operación basada en implementar condiciones de seguridad en la tripulación y no pensando en la generación de rutas aleatorias que cumplan los mismos niveles de servicio.

Palabras clave: Distribución de efectivo, ruteo de inventarios, ventanas de tiempo, corresponsal bancario, gestión de riesgo de efectivo

Abstract

This article presents a study on the impact that cash distribution has on Bank correspondents geographically dispersed in terms of risk indicators, service times and logistics costs. The inventory management problem of multiple clients and cash transport is studied, using the bases of an Inventory routing problem (IRP) model in order to define the distribution model. The model of distribution of values studied includes the management of a single cash center with unlimited capacity, from which cash deliveries are carried out by land through a single vehicle that has all the security measures with limited capacity for the distribution of cash. The bank correspondent to whom the cash deliveries are made handles a limited capacity and is unique by city of distribution, with a continuous delivery schedule, delivery time at the negligible point and without loss of cash due to accident rate. This document considers the routing decisions of vehicles with inventories, hard time window restrictions and risk restrictions focused on the unpredictability of a route in a cash supply chain consisting of a deposit (Cash Center) and multiple retailers (Correspondent Points and / or bank offices), so the study of a Risk constraint inventory routing problem with time Windows (RcIRPTW) model is proposed. A mathematical formulation based on mixed integer programming is proposed for the use of integer and continuous variables, studying the impact of accident risks in the transport of cash generating computational experiments to 20 test instances where four types of variations of the IRP are evaluated with several random demand scenarios between 0 and 120 Million COP, contemplating strong time windows with a uniform discrete random distribution for both wide and short windows in a range of 0-6 Hours and 0-2 Hours respectively. Similarly, a heuristic approach based on the nearest neighbor logic, inventory management and use of time windows for the delivery of resources is proposed, where it is modeled under the conditions of an inventory routing problem with time windows (IRPTW) and it compares with the different variations of the mathematical model which contemplates risk conditions in order to determine feasible solutions in a shorter computation time. The results show the importance of simultaneously optimizing inventory decisions considering routing and inventory costs along with the consideration of risk mitigation strategies. The implementation of risk restrictions and variation in the delivery time windows allow to constantly change the route of a securities vehicle, improve accident rates and route predictability for a securities company that currently manages an operation based on implementing conditions of security in the crew and not thinking about the generation of random routes that meet the same service levels.

Key words: Cash distribution, inventory routing, time windows, Branch Banking, cash risk management

Tabla de contenido

1	LISTA DE FIGURAS	- 10 -
2	LISTA DE TABLAS.....	- 11 -
3	INTRODUCCIÓN	13
4	OBJETIVOS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
4.1	OBJETIVOS	17
4.1.1	<i>Objetivo General.....</i>	17
4.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	17
4.2	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	17
5	ESTADO DEL ARTE	18
5.1	VRP- PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS	18
5.2	IRP- PROBLEMAS DE RUTEO E INVENTARIOS.....	21
6	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y MODELO MATEMÁTICO	27
6.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	27
6.2	ESTRATEGIAS Y MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE GESTIÓN DE RIESGO.....	32
6.2.1	<i>Inventario máximo en corresponsal Bancario</i>	<i>32</i>
6.2.2	<i>Medición del riesgo en el recorrido del efectivo sobre la ruta programada.....</i>	<i>33</i>
6.2.3	<i>Ventanas de tiempo de entrega aleatorias para disminución de imprevisibilidad de ruta</i>	<i>34</i>
6.2.4	<i>Restricción de entrega consecutiva de acuerdo al periodo de tiempo programado.....</i>	<i>35</i>
7	HEURÍSTICA PROPUESTA	37
7.1	CODIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	38
7.2	ALGORITMO GENERAL.....	41
8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
8.1	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	45
8.2	INSTANCIAS DE PRUEBA	45
8.2.1	<i>Localización de corresponsales bancarios y centro de efectivo</i>	<i>46</i>
8.2.2	<i>Demanda de los corresponsales bancarios</i>	<i>48</i>
8.2.3	<i>Ventanas de tiempo.....</i>	<i>50</i>
8.3	ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE RIESGO	51
8.3.1	<i>Medida de desempeño: Costo total de ruta</i>	<i>51</i>
8.3.2	<i>Medida de desempeño: Costo ruta.....</i>	<i>54</i>
8.3.3	<i>Medida de desempeño: Inventario promedio.....</i>	<i>55</i>
8.3.4	<i>Medida de desempeño: Uso máximo y promedio de arco</i>	<i>57</i>
8.3.5	<i>Medida de desempeño: Riesgo máximo</i>	<i>59</i>
8.4	RESULTADOS COMPUTACIONALES DE LA HEURÍSTICA.....	62
8.4.1	<i>Solver vs Heurística: Calidad de la solución.....</i>	<i>62</i>
8.4.2	<i>Solver vs Heurística: Tiempo computacional</i>	<i>63</i>
8.4.3	<i>Matriz de resultados Solver vs Heurística IRPTW</i>	<i>63</i>

CONCLUSIONES	65
INVESTIGACIONES FUTURAS	67
BIBLIOGRAFÍA	68

1 Lista de Figuras

Ilustración 7-1 Modelo entidad relación heurística distribución de efectivo	40
Ilustración 7-2 Grafo ilustrativo de solución periodo a periodo heurística.....	44
Ilustración 8-1 Mapa de Antioquia. Ruteo de corresponsales.....	46
Ilustración 8-2 Demanda promedio Barbosa.....	48
Ilustración 8-3 Demanda promedio Bello.....	48
Ilustración 8-4 Demanda promedio Copacabana	49
Ilustración 8-5 Demanda promedio Don Matias	49
Ilustración 8-6 Demanda promedio Envigado.....	49
Ilustración 8-7 Demanda promedio Girardota.....	50
Ilustración 8-8 Demanda promedio La Ceja.....	50
Ilustración 8-9 Costo total de ruta _ promedio de demandas.....	52
Ilustración 8-10 Costo total _ Demanda 1.....	52
Ilustración 8-11 Costo total _ Demanda 2.....	52
Ilustración 8-12 Costo total _ demanda 3.....	52
Ilustración 8-13 Costo total - Demanda 4.....	53
Ilustración 8-14 Costo de ruta.....	55
Ilustración 8-15 Inventario promedio.....	56
Ilustración 8-16 Uso máximo de arco.....	58
Ilustración 8-17 Uso promedio de arco.....	58
Ilustración 8-18 Riesgo máximo	60

2 Lista de Tablas

Tabla 5-1 Revisión bibliográfica modelos de IRP.....	22
Tabla 8-1 Distancias entre municipios de distribución	47
Tabla 8-2 Tiempos entre municipios de distribución.....	47
Tabla 8-3 Costo total de ruta modelos de distribución.....	53
Tabla 8-4 Inventario promedio modelos de distribución	57
Tabla 8-5 Uso máximo y promedio de arco	59
Tabla 8-6 Riesgo máximo modelos de distribución.....	60
Tabla 8-7 Matriz de resultados modelo matemático en GAMS.....	61
Tabla 8-8 Calidad de la solución _ Costo total de ruta.....	62
Tabla 8-9 Tiempo computacional.....	63
Tabla 8-10 Matriz de resultados modelo matemático en GAMS vs Heurística IRPTW.....	64

3 Introducción

A nivel mundial, alrededor de 2.500 millones de personas no utilizan servicios financieros y el 75% de los pobres no tiene cuenta bancaria (Grupo Banco Mundial, 2018). La inclusión financiera es clave para reducir la pobreza e impulsar la prosperidad, significa tener acceso a productos financieros útiles y asequibles que satisfagan sus necesidades (transacciones, pagos, ahorros, crédito y seguro) prestados de manera responsable y sostenible (Grupo Banco Mundial, 2018). Desde 2010, más de 55 países se han comprometido a implementar la inclusión financiera, y más de 30 de ellos han puesto en marcha o están preparando una estrategia nacional al respecto (Grupo Banco Mundial, 2018). Los países que han logrado más avances con miras a la inclusión financiera son los que han creado un entorno normativo y reglamentario propicio, y han fomentado la competencia permitiendo a las instituciones bancarias y no bancarias innovar y ampliar el acceso a servicios financieros. La tecnología financiera digital, y en particular el aumento del uso de teléfonos móviles a nivel mundial, han facilitado la ampliación del acceso de las pequeñas empresas y poblaciones difíciles de alcanzar servicios financieros a un costo más bajo y con menos riesgo, garantizando que el acceso y los servicios financieros lleguen a las poblaciones difíciles de alcanzar, tales como las poblaciones pobres de las zonas rurales (Grupo Banco Mundial, 2018).

La inclusión financiera tiene una correlación directa con el crecimiento y desarrollo económico y contribuye a la reducción de la pobreza (Superintendencia Financiera de Colombia, 2018). Dado este impacto, varias jurisdicciones han promovido políticas públicas tendientes a facilitar el acceso y uso de los servicios financieros en la población. Colombia no ha sido ajena a esta tendencia y en los últimos años ha trabajado de forma decidida en la masificación de los servicios financieros. En 2006 se adoptó la política de inclusión financiera Banca de las Oportunidades, y a partir de ella se creó el programa de inversión “Banca de las Oportunidades” con el objetivo de crear las condiciones necesarias para promover el acceso al crédito y los demás servicios financieros de la población de menores ingresos, las mipymes y emprendedores (Superintendencia Financiera de Colombia, 2018). Desde 2006 el Gobierno nacional ha emprendido una estrategia con el apoyo de la política de Banca de las Oportunidades, lo que ha permitido la ejecución de diversas iniciativas de inclusión financiera como, ampliar la cobertura geográfica regional, sumada a una estrategia de incentivos públicos dirigidos a la industria y al esfuerzo del sector privado, permitiendo avanzar de forma considerable en la inclusión financiera en el país (Superintendencia Financiera de Colombia, 2018).

Ampliar la cobertura geográfica del sistema financiero fue una de las primeras prioridades bajo la política de Banca de las Oportunidades. Para el 2006, 71% de

los municipios del país tenía presencia bancaria. Sin embargo, al excluir las oficinas del Banco Agrario, la cobertura era tan solo del 25% (Superintendencia Financiera de Colombia, 2018). Para revertir esta situación, se autorizó a los establecimientos de crédito a celebrar contratos de corresponsalía con terceros no financieros, como supermercados y droguerías, para prestar servicios financieros a través de ellos y llegar a zonas en las que la operación de los canales tradicionales se hace onerosa. Esta figura, que se conoce como Corresponsales Bancarios, permitió alcanzar una cobertura del 100% de los municipios en 2015 y el reto de canalizar una mayor cantidad de transacciones a través de productos financieros con el aprovechamiento de tecnología y de redes alternativas más livianas y menos costosas de las del sistema financiero tradicional (Superintendencia Financiera de Colombia, 2018).

Los corresponsales bancarios también conocidos como agentes y corresponsales no bancarios, son un canal de bajo costo que permite a los Bancos, compañías de financiamiento y cooperativas prestar sus servicios a través de establecimientos comerciales como tiendas de barrio, droguerías, supermercados o ferreterías, entre otros. Este modelo permite que las entidades financieras logren una mayor cobertura en lugares en los cuales no hay incentivos suficientes o capacidad para establecer una sucursal, como en municipios muy pequeños, zonas rurales o barrios marginales. En ese sentido se han convertido en un canal clave para ampliar la cobertura del sector financiero. El modelo y la estrategia de implementación difiere entre diferentes países e inclusive entre diferentes entidades financieras: mientras algunos utilizan los corresponsales bancarios con un modelo de “minisucursal” para ampliar cobertura y llegar a zonas alejadas, otros los utilizan como un cajero humano para descongestionar las oficinas y ampliar la red de cajeros. Otros los utilizan como satélite para profundizar y atender nuevos segmentos en zonas cercanas a su zona de influencia; así, en virtud de su funcionalidad, también varían los servicios ofrecidos. A pesar de los importantes avances en la extensión de los Corresponsales Bancarios, todavía persisten importantes retos tales como la desestimulación del manejo de efectivo fomentando una mayor intermediación y el manejo, distribución y liquidez de efectivo de los Corresponsales Bancarios (Banca de las Oportunidades, 2012).

Teniendo en cuenta uno de los retos de la corresponsalía bancaria, la distribución y manejo de efectivo se vuelven el foco de las entidades financieras y de los proveedores de distribución, ya que, al ampliarse la cobertura y las diferentes zonas de acceso, se vuelve riesgoso y con una alta probabilidad de robo. Por lo tanto, la planificación se vuelve una base esencial para este tipo de operaciones, ya que además de las restricciones y condiciones de seguridad de transporte tradicionales, se deberán tener en cuenta restricciones de seguridad poco estudiadas en un ruteo de vehículos y contemplar variables de inventario que permitan garantizar la demanda de un corresponsal bancario y los niveles de servicio del sistema.

Uno de los problemas típicos que conforman la gestión del efectivo para las entidades financieras es el de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) y sus variaciones aplicadas al sector de transporte de valores.

El VRP surge como un problema central en los campos de transporte, distribución y logística, siendo así un problema clásico de optimización combinatoria con múltiples aplicaciones que busca determinar las rutas de mínimo costo que debe realizar una flota de vehículos para atender la demanda de los clientes que se encuentran geográficamente dispersos (Luer, 2009). Sin embargo, para el enfoque de este documento, es importante mencionar la consideración de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW-vehicle routing problem with time windows) y aplicación de restricciones de riesgo basados en la distribución de valores permitiendo una distribución de efectivo segura en los corresponsales bancarios.

Adicional al análisis de los aspectos de distribución con ventanas de tiempo y restricciones de riesgo, se contempla, el sistema de gestión de los inventarios de efectivo y ruteo de vehículos de valores, de forma simultanea planteando entornos en los que se emplean políticas de reabastecimiento de inventario gestionado por el proveedor (VMI), permitiendo elegir el tiempo y el tamaño de las entregas procurando una reducción general de los costos logísticos. En el artículo se plantea un esquema en el cual se resuelve de manera conjunta el problema de la asignación de inventario y la determinación de las rutas para un conjunto de corresponsales bancarios atendidos por un mismo vehículo de valores, en el cual, mediante la decisión centralizada por parte del proveedor, se decide la cantidad de efectivo, las rutas para el proceso de distribución y entrega del mismo.

El estudio propuesto pretende generar un modelo que proporcione estrategias de seguridad para la distribución de valores actual basado en la situación de Colombia y el ambiente social en cada uno de sus municipios, donde se refleja índices de inseguridad, adicional a esto busca optimizar simultáneamente las decisiones de ruteo y de inventario contemplando a la vez estrategias de mitigación de riesgo que permita la distribución de efectivo para empresas de transporte de valores en corresponsales y/o oficinas bancarias teniendo en cuenta distintos niveles de inventarios, aportando de manera significativa en la optimización de costos de distribución, disminución de riesgos en la entrega de efectivo, disminución en los tiempos de planeación y aportando a uno de los objetivos de crecimiento de la inclusión financiera que es el manejo de efectivo.

La importancia de la tesis en la actualidad es la de integrar y aplicar decisiones en el sector logístico financiero con el fin de estudiar problemas industriales con un interés amplio de aplicación, permitiendo mejorar problemas tales como la planeación y distribución de efectivo en una red de puntos ya sean cajeros automáticos o corresponsales bancarios, control de inventarios de efectivo y

políticas de seguridad para la distribución de valores, estrategias que permiten a la industria del transporte de valores mejorar sus operaciones logísticas en términos de costo, eficiencia y mitigación de riesgo. En el ámbito científico, la tesis aporta nuevas perspectivas y campos de investigación en el sector financiero en términos de logística, campo que no se ha profundizado en la actualidad, ya que los proveedores de transporte de valores han buscado mantener modelos basados en condiciones de seguridad física y de conocimiento en rutas basados en la experiencia, de igual manera se dejan diferentes temáticas abiertas para seguir desarrollando conocimiento con el fin de mejorar los procesos de planeación en este tipo de sectores.

El documento se estructuró en ocho partes de la siguiente manera: En una primera instancia se presenta la introducción al trabajo de investigación y problema a tratar. En segunda instancia se presenta, el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación. En tercera instancia se muestra la problemática y sus estudios dentro de la literatura a partir de un estado del arte. En cuarta instancia se plantea la definición del problema y el modelo matemático a considerar y analizar, seguido de una heurística propuesta y las diferentes estrategias de gestión de riesgo para la distribución y manejo del efectivo, seguido de un análisis de resultados del modelo propuesto y pruebas computacionales. Finalmente, el planteamiento de conclusiones e investigaciones futuras que pueden llegar aportar al desarrollo amplio de la problemática planteada.

4 Objetivos y Pregunta de Investigación

4.1 Objetivos

4.1.1 Objetivo General

Diseñar un modelo y método de optimización para el transporte de efectivo con consideraciones de gestión de inventario y restricciones de riesgo.

4.1.2 Objetivos específicos

- Diseñar un modelo matemático y una heurística que optimicen la distribución y transporte de dinero y los costos de operación al momento de aprovisionar cada uno de los puntos de efectivo programados, incluyendo restricciones de riesgo y ventanas de tiempo.
- Realizar una revisión y análisis de la literatura científica sobre el problema de ruteo de inventarios y el problema de ruteo con medidas de riesgo buscando proponer la inclusión de una restricción de riesgo en un IRP con ventanas de tiempo.
- Validar y realizar pruebas experimentales al modelo seleccionado de acuerdo a la demanda de dinero a distribuir y las poblaciones a atender en el proceso de pagos de subsidio programado.

4.2 Preguntas de investigación

Las preguntas planteadas para el trabajo de investigación son:

1. ¿Cómo se puede modelar matemáticamente y encontrar soluciones de buena calidad al problema de ruteo de inventarios de valores, considerando restricciones de riesgo?

5 ESTADO DEL ARTE

A pesar de la desmaterialización de las transacciones financieras, posible gracias a las tarjetas de crédito y, más recientemente, a los sistemas de pago en línea, el dinero en efectivo todavía se usa ampliamente. Retirar dinero en cualquier momento es posible gracias a los cajeros automáticos (ATM) y en cualquier zona gracias a los corresponsales Bancarios. Los bancos subcontratan la carga y descarga de estos cajeros automáticos y/o corresponsales bancarios a empresas especializadas en el transporte de bienes valiosos. Su misión es transportar artículos valiosos como monedas, lingotes, billetes o joyas de un lugar a otro mientras se protegen contra posibles ataques. Los clientes de estas compañías de CIT (Cash In Transit) incluyen bancos, pero también supermercados y otras tiendas. Por lo tanto, es una actividad de transporte, pero se aplica a bienes valiosos, y las empresas de CIT tienen que planificar sus viajes diarios (Michallet J. P., 2014). Dada esta problemática, el propósito de este tipo de problemas es encontrar un conjunto de rutas óptimo de un depósito central a un conjunto de clientes con demandas conocidas contemplando condiciones seguras en el proceso de distribución. Con el fin de adaptarse mejor a las aplicaciones de la vida real, el VRP básico se ha enriquecido con restricciones y variantes adicionales, como por ejemplo, ventanas de tiempo para visitar a los clientes, operaciones de recogida y entrega, flota heterogéneas de vehículos, ruteo de inventarios, entre otras .

Para revisar el estado del arte sobre esta temática, se analiza la literatura en dos secciones donde la primera se basa en explicar el VRP como problema de ruteo de vehículos seguido en segunda instancia del IRP como problema en el ruteo de inventarios.

5.1 VRP- Problema de ruteo de vehículos

El VRP considera un depósito central, clientes que requieren una determinada demanda, una flota de vehículos disponibles con capacidad de carga, una planeación de la entrega de productos a los clientes. El objetivo es, minimizar los costos de transporte (distancia recorrida, número de vehículos, etc) cuando se diseñan las rutas de los vehículos que salen y regresan al depósito, satisfaciendo la demanda de los clientes y sin exceder la capacidad de los vehículos (Luer, 2009).

Existen diferentes variantes del VRP dependiendo de las restricciones que se consideren en el planteamiento del problema en cuestión. Algunas de las restricciones que se tienen en cuenta en estos problemas son:

- Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempos (VRP with time Windows- VRPTW) adiciona la restricción de que existen ventanas de tiempo

en la que los clientes deben ser atendidos. Las ventanas de tiempo hacen referencia a la existencia de un límite de tiempo dentro del cual un cliente debe ser atendido (Medina, 2011).

- Restricción de flota heterogénea de vehículos la cual se basa en un modelo en el que la flota de vehículos tienen diferentes capacidades y algunos pedidos solo pueden ser atendidos por ciertos vehículos (Herazo Padilla, 2013).
- Restricción de múltiples depósitos que consiste en asignar rutas a vehículos para visitar clientes que se encuentran dispersos en un área y en el cual cada vehículo se encuentra ubicado en uno de muchos depósitos desde el cual este debe iniciar su recorrido y al cual debe retornar una vez terminada la ruta asignada al inicio del periodo (Mateos, 2013).
- Restricción de entrega y recogida de mercancía que a diferencia del VRP incluye la restricción de recoger y entregar mercancía en lugar de solo entregarla (Cepeda, 2013)
- Restricción de entregas fraccionadas, en la cual hay que decidir cuánto material entregara cada uno de los vehículos y en donde se elimina la restricción de que los clientes deben ser visitados solo una vez permitiendo que un mismo cliente sea abastecido por distintos vehículos, ayudando así a reducir los costos totales de la ruta (Atuesta, 2011), entre otras.

En esta propuesta de investigación se considerarán modelos con ventanas de tiempo, restricciones de riesgo y seguridad y problemas de ruteo con manejo de inventarios, los cuales se detallarán a continuación.

El problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRP with time Windows-VRPTW) adiciona al VRP la restricción de que existen ventanas de tiempo que hace referencia a la existencia de un límite de tiempo dentro del cual un cliente debe ser atendido (Medina, 2011). Es un problema de distribución que se enfoca en minimizar costos de transporte a través del diseño de rutas que permitan abastecer desde un depósito central a un conjunto de puntos (clientes) geográficamente dispersos. Las rutas deben estar diseñadas de tal forma que cada cliente es visitado solo una vez por un vehículo en un intervalo de tiempo determinado; todas las rutas comienzan y terminan en el depósito y las demandas totales de todos los puntos de una ruta en particular no deben exceder la capacidad del vehículo (Perez, 2015).

Existen en la literatura dos tipos de ventanas de tiempo que se pueden utilizar: las ventanas de tiempo suaves las cuales permiten la presencia de tiempos de espera

y entregas tardías en las instalaciones del cliente, aunque se incurre en una penalidad en la función objetivo. El otro tipo de ventana de tiempo son las ventanas fuertes, que, a diferencia de las ventanas suaves, no permiten tiempos de espera ni llegadas tardías. (Perez, 2015).

Adicionalmente es importante analizar las restricciones de seguridad y riesgo que se pueden implementar en un modelo de distribución. Pocas investigaciones contemplan variables que mitiguen el riesgo de la distribución en ruta de un punto a otro. Sin embargo, en lo concerniente al transporte de dinero o bienes valiosos a partir de los últimos años se ha venido ganando la importancia por parte del mundo académico buscando generar alternativas a los problemas relacionados para el sector CIT(Cash in transit) respecto a variables de seguridad, medición de exposición al riesgo y minimización de la imprevisibilidad de rutas buscando la generación de planes de distribución con rutas seguras y rentables para múltiples clientes.

Los problemas de transporte de dinero, buscan planear la distribución de efectivo a los múltiples puntos demandantes, con costo mínimo de operación y con un índice de seguridad alto, disminuyendo índices de siniestralidad y permitiendo el cumplimiento de los tiempos de entrega requeridos por los diferentes clientes demandantes del servicio. En la operación real, con el fin de aumentar la seguridad del transporte de efectivo, es necesario la variación adecuada de las rutas y los horarios de distribución, haciendo más compleja la forma de predecir las rutas. Sin embargo las transportadoras de valores se enfocan más en la experiencia diaria y en el refuerzo de tripulantes con elementos de seguridad sin basarse en un modelo matemático específico que controle y restrinja altas probabilidades de robo y riesgo de la operación de distribución (Talarico L. , 2015 A).

El ruteo de vehículos para transporte de dinero implica análisis robustos con ventanas de tiempo y limitantes de riesgo y operación, por lo cual se hace factible las técnicas de programación entera para construir y resolver de manera eficiente este tipo de problema, el cual encuentra soluciones óptimas para instancias pequeñas. Dependiendo de la aplicación específica, el riesgo debe ser evaluado en todos sus componentes y se requiere expresar una medida de los niveles de seguridad y protección. Cuanto mayor sea el riesgo, menores serán los niveles de seguridad y protección. El concepto general de riesgo, se define en términos de tres componentes principales: (1) la ocurrencia de un evento, que se expresa como la probabilidad / frecuencia de que ocurra un evento específico no deseado; (2) la vulnerabilidad, que es la resistencia a los objetos a ser protegidos, cuando no se produce; (3) la exposición (o posibles consecuencias), que cuantifica un valor equivalente homogéneo ponderado de personas, bienes e infraestructura afectados durante y después del evento (Talarico L. , 2015 A).

Teniendo en cuenta que en el ruteo de vehículos para la distribución de valores es necesario contemplar restricciones de seguridad que permitan mitigar riesgos en la operación, (Michallet J. P., 2014) establece dos consideraciones como posibles prolongaciones en los tiempos de entrega y variación de las rutas para entrega a cada nodo, contemplando así ventanas de tiempo suaves con penalización en la entrega, prefiriendo asumir sobrecosto en la operación por penalización en los tiempos de llegada y no asumiendo pérdidas por robo de efectivo. En su tesis, Michallet plantea un modelo PVRPTS (periodic vehicle routing problems with time spread constraints on services) que contempla la redistribución de los nodos de entrega y las prolongaciones en los tiempos de entrega (Ventanas de tiempo suaves) con el fin de distribuir la probabilidad de riesgo de robos en tránsito (Michallet J. P., 2014).

5.2 IRP- Problemas de ruteo e inventarios

Consecuentemente al análisis de distribución con restricciones de riesgo, se hace análisis a una variante del problema VRP, el IRP, el cual contempla el problema de inventarios y ruteo de forma simultánea planteando entornos en los que se emplean políticas de reabastecimiento de inventario gestionado por el proveedor (VMI), permitiendo elegir el tiempo y el tamaño de las entregas procurando una reducción general de los costos logísticos. Al decidir cuándo y cuánto entregar a los clientes, los proveedores pueden reducir sus costos globales de distribución suavizando sus horarios de entrega y combinando de manera eficiente en un mismo periodo visitas a clientes geográficamente cercanos entre sí. (Coelho, 2012)

Dado lo anterior, nace el modelo de ruteo de inventario IRP (Inventory Routing Problem) el cual fundamenta su enfoque en la estrategia de colaboración VMI (Vendor Managed Inventory) proceso en el cual el vendedor asume la tarea de decidir sobre la asignación del inventario en la cadena de suministros, generando pedidos de compra para el reabastecimiento del inventario de los clientes, mediante un proceso centralizado con el propósito de reducir los costos de almacenamiento y los faltantes de productos en los puntos de distribución (Arango, Romano, & Zapata, 2016).

El IRP tiene como finalidad combinar el problema de asignación del inventario para reducir los costos de mantener mercancía, al tiempo que optimiza la utilización de los recursos de transporte. El modelo IRP se encarga de asignar el inventario a cada uno de los clientes y a partir de esto asigna las rutas para abastecerlos (Azuma, Coelho, & Von Zuben, 2011). Este tipo de modelos de IRP se denominan como

enfoques de optimización simultánea, mediante el cual se genera un esquema de descomposición de las decisiones en dos fases: en la primera se asigna el inventario y en la segunda se generan las rutas (Campbell & Savelsbergh, 2004).

Dentro de los estudios del IRP se han propuesto métodos exactos para resolverlo para un único vehículo, encontrando dificultades para resolver problemas de grandes dimensiones. Para resolver esta limitación, se han propuesto heurísticas y meta heurísticas con el fin de resolver problemas con un único vehículo y múltiples periodos, dentro de las cuales están los modelos de solución de (Archetti, Bertazzi, Hertz, & Speranza, 2011) sugiriendo una heurística llamada Hybrid Approach to Inventory Routing para solucionar un IRP contemplando un vehículo, un producto, capacidad limitada de almacenamiento y transporte. Además, utilizan dos diferentes políticas de inventarios, Order to Up y Maximum Level que permiten fijar el tipo de abastecimiento deseado para cada cliente. La política OU establece que la capacidad de inventario de un cliente se llena cada vez que el cliente recibe la visita de un vehículo, a diferencia de la política ML que permite decidir las cantidades a entregar al momento de realizar la visita a cada cliente sin estar obligado a utilizar la capacidad máxima de inventario de los clientes. Dentro de su modelo de solución, se aplican operadores de búsqueda Tabú y optimizadores comerciales para resolver una serie de sub-problemas usando métodos de programación entera mixta (Archetti, Bertazzi, Hertz, & Speranza, 2011).

A continuación, se relaciona una tabla con la relación de trabajos de investigación generados alrededor del IRP con sus diferentes enfoques y variaciones.

Autores	Año	Modelo
(Kleywegt, Nori, & Savelsbergh, 2004)	2004	DIRP
(Campbell & Savelsbergh, 2004)	2004	IRP
(Aziz & Moin, 2007)	2007	MP-IRPMP
(Fengjiao & Qingnian, 2008)	2008	IRPSD
(Zeng & Wang, 2010)	2010	SIRPTW
(Archetti, Bertazzi, Hertz, & Speranza, 2011)	2011	IRP
(Azuma, Coelho, & Von Zuben, 2011)	2011	IRPTS
(Liu & Lee, 2011)	2011	IRPTW
(Van Anholt, Coelho, Laporte, & Vis, 2016)	2013	PDIRPTW

Tabla 5-1 Revisión bibliográfica modelos de IRP

En resumen, (Kleywegt, Nori, & Savelsbergh, 2004) plantean el modelo DIRP (Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem) enfocado en la necesidad de resolver el problema de ruteo de inventario cuando se implementa una práctica de reposición de inventario administrada por el proveedor (VMI). Con VMI, los proveedores monitorean los inventarios de sus clientes y deciden cuándo y cuánto se debe reponer el inventario de cada cliente. El IRP intenta coordinar la reposición de inventario y el transporte de tal manera que el costo se minimice a largo plazo. Para este modelo se formula un proceso de decisión de Markov con ruteo de inventario estocástico y se proponen métodos de aproximación para encontrar buenas soluciones con un esfuerzo computacional razonable.

(Campbell & Savelsbergh, 2004) en su investigación presentan un enfoque de solución para el problema de ruteo de inventario basados en las situaciones en las que un proveedor tiene la capacidad de tomar decisiones sobre el momento y el tamaño de las entregas, así como el ruteo, con la restricción de que los clientes no pueden tener faltantes de inventario. Se desarrolla un enfoque de dos fases basado en la descomposición del conjunto de decisiones: la primera fase utiliza programación de entregas, mientras que la segunda fase emplea heurística de ruteo y programación. El objetivo del modelo planteado es crear una metodología de solución adecuada para las instancias de la vida real a gran escala.

(Aziz & Moin, 2007) plantean un algoritmo genético denominado MP-IRPMP (multi product multi period inventory routing problem) en donde se hace referencia al IRP como la coordinación de la gestión de inventario y transporte, proporcionando el ruteo óptimo del vehículo y, al mismo tiempo, minimizando los costos de transporte e inventario. El problema que se aborda es del tipo varios a uno con horizonte finito, múltiples periodos, múltiples proveedores, centro de acopio único, con una flota homogénea y capacidad limitada, alojados en un depósito. Se propone un algoritmo genético híbrido para determinar una política óptima de inventario y transporte que minimice el costo total diseñando los correspondientes operadores de cruce y mutación encontrando buenos resultados con una simple variación.

(Fengjiao & Qingnian, 2008) en su modelo IRPSD (The inventory routing problem with split pick-ups based on genetic algorithm) manifiestan que en una cadena de suministro, los fabricantes se centran solo en los elementos individuales (como el inventario y las rutas de entrega) y no consideran las interacciones en la misma, por lo cual buscan la solución óptima del problema de inventario y entregas de manera combinada. Se centran en una red de plantas de ensamblaje único de varios periodos, múltiples proveedores y configuran un modelo matemático, para luego resolver el problema de ruteo de inventario con recolecciones divididas (IRPSP) por algoritmo genético.

(Zeng & Wang, 2010) en su modelo SIRPTW (Stochastic demand inventory routing problem with soft time windows) toman en cuenta las limitaciones de las ventanas de tiempo suave, especialmente, las penalizaciones por violar los límites de la ventana de tiempo incluyéndolas en la función objetivo. Presentan un problema de ruteo de inventario con demanda estocástica y ventanas de tiempo suave (IRPSTW) considerando un modelo en el que el proveedor supervisa el nivel de inventario del cliente, tamaño de flota limitada y con una misma capacidad, se ignoran los tiempos de entrega, cada vehículo puede realizar múltiples entregas por día a cada cliente, no se consideran costos de inventario en el centro de acopio y el costo de transporte solo depende de la distancia de viaje.

(Archetti, Bertazzi, Hertz, & Speranza, 2011) plantean una heurística híbrida para un problema de ruteo de inventario considerando un tiempo discreto en el que un proveedor tiene que atender a un conjunto de clientes en un horizonte de múltiples periodos. Se contempla una restricción de capacidad para el inventario de cada cliente y no se puede presentar faltantes de inventario. Se consideran dos políticas de reposición diferentes: orden a nivel y nivel máximo. Un único vehículo con capacidad limitada, el costo de transporte es proporcional a la distancia recorrida, mientras que el costo de mantenimiento de inventario es proporcional al nivel de inventario de los clientes y el proveedor. El objetivo es minimizar la suma de los costos de inventario y transporte. El modelo planteado presenta una heurística que combina un esquema de búsqueda tabú con modelos de programación enteros mixtos.

(Azuma, Coelho, & Von Zuben, 2011) plantean un modelo de ruteo de inventario con transbordo (IRPTS_ Inventory-routing problem with transshipment) en donde las decisiones de ruteo y de inventario se toman simultáneamente, contemplando la posibilidad de ejecutar transbordos entre clientes para reducir aún más el costo total objetivo. El modelo contempla los transbordos, ya sea del proveedor a los clientes o entre clientes. Se propone una heurística de búsqueda de gran tamaño adaptativa para resolver el problema, administrando las rutas de los vehículos, mientras que el problema restante de determinar las cantidades de entrega y los movimientos de transbordo se resuelven por un algoritmo de flujo de red, con políticas de nivel máximo y orden a nivel.

(Liu & Lee, 2011) generan un modelo heurístico para resolver el problema IRPTW (Inventory routing problem with time windows) resolviendo el problema de decisión de VRPTW (vehicle routing problem with time windows) y control de inventario simultáneamente ya que los dos se afectan mutuamente. Dado que es un problema NP-hard, proponen un modelo heurístico de dos fases, en donde la primera fase es encontrar la solución inicial y la segunda fase, es mejorar la solución adoptando búsqueda tabú de vecindario variable (VNTS_ variable neighborhood tabu search) seleccionando mejores soluciones de vecindario, para obtener una solución óptima.

(Van Anholt, Coelho, Laporte, & Vis, 2016) con su modelo PDIRPTW (inventory routing problema with pickups and deliveries with time Windows) aplicado al manejo de efectivo en cajeros automáticos, presentan un problema de ruteo de inventario de múltiples periodos con recolecciones y entregas en cajeros automáticos. Un solo cliente puede proporcionar y recibir inventario en diferentes periodos, ya que su demanda cambia dinámicamente a lo largo del horizonte de planeación y puede llegar a ser positiva o negativa. El modelo contempla la recepción y dispensación de efectivo. El problema en primera instancia se formula como un modelo de programación lineal entera mixta a gran escala. Dado el tamaño y la complejidad del problema, se descompone en varios sub problemas para hacer más manejable la solución y corrección de variables. Los sub problemas resultantes se resuelven por el método de branches and cuts.

De esta revisión de literatura se puede concluir que modelos como el VRP con sus diferentes variaciones y restricciones permiten la generación e implementación de diseños logísticos de distribución seguros logrando costos de distribución y de manejo de inventarios óptimo para todo el modelo de negocio de distribución de valores, donde uno de sus mayores actores son las transportadoras de valores y los Bancos como sus clientes principales. La implementación de sistemas matemáticos en este tipo de modelos de negocio ha permitido generar nuevas alternativas e investigaciones en el campo del transporte de valores, permitiendo el desarrollo de modelos eficientes no solo pensando en una alta inversión en costos físicos de seguridad sino en alternativas de distribución eficientes que permiten la mitigación de riesgos de siniestralidad tanto de la flota como de sus clientes.

La contribución de esta tesis es la modelación de un problema de ruteo de inventarios y el análisis de la distribución de valores para un caso real, según la revisión realizada no se encuentran modelos de ruteo de inventarios para la distribución de valores con restricciones de gestión de riesgo por lo cual se quiere generar construcción de conocimiento en esta línea de trabajo.

Dado lo anterior se diseñan varios modelos que configuran las posibles entregas de efectivo dentro de una red de corresponsalía los cuales se definen a continuación teniendo como base el concepto de un IRP:

IRPTW (Inventory Routing Problem with Time Windows) aplicado al manejo de distribución de efectivo contemplando ventanas de tiempo para la entrega y satisfaciendo la demanda entre los tiempos definidos por el cliente,

Risk IRP (Risk Inventory Routing Problem) el cual involucra una variable y restricciones de riesgo con el fin de mitigar la siniestralidad en las entregas de efectivo de acuerdo a la pérdida máxima que se quiere asumir dentro del modelo de distribución

AFC IRP (Arc Frequency Constraint Inventory Routing Problem) el cual mezcla la lógica del ruteo de inventarios con la restricción de repetición de arcos de entrega de efectivo para disminuir la previsibilidad de la ruta y generar variabilidad en las rutas programadas del modelo.

Por último, se establece el modelo AFC Risk IRPTW (Arc Frequency Constraint Risk Inventory Routing Problem) mezclando restricciones de riesgo y frecuencia de arco para el ruteo de efectivo con el fin de asegurar la distribución de valores en una red de corresponsalía

6 Definición del problema y modelo matemático

6.1 Definición del problema y formulación matemática

Teniendo en cuenta que la distribución de efectivo es intrínsecamente peligrosa con alta exposición de siniestro, la planeación de efectivo se vuelve indispensable ya que además de pensar en las condiciones de seguridad físicas de la flota, se debe pensar en la generación de modelos que permitan dar un balance entre la necesidad del cliente, las condiciones de distribución y los riesgos a mitigar con la implementación de restricciones. Al realizar un análisis de la ruta del vehículo de un punto origen a un punto destino es importante tener en cuenta la variable riesgo, definiendo riesgo como la magnitud de los daños o valor posible de pérdida frente a una vulnerabilidad ante un peligro conocido. Dado esta situación, no solo es necesario la implementación de medidas de seguridad como uso de vehículos blindados o personas con entrenamiento y uso de armas, sino que a medida que el riesgo aumenta con la frecuencia de distribución de entrega a puntos específicos, es necesaria la implementación de rutas o viajes poco predecibles o generados al azar con el fin de despistar los posibles ataques al sistema (Talarico L. , 2015).

Esta propuesta considera las decisiones de ruteo de vehículos con inventarios, restricciones de ventanas de tiempo duras y restricciones de riesgo enfocadas en la imprevisibilidad de ruta —en una cadena de abastecimiento de efectivo compuesta por un depósito (Centro de efectivo) y múltiples minoristas (Puntos corresponsales y/o oficinas bancarias).

Dado lo anterior, se propone la fusión de dos modelos importantes como lo es el manejo de inventarios y el ruteo de vehículos junto con la consideración de restricciones importantes tales como Riesgo acumulado en la ruta, ventanas de tiempo y limite en la frecuencia de utilización de arcos cada cierto número de periodos consecutivos, necesarias en la entrega de corresponsales bancarios y/o oficinas bancarias con el fin de optimizar un modelo en términos de costos logísticos y de inventario. Este modelo se denotará RclRPTW (Risk constraint inventory routing problem with time Windows) en corresponsalía y/o Oficinas bancarias.

Se introduce el RclRPTW para la distribución de efectivo contemplando restricciones de riesgo. Para ello se considera una red de distribución de efectivo con $N = \{1,2,3, \dots, n\}$ nodos en el que se envía desde un subconjunto centro de efectivo (CE) $i = \{0\}$ a un subconjunto $j = \{1,2,3, \dots, n\}$ de corresponsales bancarios (CB) en un horizonte de tiempo $T = \{1,2,3, \dots, t\}$ usando un único vehículo de capacidad limitada, definiendo un subconjunto n_1 alias del conjunto N y así

contemplar una red de distribución de efectivo con inicio en el CE y pasando por los CB hasta volver nuevamente al CE.

Supuestos:

El modelo de distribución de valores contempla el manejo de un único centro de efectivo con capacidad ilimitada, desde el cual se ejecutan entregas de efectivo vía terrestre por medio de un único vehículo que tiene todas las medidas de seguridad con capacidad limitada para la distribución de efectivo. El corresponsal bancario al cual se le realizan las entregas de efectivo maneja una capacidad limitada, una demanda conocida y es único por ciudad de distribución, con un horario de entrega definido en un intervalo de tiempo y contemplando rangos de ventanas para la entrega, tiempo de entrega en el punto igual a cero y las pérdidas de efectivo por siniestralidad igual a cero teniendo en cuenta que se está evaluando el riesgo en la distribución mas no en la custodia del efectivo por parte del corresponsal Bancario.

Parámetros:

$a_j =$ Capacidad de almacenamiento de efectivo del corresponsal bancario j [\\$]

$C_{ij} =$ Costo de ruta por kilometro recorrido desde el nodo i al nodo j [\\$]

$h_j =$ Costo de inventario del corresponsal bancario j [\\$]

$Inicial_j =$ Inv. inicial de efectivo en el corresponsal bancario j [\\$]

$d_{i,j} =$ Distancia en kilometros del nodo i al nodo j [Km]

$o_{i,j} =$ Tiempo en minutos de ir del nodo i al nodo j [Min]

$s_{j,t} =$ Demanda de pagos en efectivo del nodo j en el periodo de tiempo t [\\$]

$e_{j,t} =$ Ventana temprana del CB j en el periodo de tiempo t [Min]

$l_{j,t} =$ Ventana tardia del CB j en el periodo de tiempo t [Min]

$Y =$ Capacidad de efectivo del vehiculo [\\$]

$T_m =$ Riesgo maximo asumir en la distribución de efectivo [\\$ – Km]

En cada periodo discreto $T = \{1,2,3, \dots, t\}$ la empresa de valores presenta una cantidad de efectivo lo suficientemente grande para abastecer los corresponsales $j \in CB$ que tienen una demanda específica de efectivo por periodo s_{jt} para cubrir los pagos de cliente en cada municipio. El nivel de inventario del centro de efectivo que suple la cadena de distribución se considera ilimitado para términos de la investigación.

Todo corresponsal Bancario j cuenta con un $Inicial_j$ para iniciar la operación de pagos, en donde este parámetro es conocido. El Banco fija a cada corresponsal j su capacidad o nivel de efectivo máximo a_j y establece un nivel de efectivo $In_j \leq a_j$ con el fin de mitigar el nivel de exposición de efectivo en el corresponsal de acuerdo a su nivel de riesgo.

Se expresa h_j como el costo de mantener inventario de efectivo en el corresponsal y/o oficina bancario $j \in CB$. El nivel de inventario de efectivo al final del horizonte de planeación puede ser diferente al nivel de inventario inicial, convirtiendo el problema en no periódico. Las entregas desde el centro de efectivo hacia los corresponsales y/o oficinas bancarios en cada periodo t serán realizadas por un vehículo de capacidad limitada Y capaz de atender a varias tiendas en una misma ruta. Los corresponsales que se encuentren dentro de la ruta para ser visitados en el periodo t , serán atendidos por el vehículo en ese periodo t .

El parámetro e_{jt} indica el inicio de la ventana del corresponsal j en el periodo t y el parámetro l_{jt} como el fin de la ventana del corresponsal j en el periodo t , donde el parámetro o_{nn} es el tiempo de viaje de ir desde el nodo i al nodo j donde i, j pertenecen al $CB' = CB \cup \{0\}$ y $d_{i,j}$ como la distancia en kilómetros recorrida por el carro de valores entre un punto CE o CB a otro CB.

Teniendo en cuenta el riesgo que se asume en cada periodo al momento de entregar efectivo a cada corresponsal, se establece Tm como el riesgo máximo asumir en la distribución de efectivo a programar, con el fin de garantizar un valor máximo de perdida en caso de presentarse siniestralidad y de esta manera asegurar unas rutas que estén dentro del margen de riesgo a asumir dentro del modelo

Variables de decisión:

$x_{i,j,t}$ = Si el vehiculo selecciona ir de un nodo i a otro j en un periodo de tiempo t

$In_{j,t}$
= Nivel de inventario del corresponsal bancario j en el periodo de tiempo t [\$]

$b_{j,t}$ = Cant. efectivo a entregar al CB j en el periodo de tiempo t [\$]

$z_{n,t}$ = Si el CB o CE n es visitado en el periodo de tiempo t

$w_{j,t}$ = Hora de llegada al corresponsal bancario j en el periodo de tiempo t

$q_{n,t}$ = Cant. efectivo transportado por el vehiculo en el periodo de tiempo t

$R_{n,t}$ = Riesgo presente en la entrega en el periodo de tiempo t

Se establece C_{ij} como el costo de transporte de ir desde el nodo i al nodo j y x_{ijt} como una variable binaria igual a 1 si y solo si el vehículo selecciona ir del arco i, j en el periodo t o 0 de lo contrario, en donde el corresponsal j cuenta con un inventario en un periodo de tiempo t ($In_{j,t}$) sujeto a las entregas que le realice el vehículo de valores en un periodo de tiempo t determinado, dado esto se define la variable w_{jt} como la hora de llegada al corresponsal bancario en el periodo t y $q_{n,t}$ como la cantidad de efectivo transportado por el vehículo en un periodo de tiempo t contemplando una variable de riesgo $R_{n,t}$ la cual se encarga de medir el riesgo presente al momento de ejecutar una entrega $b_{j,t}$ en el corresponsal bancario j sujeto a la cantidad de efectivo disponible durante el tiempo t de ruta del vehículo, si se cumple la condición $z_{n,t}$ en la que el corresponsal es visitado.

Usando esta notación, el modelo base para el RclRPTW se puede expresar de la siguiente manera:

$$(1) \text{ Min } Z: \sum_n \sum_{n1} \sum_t C_{n,n1} * x_{n,n1,t} + \sum_j \sum_t h_j * In_{j,t}$$

Sujeto a:

$$(2) In_{jt} = In_{j,t-1} + b_{jt} - s_{jt} \quad \forall j \in CB, \forall t \in \beta \mid t > 1$$

$$(3) In_{j,1} = Inicial_j + b_{j,1} - s_{j,1} \quad \forall j \in CB$$

$$(4) \sum_j b_{j,t} \leq Y \quad \forall t \in \beta \mid t > 1$$

$$(5) \sum_n x_{n,j,t} + \sum_n x_{j,n,t} = 2 * z_{jt} \quad \forall j \in CB, \forall t \in \beta \mid t > 1$$

$$(6) \sum_{n1} x_{n,n1,t} = z_{n,t} \quad \forall t \in \beta \mid t > 1, \forall n \in CB$$

- (7) $\sum_{n1} x_{n1,n,t} = z_{n,t} \forall t \in \beta | t > 1, \forall n \in CB$
- (8) $\sum_t x_{n,n,t} = 0, \forall n \in CB$
- (9) $q_{jt} \geq q_{n,t} - b_{j,t} - (1 - x_{n,j,t} * 2 * Y), \forall n \in CB, \forall j \in CB, \forall t \in \beta | t > 1$
- (10) $q_{0t} = \sum_j b_{j,t} \forall t \in \beta | t > 1$
- (11) $x_{n,n,t} \in \{0,1\}$ Donde $n \in CB, t \in \beta$
- (12) $z_{n,t} \in \{0,1\}$ Donde $n \in CB, t \in \beta$
- (13) $In_{j,t} \geq 0$ Donde $j \in CB, t \in \beta$
- (14) $b_{j,t} \geq 0$ Donde $j \in CB, t \in \beta$
- (15) $w_{j,t} \geq 0$ Donde $j \in CB, t \in \beta$
- (16) $q_{n,t} \geq 0$ Donde $n \in CB, t \in \beta$
- (17) $R_{n,t} \geq 0$ Donde $n \in CB, t \in \beta$

El objetivo del modelo es minimizar la suma de los costos de inventario de efectivo presentados en los corresponsales bancarios y el costo por entrega de efectivo a cada uno de los corresponsales programados en un periodo de tiempo t como se describe en la ecuación (1), en la cual se plasma el costo de ir de un punto corresponsal a otro teniendo en cuenta la distancia de recorrido en donde por cada kilómetro de recorrido equivale a \$1 de costo, y por parte del inventario se plasma un porcentaje del total de dinero que mantiene en inventario el corresponsal bancario.

Las restricciones (2) y (3) contemplan el flujo de inventario de efectivo de los corresponsales bancarios para cualquier periodo de tiempo t y para el periodo 1 respectivamente. La restricción (4) establece la capacidad del carro de valores utilizado para la distribución de efectivo. Las restricciones (5), (6), (7) y (8) garantizan el cierre del ciclo de ruta de punta a punta (Centro de efectivo-Corresponsal-Centro de efectivo), en donde (5) garantiza que el vehículo que está visitando un corresponsal salga a visitar al siguiente corresponsal en el periodo de tiempo t, donde (6) y (7) garantiza que los corresponsales hayan sido visitados y por ende al final del recorrido (8) garantiza que el vehículo no visite un mismo nodo en

un horizonte de tiempo t , buscando de esta manera que no se realice un bucle en nodos en ningún periodo. La restricción (9) mide la disminución de efectivo que va presentando el carro de valores cada vez que va ejecutando una entrega en un corresponsal bancario. La restricción (10) garantiza que la cantidad de efectivo que vaya a salir desde el CE cubra la ruta de distribución a cada corresponsal bancario. Finalmente, las restricciones (11) a (17) indican la naturaleza de las variables de decisión.

6.2 Estrategias y modelamiento matemático de gestión de riesgo

Para gestionar el riesgo se puede incluir al modelo presentado las siguientes restricciones:

6.2.1 Inventario máximo en corresponsal Bancario

Esta primera estrategia para mitigar el riesgo de la operación está enfocada en limitar el nivel de inventario de efectivo en los corresponsales bancarios. Es decir, se restringe el nivel máximo de entrega de efectivo de acuerdo a la política de inventario máximo permitido por el Banco al corresponsal bancario teniendo en cuenta el inventario disponible en cada periodo programado. El nivel de inventario máximo asignado a los corresponsales es basado en políticas de riesgo evaluadas por el Banco teniendo en cuenta las cifras de siniestralidad o pérdida de efectivo y el cubrimiento máximo de la póliza de seguro según la criticidad y ubicación del punto corresponsal.

$$(18) b_{jt} \leq a_j - In_{j,t-1} \forall j \in CB, \forall t \in \beta \mid t > 1$$

$$(19) b_{j1} \leq a_j - Inicial_j \forall j \in CB$$

$$(20) b_{jt} \leq a_j * z_{j,t} \forall j \in CB, \forall t \in \beta$$

Donde (18) Controla la cantidad a entregar teniendo en cuenta la capacidad máxima de inventario del corresponsal bancario, (19) Controla la primera entrega al corresponsal de acuerdo al disponible de efectivo inicial y a la capacidad máxima

de efectivo del corresponsal bancario y finalmente (20) satisface la cantidad de inventario máximo si el corresponsal bancario es visitado o no.

6.2.2 Medición del riesgo en el recorrido del efectivo sobre la ruta programada

Teniendo en cuenta que analizar, predecir y actuar sobre los riesgos genera oportunidades de disminución de siniestros en la entrega de efectivo, se establece una restricción que mide el nivel de riesgo de efectivo por kilómetro recorrido teniendo en cuenta un factor probable de riesgo asumido en la ruta de entrega.

Adicional a esta restricción, se contempla que el riesgo acumulado de entrega de efectivo sobre una ruta programada no debe ser superior al riesgo máximo asumir por parte del Banco por cada periodo programado. Teniendo en cuenta estas premisas se evalúan dos, con y sin límite de riesgo, en donde se determina que establecer una política de riesgo permite generar resultados óptimos referente al costo total del modelo y no hay una diferencia amplia en términos de costo si no se aplica la política, por lo cual es mucho más beneficioso establecerla sabiendo que se está mitigando la probabilidad de ocurrencia de un siniestro y el valor máximo de pérdida dentro del modelo de operación.

$$(21) R_{jt} \geq R_{i,t} + q_{i,t} * 0.15 * d_{j1,j} - (1 - x_{i,j,t}) * 2 * Tm, \forall j \in CB, \forall t \in \beta$$

$$(22) R_{0t} = 0, \forall t \in \beta$$

$$(23) R_{nt} \leq Tm, \forall n \in CB, \forall t \in \beta$$

En (21) el factor 0.15 representa el porcentaje de riesgo asumido sobre el valor de distribución que va quedando en el vehículo al ir visitando cada uno de los corresponsales y 2 representa un valor grande que al ser factor del límite de riesgo garantiza que el nivel de riesgo del vehículo al visitar los corresponsales se cumpla teniendo en cuenta que el riesgo va aumentando por cada kilómetro recorrido. Se define j_1 como subconjunto de j contemplando el recorrido de visita entre un nodo CB a otro nodo CB. De igual manera (22) garantiza que el nivel de riesgo acumulado en el centro de efectivo o punto de partida inicial sea cero, y (23) garantiza que el riesgo acumulado de entrega de efectivo sobre una ruta programada no debe ser superior al riesgo máximo asumir por parte del Banco en la programación de entregas de efectivo por periodo. Tm es definido como el valor máximo que desea

asumir el Banco en el proceso de distribución contemplando los cubrimientos de la póliza en el proceso de distribución de efectivo

6.2.3 Ventanas de tiempo de entrega aleatorias para disminución de imprevisibilidad de ruta

Las ventanas hacen referencia a la existencia de un límite o intervalo de tiempo dentro del cual un corresponsal debe ser atendido. Dentro del modelo matemático se manejan ventanas de tiempo estrictas o fuertes, bajo la cual, las soluciones son factibles si, además de las características o restricciones que debe cumplir el modelo de ruteo, el corresponsal es atendido dentro del intervalo de tiempo establecido, pero la solución se vuelve no factible si el corresponsal es atendido después del horario máximo permitido de su ventana y/o el vehículo de valores llega antes de la ventana de tiempo temprana ocasionando que el tiempo de espera del vehículo se incremente y se genere riesgo por tiempos de espera.

La aleatoriedad en las ventanas permite generar diversidad de rutas y múltiples intervalos de atención a los corresponsales, disminuyendo los movimientos rutinarios en los que puede incurrir el carro de valores al momento de entrega en los corresponsales bancarios.

Es importante saber que los momentos más críticos y de mayor riesgo se presentan cuando el dinero está expuesto en el recorrido del carro de valores y se une la situación de la zona en la que se está transportando.

Para el manejo de la aleatoriedad se proponen dos tipos de ventanas, amplias y cortas, con el fin de evaluar su comportamiento respecto a costo, riesgo y entrega del efectivo en los corresponsales.

El uso de ventanas de tiempo está enfocado en generar una distribución aleatoria de manera uniforme y en un rango de tiempo específico los horarios de llegada posible para la entrega de efectivo en cada corresponsal bancario disminuyendo la probabilidad de rutas repetitivas para la entrega del efectivo.

$$(24) w_{jt} \geq e_{jt} * z_{j,t}, \forall j \in CB, \forall t \in \beta$$

$$(25) w_{jt} \leq l_{j,t} * z_{j,t}, \forall j \in CB, \forall t \in \beta$$

$$(26) w_{jt} \geq w_{j1,t} + o_{j1,j} - ((1 - x_{j1,j,t}) * (l_{j1,t} + o_{j1,j})), \forall j \in CB, \forall t \in \beta$$

Donde (24) y (25) garantizan que las ventanas de tiempo temprana y tardía se cumplan en el intervalo de visita definido para el corresponsal y (26) busca que el tiempo de llegada al corresponsal se cumpla teniendo en cuenta el tiempo de un corresponsal a otro

6.2.4 Restricción de entrega consecutiva de acuerdo al periodo de tiempo programado

Se genera el planteamiento de una restricción de entrega consecutiva de efectivo con el fin de evaluar la mitigación de riesgo de entrega de dinero en los corresponsales bancarios

$$(27) X_{ijt} + X_{ijt+1} + X_{ijt+2} \leq 1, \forall i \in CB, \forall j \in CB, \forall t \in \beta$$

La restricción (27) relacionada con restricción de arco aumenta la imprevisibilidad de entrega continua en corresponsales, disminuyendo aún más el riesgo de siniestralidad en la entrega de dineros por parte del carro de valores y disminuyendo los riesgos de exposición de robo al corresponsal, ya que se hace menos predecible la rutina frecuente de entregas entre una ciudad y otra y el modelo de operación entre un periodo y otro.

Al generarse entregas sin restricción de arco se disminuyen los costos de ruteo sin embargo el riesgo de exposición aumenta ya que se hace predecible las entregas continuas entre un corresponsal a otro así se genere aleatoriedad en los tiempos de entrega del punto corresponsal.

La estrategia para mitigar el riesgo de la operación está basada en la cantidad de entregas continuas de efectivo que puede recibir un corresponsal bancario desde diferentes rutas en un periodo de tiempo definido el cual debe ser mayor a dos periodos para volver a darse la misma ruta de entrega con el fin de generar imprevisibilidad de la ruta y disminuir niveles de riesgo en la distribución del efectivo, ya que al atender el corresponsal continuamente hace que aumente los niveles de exposición tanto del corresponsal como de la llegada del vehículo al momento de ejecutar la entrega. Se definen dos o más periodos teniendo en cuenta la capacidad del vehículo y la capacidad máxima de inventario del corresponsal, ya que de ser mayor el intervalo de visita, hace que el nivel de inventario del corresponsal sea mayor y no se respete las políticas de seguridad del Banco para el corresponsal

7 Heurística propuesta

El algoritmo propuesto ha sido desarrollado en el lenguaje de programación Java, en ambiente Windows 10 y los experimentos computacionales fueron ejecutados en un procesador Intel ® Core ™ i7-3537U CPU @2,50 GHz y 8 GB de RAM. Los experimentos computacionales se realizaron teniendo en cuenta las instancias evaluadas en el modelo matemático con el fin de comparar sus resultados, un centro de efectivo y siete municipios a distribuir en un horizonte de tiempo de 50 periodos, contemplando una distribución terrestre por medio de un único vehículo de valores con capacidad limitada, saliendo desde un centro de efectivo con capacidad ilimitada y retornando al mismo una vez se cumpla la programación de ruta. Las instancias trabajadas están basadas en condiciones reales que se manejan en la distribución de corresponsales bancarios.

Se plantea una heurística basada en el algoritmo de método de ahorros de Clark Wright (Rocha, Gonzalez, & Orjuela, 2011) generando de esta manera una solución inicial armando la matriz de cantidades a entregar periodo a periodo, garantizando el cumplimiento de las restricciones de manejo de inventarios, ventanas de tiempo y capacidad del vehículo. Cada periodo se inicializa con el primer corresponsal a ser atendido de acuerdo a la programación aleatoria uniforme de horarios generada para cada corresponsal. Luego de fijar la matriz de cantidades a entregar por periodo, se genera una ruta maestra la cual contempla una visita a todos los corresponsales, posterior a esto se comienza a iterar variando la ruta maestra definida, dado que periodo a periodo se ira validando cada cliente que no sea necesario entregar efectivo de acuerdo a su nivel de inventario y se ira eliminando de la ruta maestra con el fin de dejar rutas por periodo que contemplen aquellos corresponsales que requieren realmente el efectivo.

Se trabaja bajo el modelo IRPTW puesto que es un problema de interés académico e industrial, en donde de acuerdo a las diferentes revisiones bibliográficas, es uno de los modelos que propone una manera eficiente de encontrar una solución cercana al óptimo, además que contemplando la variación de las ventanas de tiempo periodo a periodo, permite generar rutas diversas encontrando soluciones factibles en tiempos de computo eficientes para procesos de planeación que al ser aplicados en la realidad, generan una eficiencia en reducción de tiempos para la toma de decisiones (Olivera, 2004). De igual manera se está trabajando con una de las estrategias de mitigación de riesgo propuesta ya que contempla la diversificación de rutas por el establecimiento aleatorio de entregas por corresponsal.

Por otro lado la heurística proporciona resultados que al compararlos con los resultados del modelo matemático con sus respectivas variaciones, muestra una

variación mínima respecto a costos de distribución, costos de inventario, tiempos de codificación eficientes y soluciones de ruta que al implementarlo en un proceso de planeación de efectivo real en el sector financiero generan mejoras contundentes en el proceso, adicional a que tanto con el modelo matemático como con la heurística se esta solucionando y mostrando la posibilidad de generar rutas alternativas y no solo mantener el uso de la misma ruta que se implementa por experiencia en un proceso de distribución cubierto bajo condiciones de seguridad física.

7.1 Codificación de la solución

La solución al problema está dada por matrices y vectores de números enteros y reales según corresponda, para el modelo propuesto se usó programación orientada a objetos dentro del cual se definieron seis clases principales tales como corresponsal, periodo, vehículo, Distancia-tiempo, instancia y penalización las cuales contienen las siguientes variables o parámetros para su conexión lógica y procesamiento del modelo final.

- **Corresponsal:**
 - **Es centro efectivo:** Variable binaria que guarda el valor de decisión de si el nodo es centro de efectivo o corresponsal
 - **Nombre:** Variable tipo texto que guarda el nombre del corresponsal
 - **Capacidad:** Variable tipo double que guarda la capacidad máxima del corresponsal Bancario
 - **Porcentaje costo inventario:** Variable tipo double que guarda el porcentaje de costo de sostenimiento de inventario de efectivo en el corresponsal
 - **Inventario:** Variable tipo double que contempla el inventario de inicio por cada periodo del corresponsal
 - **Salidas efectivo:** Variable tipo double que contempla los pagos o demanda de efectivo ejecutada por el corresponsal
 - **Factor riesgo:** Variable tipo double que guarda el valor de riesgo presente al momento de distribuir efectivo a un corresponsal

- **Distancia-Tiempo:**
 - **Distancia:** Variable tipo double que guarda la distancia presente entre un par de nodos

- **Tiempo:** Variable tipo int que guarda el tiempo presente entre un par de nodos
- **Periodo:**
 - **ID:** Variable tipo double que contempla el número de periodo a evaluar
 - **Pagos:** Variable tipo double que guarda el número de pagos a ejecutar por parte del corresponsal por cada periodo
 - **Inventario inicial:** variable tipo double que almacena el inventario de inicio del corresponsal por periodo
 - **Inventario final:** variable tipo double que almacena el inventario final con el que finaliza el corresponsal cada periodo
 - **Valor entregado:** variable tipo double que almacena el valor de entrega por parte del vehículo de valores por cada periodo
- **Vehículo:**
 - **Capacidad:** Variable tipo double que almacena la capacidad máxima del vehículo de valores para transportar efectivo
 - **Nivel Riesgo:** Variable tipo double que contempla el nivel máximo de riesgo asumir por el vehículo de valores
 - **Cantidad efectivo:** Variable tipo double que almacena la cantidad de efectivo a transportar por el vehículo de valores
 - **Valor Max riesgo:** Variable tipo double que contempla el máximo riesgo de efectivo asumir en el transporte del efectivo en una ruta programada
 - **Costo kilómetro recorrido:** Variable tipo double que almacena el valor de costo definido para cada kilómetro recorrido por el vehículo de valores

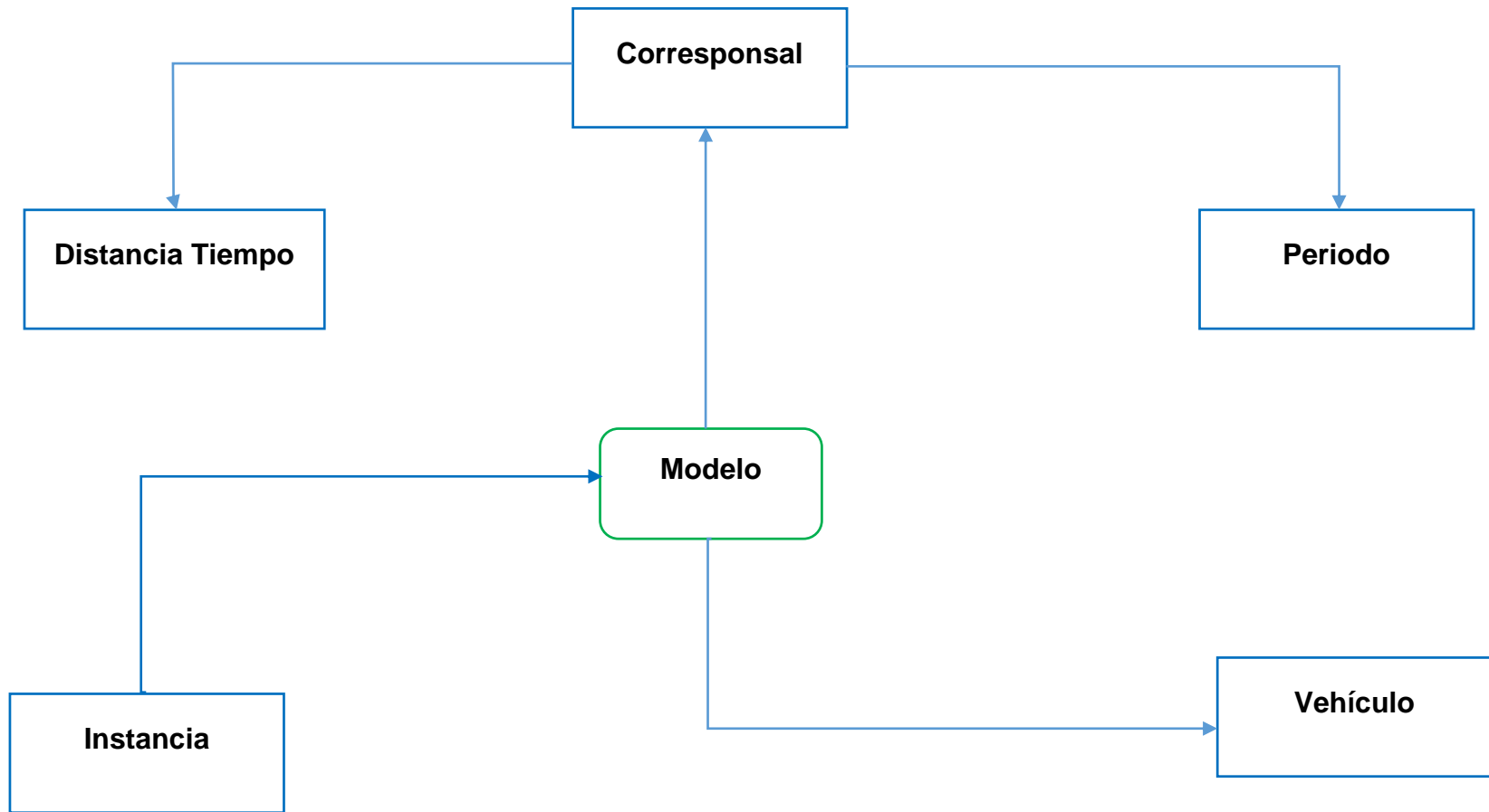


Ilustración 7-1 Modelo entidad relación heurística distribución de efectivo

7.2 Algoritmo general

El algoritmo trabajado está basado en el método de ahorros de Clark Wright (Rocha, Gonzalez, & Orjuela, 2011) evaluando el cumplimiento de restricciones tales como ventanas de tiempo fuertes, manejo de capacidades de inventario, capacidades máximas de distribución del vehículo, satisfacción de la demanda en los puntos corresponsales y aleatoriedad en la asignación de rutas de acuerdo a los tiempos de visita por periodo

```
1:  Entrada
2:  Inicio
3:  Resultado=Matriz condiciones iniciales del corresponsal en el periodo 0
4:  For ID=0 hasta periodo
5:      Organizar los municipios de menor a mayor a partir de la ventana
        inicial de llegada asignada en el periodo
6:      Calcular Hora de llegada al corresponsal teniendo en cuenta el
        corresponsal más cercano en distancia
7:
8:      For Ci=0 hasta corresponsal
9:      If ( Demanda es mayor o igual que inventario corresponsal, resultado
        no excede capacidad vehículo (  $\sum entrega\_efectivo >$ 
        capacidad), then
10:         Calcular Nivel de inventario: Inventario final (t-1) + Cant. Efectivo a
            entregar – demanda de efectivo en punto
11:         Calcular Cantidad de efectivo disponible en el vehiculo: Cantidad de
            efectivo transportado – cantidad de efectivo a entregar
12:         Calcular Cantidad de efectivo a entregar: Capacidad de
            almacenamiento de efectivo – inventario de efectivo periodo anterior
13:         Calcular Diferencia entre ventana inicial actual y hora de llegada del
            vehículo de valores
14:         Calcular Máximo de diferencias de ventana inicial
15:         Calcular Diferencia entre ventana final actual y hora de llegada del
            vehículo de valores
16:         Calcular Mínimo de diferencias de ventana final
17:     End if
18:     If (resultado hora llegada esta por fuera de ventana tiempo del
        corresponsal (Ventana temprana > hora llegada < Ventana Tardia)
        y el máximo de diferencias de  $V_i <$  Mínimo de diferencias de  $V_f$  Then
```

18: **Generar** Suma de máximo de diferencias de ventana inicial a hora de llegada al corresponsal

19: **If** (resultado hora llegada esta por fuera de ventana tiempo del corresponsal (*Ventana temprana* > *hora llegada* < *Ventana Tardia*) y el máximo de diferencias de VI > Mínimo de diferencias de Vf **Then**

20: **Eliminar** el municipio con menor ventana final y asignarlo al periodo inmediatamente anterior

21: Next Ci

22: **Next ID**

23: Generar ruta principal con total de corresponsales, ejecutar método Clark and Wright. Periodo a periodo, todo corresponsal cuya cantidad de efectivo a entregar es cero, es eliminado de la ruta de asignación y distribución

24: **For** ID= 0 hasta periodo

25: For Ci=0 hasta corresponsal

26: **Generar** ruta de entrega para periodo i modificando la ruta principal

27: **Generar** cálculo de riesgo acumulado por periodo de entrega y corresponsal visitado $R_{jt} = R_{i,t} + q_{i,t} * 0.15 * d_{j1,j}, \forall j \in CB, \forall t \in \beta$

28: **Next Ci**

29: **Next ID**

30: **Fin**

Se configuran parámetros iniciales de la heurística (Variable resultado) tales como municipios a distribuir, matriz nxn de distancias y tiempos, inventarios de efectivo inicial por municipio, capacidades máximas de inventario tanto del corresponsal como del vehículo de valores, horizonte de tiempo, demanda de efectivo por cada corresponsal en un periodo de tiempo n y ventanas de tiempo para la recepción de efectivo (Son definidas bajo una distribución aleatoria uniforme con el fin de generar variabilidad en el proceso de distribución).

El algoritmo propuesto presenta dos componentes que se combinan y logran encontrar soluciones factibles con tiempos de cómputo cortos, en donde en primera instancia genera una solución inicial y posterior a ésta, genera diferentes iteraciones mejorando la solución inicial encontrada por periodo. La heurística en primera instancia arma una matriz de cantidades a distribuir por periodo con el fin de definir una ruta base teniendo en cuenta el primer municipio a visitar de acuerdo a su ventana de tiempo de recepción de efectivo inicial, posterior a esto comienza a evaluar las restricciones de demanda, capacidad del vehículo y capacidades de inventario de los corresponsales bancarios con el fin de comenzar a variar la ruta y

garantizar el inventario necesario por periodo de acuerdo a la demanda estimada conocida por periodo. Cada municipio que se va asignando a la ruta cumple las condiciones de cercanía en términos de distancia del punto inmediatamente anterior y evalúa la ventana de tiempo posterior a atender de acuerdo a la necesidad de efectivo que tenga el corresponsal para el periodo. Posterior se calcula el parámetro de riesgo acumulado de cada ruta por periodo. El riesgo se contempla como una variable de medición acumulada durante el proceso de distribución mas no restringe el proceso de asignación de ruta del modelo.

Los niveles de inventario se mantienen de acuerdo a la demanda a cubrir y la capacidad máxima del corresponsal, por lo que la heurística busca entregar la máxima cantidad de efectivo posible con el fin de evitar las visitas constantes al corresponsal. Una vez se cumplen las condiciones de ventanas de tiempo de entrega, nivel de inventario para atender la demanda programada y la capacidad máxima de inventario por periodo, el algoritmo itera hasta finalizar los periodos programados de la instancia y cumpliendo las restricciones aplicadas, y se detiene hasta realizar los movimientos de todos los clientes programados.

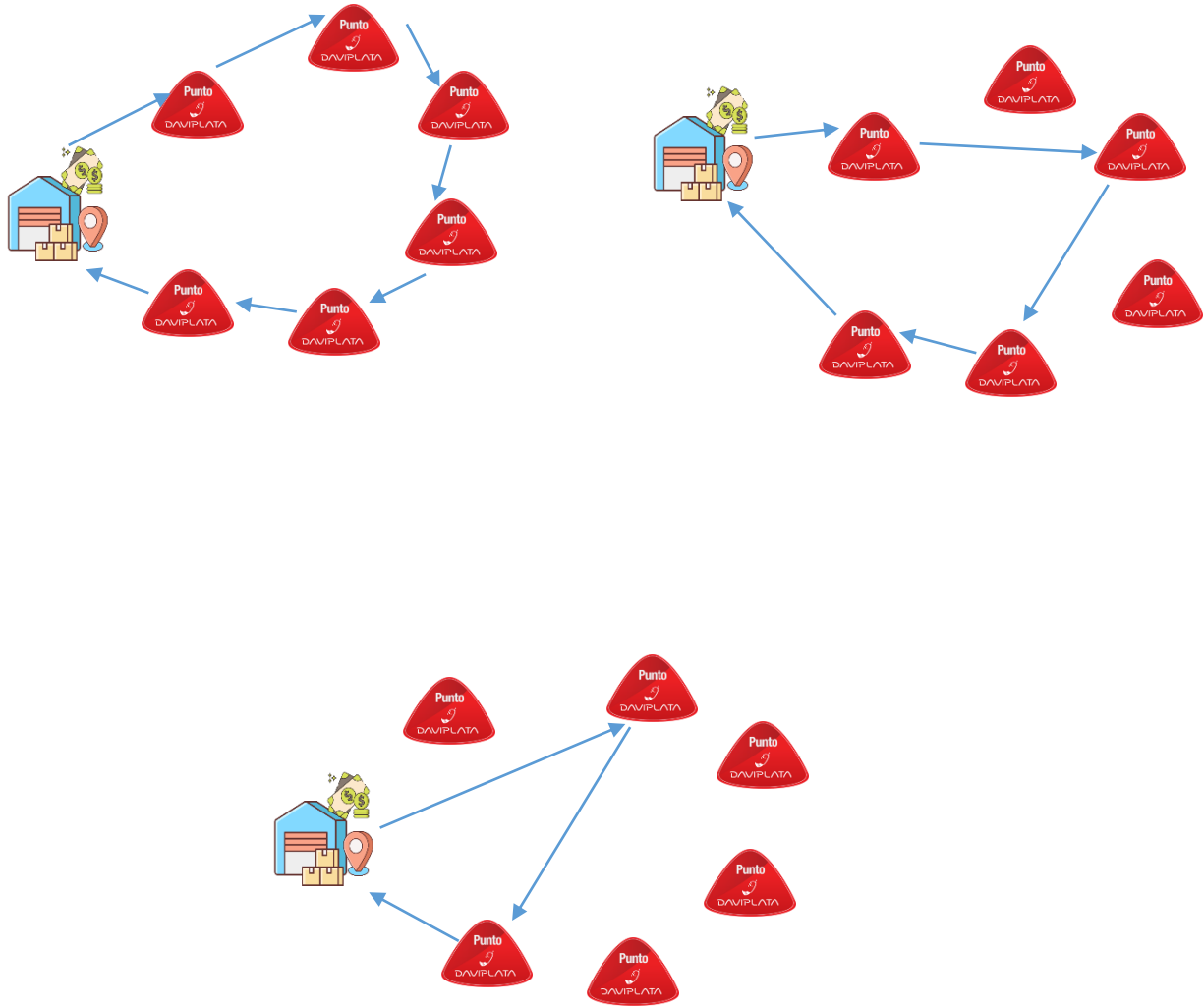


Ilustración 7-2 Grafo ilustrativo de solución periodo a periodo heurística

8 Análisis de resultados

8.1 Lenguaje de programación

La propuesta de investigación acerca del modelo de distribución de valores con restricciones de seguridad se desarrolló usando el solver de programación matemática CPLEX versión 12.8 bajo el lenguaje GAMS para encontrar una solución óptima a los problemas trabajados tales como IRP, IRPTW, Risk IRP, AFC IRP y AFC Risk IRPTW.

Este solver utiliza el método de Branch-and-Bound para resolver el problema a optimalidad. Sin embargo, se requiere de tiempos de cómputo importantes (de hasta 97.000 segundos) con un procesador Intel® Core™ i7-3537U CPU @2,50 GHz y 8 GB de RAM y gran capacidad de almacenamiento de datos. Por lo tanto, el solver CPLEX intenta encontrar el óptimo o la mejor solución a cada una de las instancias evaluadas para 50 periodos dentro de un intervalo de tiempo definido de 108 millones de segundos equivalente a 30.000 Horas.

8.2 Instancias de prueba

Los experimentos computacionales se realizan a 4 instancias de prueba donde se evalúan cinco tipos de variaciones del IRP con 4 tipos de demanda aleatorias entre 0 y 120 Millones, contemplando ventanas de tiempo fuertes con una distribución aleatoria discreta uniforme tanto para ventanas amplias como cortas en un intervalo de 0-6 Horas y 0-2 Horas respectivamente. Las distancias manejadas en los escenarios están dadas en kilómetros y los tiempos de recorrido y ventanas están dados en minutos.

8.2.1 Localización de corresponsales bancarios y centro de efectivo

Las instancias de prueba toman como puntos de distribución siete municipios de Antioquia, Colombia dentro de los que están Girardota, Bello, Don Matías, La Ceja, Envigado, Copacabana, Barbosa y un centro de efectivo con sede en la ciudad de Medellín. A continuación, se encuentra un mapa del Departamento de Antioquia con la distribución geográfica de los municipios.

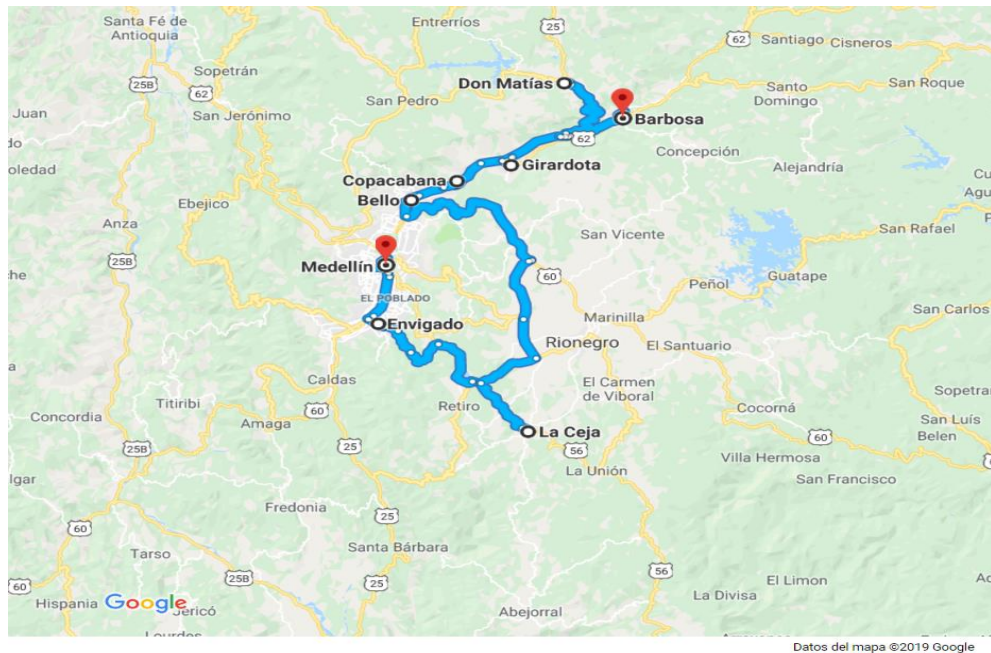


Ilustración 8-1 Mapa de Antioquia. Ruteo de corresponsales

Las distancias y tiempos de recorrido son tomados de Google Maps 2018, teniendo como referencia datos de recorrido promedio reales.

Distancias (km)	Medellin	girardota	Bello	Don Matias	La Ceja	Envigado	Copacabana	Barbosa
Medellin	-	26	12	50	44	13	18	42
girardota	26	-	16	29	58	36	11	21
Bello	12	16	-	40	58	24	8	32
Don Matias	50	29	40	-	81	60	35	29
La Ceja	44	58	58	81	-	38	65	74
Envigado	13	36	24	60	38	-	27	52
Copacabana	18	11	8	35	65	27	-	27
Barbosa	42	21	32	29	74	52	27	-

Tabla 8-1 Distancias entre municipios de distribución

Tiempos (Min)	Medellin	girardota	Bello	Don Matias	La Ceja	Envigado	Copacabana	Barbosa
Medellin	-	35	18	73	66	18	27	48
girardota	35	-	27	48	95	48	21	26
Bello	18	27	-	63	75	28	19	40
Don Matias	73	48	63	-	130	88	56	46
La Ceja	66	95	75	130	-	62	89	108
Envigado	18	48	28	88	62	-	41	63
Copacabana	27	21	19	56	89	41	-	34
Barbosa	48	26	40	46	108	63	34	-

Tabla 8-2 Tiempos entre municipios de distribución

8.2.2 Demanda de los corresponsales bancarios

A continuación, se muestra la distribución aleatoria uniforme de las demandas de efectivo por cada uno de los corresponsales para suplir las salidas de efectivo por las actividades propias del corresponsal bancario. Se maneja una demanda promedio por periodo de 52 Millones con un límite máximo de 120 millones, la cual está alineada con las condiciones de capacidad del corresponsal y los niveles de riesgo que puede llegar a asumir de acuerdo a su distribución geográfica

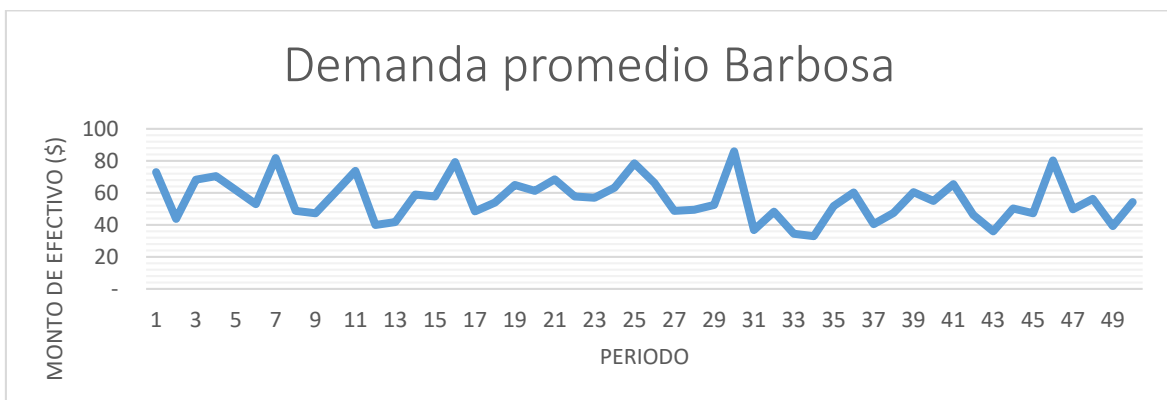


Ilustración 8-2 Demanda promedio Barbosa

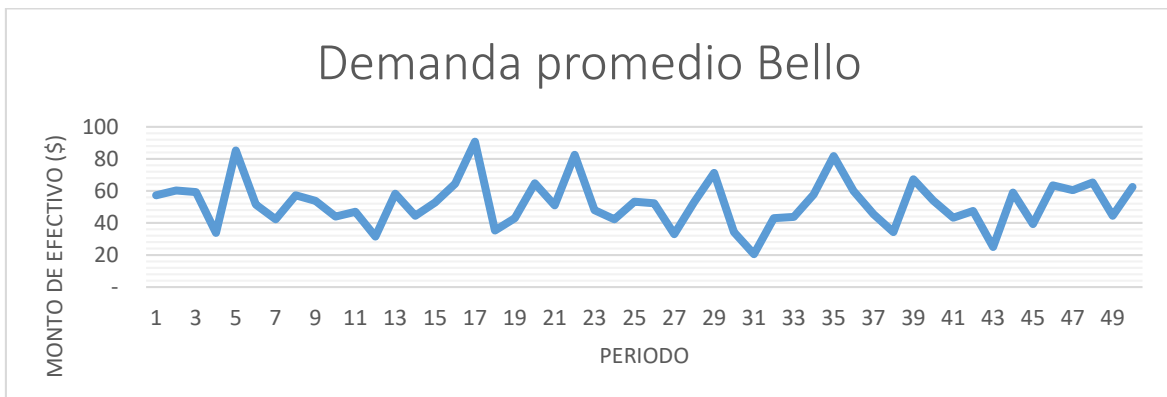


Ilustración 8-3 Demanda promedio Bello

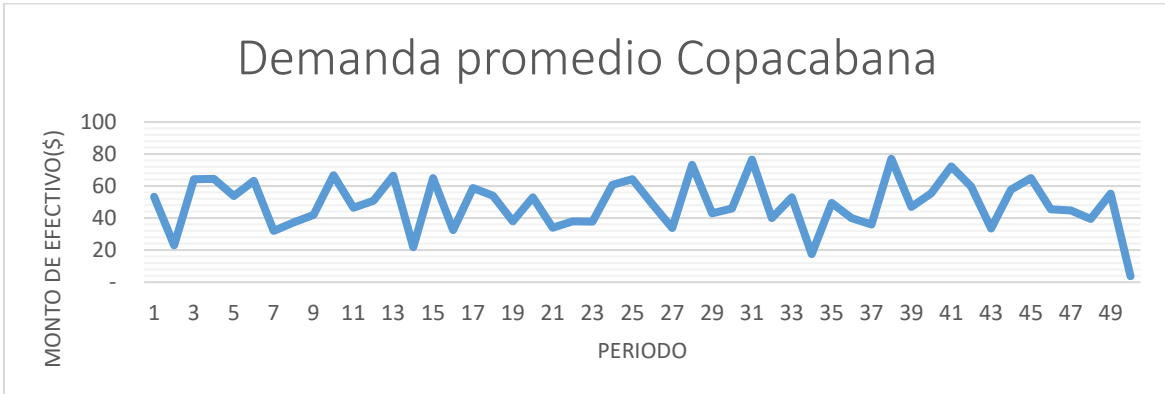


Ilustración 8-4 Demanda promedio Copacabana

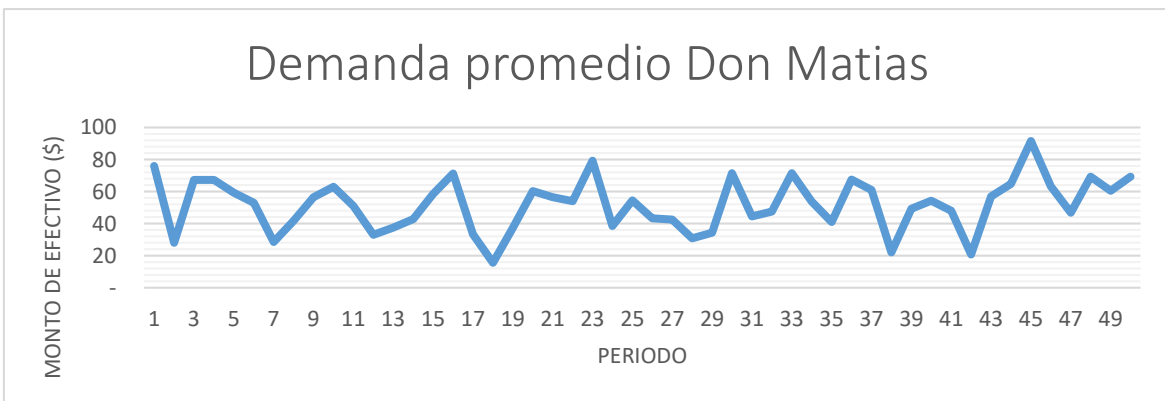


Ilustración 8-5 Demanda promedio Don Matias

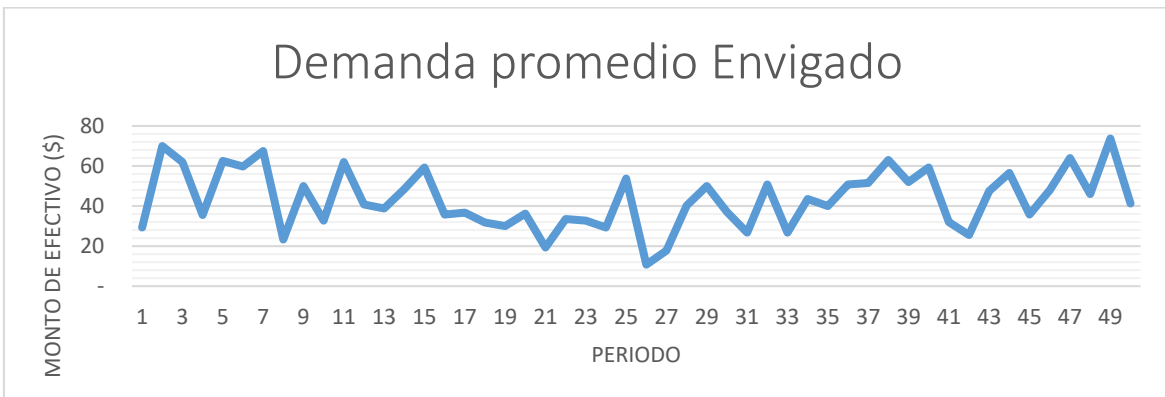


Ilustración 8-6 Demanda promedio Envigado

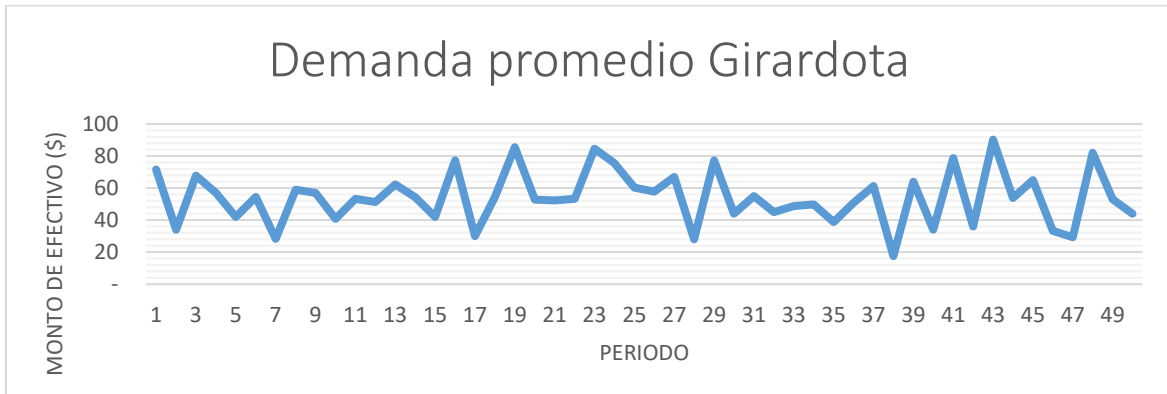


Ilustración 8-7 Demanda promedio Girardota

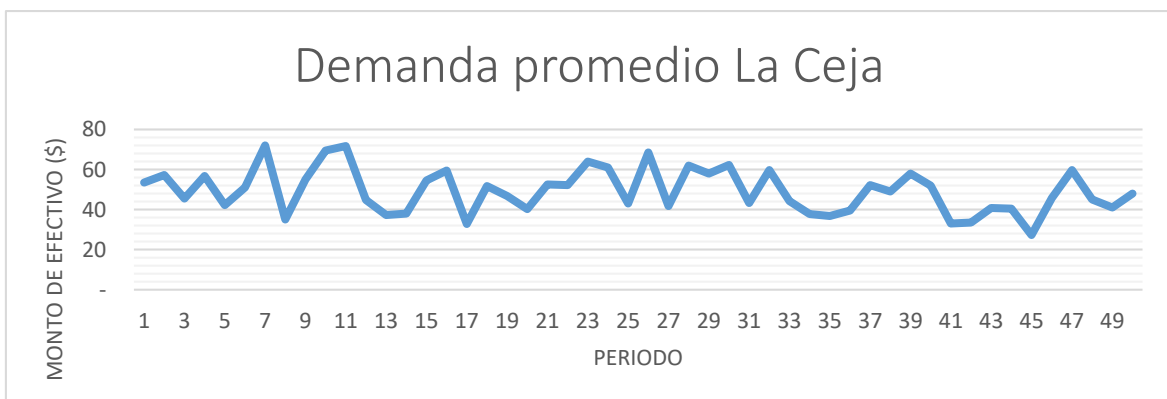


Ilustración 8-8 Demanda promedio La Ceja

8.2.3 Ventanas de tiempo

La ventana de tiempo inicial manejada en las instancias de prueba está dada en una hora promedio de inicio de las 12:57 PM con límite máximo a las 6:00 PM y límite mínimo a las 07:06 AM. La ventana de tiempo final se maneja bajo dos intervalos respecto a la ventana de tiempo inicial, de dos horas y seis horas determinadas como corta y amplia respectivamente. La ventana de tiempo corta tardía está dada en una hora promedio de finalización de 02:49 PM con un límite máximo a las 08:57 PM y un límite mínimo a las 09:03 AM. Mientras que la ventana de tiempo amplia tardía está dada en una hora promedio a las 06:56 PM con un límite máximo a las 11:59 PM y un límite mínimo a la 01:07 PM

8.3 Análisis de estrategias de gestión de riesgo

A continuación, se presenta un análisis de las variables evaluadas para el modelo de IRP y sus diferentes variaciones contemplando el uso de 4 tipos de demanda aleatoria. Las variables son evaluadas respecto a la variación presentada teniendo como base un IRP sin restricciones y llegando a un IRP con restricciones de arco, manejo de ventanas fuertes cortas y aplicando una restricción de un nivel máximo de riesgo al momento de ejecutar entregas de efectivo.

8.3.1 Medida de desempeño: Costo total de ruta

Al analizar el costo de ruta de los diferentes modelos de IRP, como se observa en la gráfica 8.14 *Costo total de ruta _ promedio de demandas*, los modelos IRPTW y AFC Risk IRPTW que contemplan la restricción de ventanas de tiempo cortas, son las que mayor costo generan puesto que el número de visitas al corresponsal y el valor de inventario generado en el mismo aumenta, dado que al tener una ventana corta el tiempo de entrega y el nivel de servicio se vuelven indispensables, por lo que el modelo busca hacer la mayor cantidad de entrega de efectivo posible con el fin de atender los corresponsales en los tiempos establecidos.

Sin embargo, el establecer ventanas de tiempo cortas, independiente de que el costo aumenta, encuentran optimalidad mientras que los que están con escenarios de ventanas de tiempo amplia encuentran una solución factible con un GAP específico.

Con el fin de hacer comparables los diferentes escenarios de IRP, se genera un ajuste del costo total de cada escenario que no encontró optimalidad, basado en la disminución del GAP del costo, hallando el valor posible óptimo y tomando como base de referencia el escenario con menor número de restricciones y variaciones. En la gráfica 8.3-6 *Costo total de ruta _ promedio de demandas*, se denota los costos totales ajustados y el valor promedio de disminución del GAP por escenario.

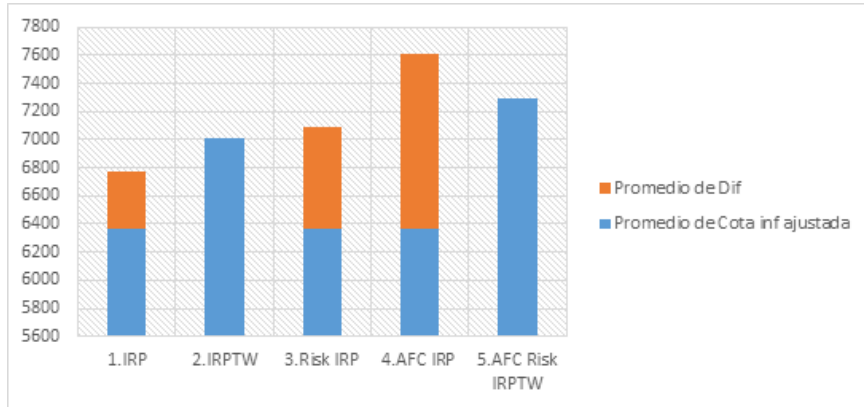


Ilustración 8-9 Costo total de ruta _promedio de demandas

El escenario con mayor GAP frente a la solución óptima fue el de restricción de arco con ventana amplia, puesto que al tener un intervalo de tiempo más amplio y restringir el número de llegadas continuas hace que la búsqueda de una solución óptimas sea dispendioso y consuma demasiados recursos de sistema.

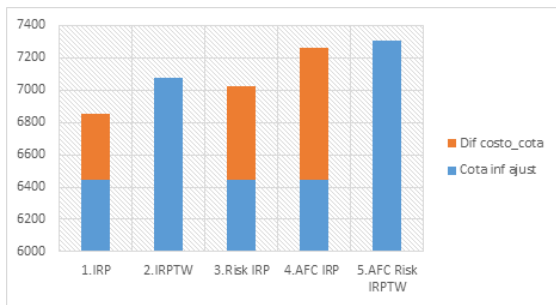


Ilustración 8-10 Costo total _ Demanda 1

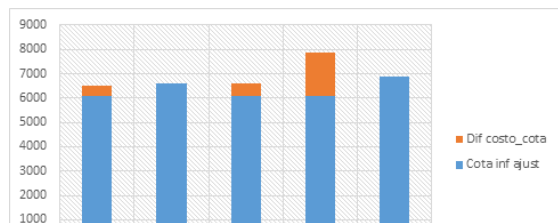


Ilustración 8-11 Costo total _ Demanda 2

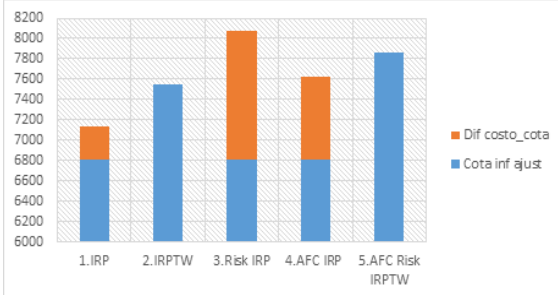


Ilustración 8-12 Costo total _ demanda 3

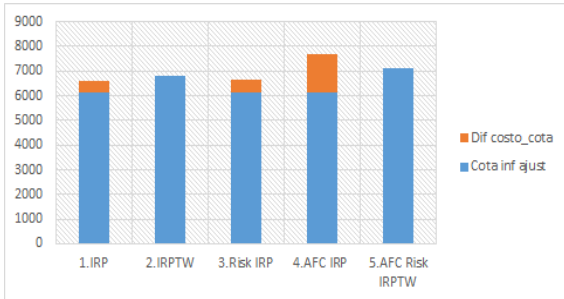


Ilustración 8-13 Costo total - Demanda 4

Modelo	Instancia	CI	CR	Costo total	GAP	Cota inf	Cota inf ajustada	Dif
1.IRP	Dem 1	169,72	6.684,00	6.853,72	5,9%	6.446,61	6.446,61	407,11
2.IRPTW	Dem 1	170,15	6.903,00	7.073,15	0,0%	7.073,15	7.073,15	-
3.Risk IRP	Dem 1	169,96	6.851,00	7.020,96	8,5%	6.425,58	6.446,61	574,35
4.AFC IRP	Dem 1	174,47	7.086,00	7.260,47	12,1%	6.379,05	6.446,61	813,86
5.AFC Risk IRPTW	Dem 1	185,64	7.120,00	7.305,64	0,0%	7.305,64	7.305,64	-
1.IRP	Dem 2	169,72	6.355,00	6.524,72	7,1%	6.064,07	6.064,07	460,65
2.IRPTW	Dem 2	161,94	6.461,00	6.622,94	0,0%	6.622,94	6.622,94	-
3.Risk IRP	Dem 2	188,40	6.432,00	6.620,40	8,7%	6.045,09	6.064,07	556,33
4.AFC IRP	Dem 2	148,32	7.711,00	7.859,32	24,8%	5.910,21	6.064,07	1.795,25
5.AFC Risk IRPTW	Dem 2	189,99	6.674,00	6.863,99	0,0%	6.863,99	6.863,99	-
1.IRP	Dem 3	165,84	6.968,00	7.133,84	4,6%	6.806,40	6.806,40	327,44
2.IRPTW	Dem 3	160,44	7.389,00	7.549,44	0,0%	7.549,44	7.549,44	-
3.Risk IRP	Dem 3	153,75	7.917,00	8.070,75	16,7%	6.719,71	6.806,40	1.264,35
4.AFC IRP	Dem 3	178,07	7.441,00	7.619,07	9,8%	6.870,12	6.806,40	812,67
5.AFC Risk IRPTW	Dem 3	167,54	7.699,00	7.866,54	0,0%	7.866,54	7.866,54	-
1.IRP	Dem 4	176,47	6.406,00	6.582,47	6,7%	6.142,76	6.142,76	439,71
2.IRPTW	Dem 4	178,97	6.613,00	6.791,97	0,0%	6.791,97	6.791,97	-
3.Risk IRP	Dem 4	174,02	6.476,00	6.650,02	7,3%	6.166,56	6.142,76	507,26
4.AFC IRP	Dem 4	161,39	7.540,00	7.701,39	21,2%	6.071,01	6.142,76	1.558,63
5.AFC Risk IRPTW	Dem 4	177,28	6.935,00	7.112,28	0,0%	7.112,28	7.112,28	-

Tabla 8-3 Costo total de ruta modelos de distribución

En la tabla 8-3 Costo total de ruta se presentan los siguientes campos y su respectivo significado de acuerdo al análisis a proponer:

El campo modelo contiene el escenario matemático bajo el cual se evaluó la instancia o demanda específica bajo unas condiciones especiales, el campo instancia refleja el escenario de demanda aleatorio propuesto para evaluar el modelo matemático de distribución de valores, el campo CI refleja el costo de inventario evaluado bajo la instancia propuesta, el campo CR refleja el costo de ruta evaluado bajo la instancia propuesta, el campo Costo total muestra la sumatoria de los costos de inventario y de ruta, el campo GAP muestra la variación porcentual que presenta el costo total de ruta del modelo a evaluar frente a una solución óptima, el campo cota inferior muestra el valor correspondiente al límite inferior de la solución dada por solver de acuerdo al GAP arrojado al momento de establecer una solución factible. Por último, el campo cota inf ajustada representa el valor mínimo de costo total de ruta evaluado en los modelos de la instancia, dicho valor mínimo se evalúa en aquellos escenarios donde la solución es factible y se asigna como valor base al modelo con menos condiciones o restricciones de servicio.

8.3.2 Medida de desempeño: Costo ruta

El costo de ruta del modelo de distribución de efectivo viene dado por el valor de distribución que se genera por recorrer cada kilómetro recorrido ya sea desde el centro de efectivo y/o corresponsal bancario a otro corresponsal bancario. Teniendo en cuenta que el modelo IRP no contempla ninguna restricción al momento de ejecutar la distribución, se puede observar que al aplicar una variación en sus condiciones de distribución el costo de ruta aumenta y en un mayor porcentaje cuando se aplica la restricción de repetición de arco para entrega en cada nodo (Corresponsal) con un intervalo de tiempo de entrega amplio (AFC IRP), de igual manera se presenta una variación considerable al aplicar una restricción combinada entre la restricción de arco y la restricción de riesgo máximo (AFC Risk IRPTW).

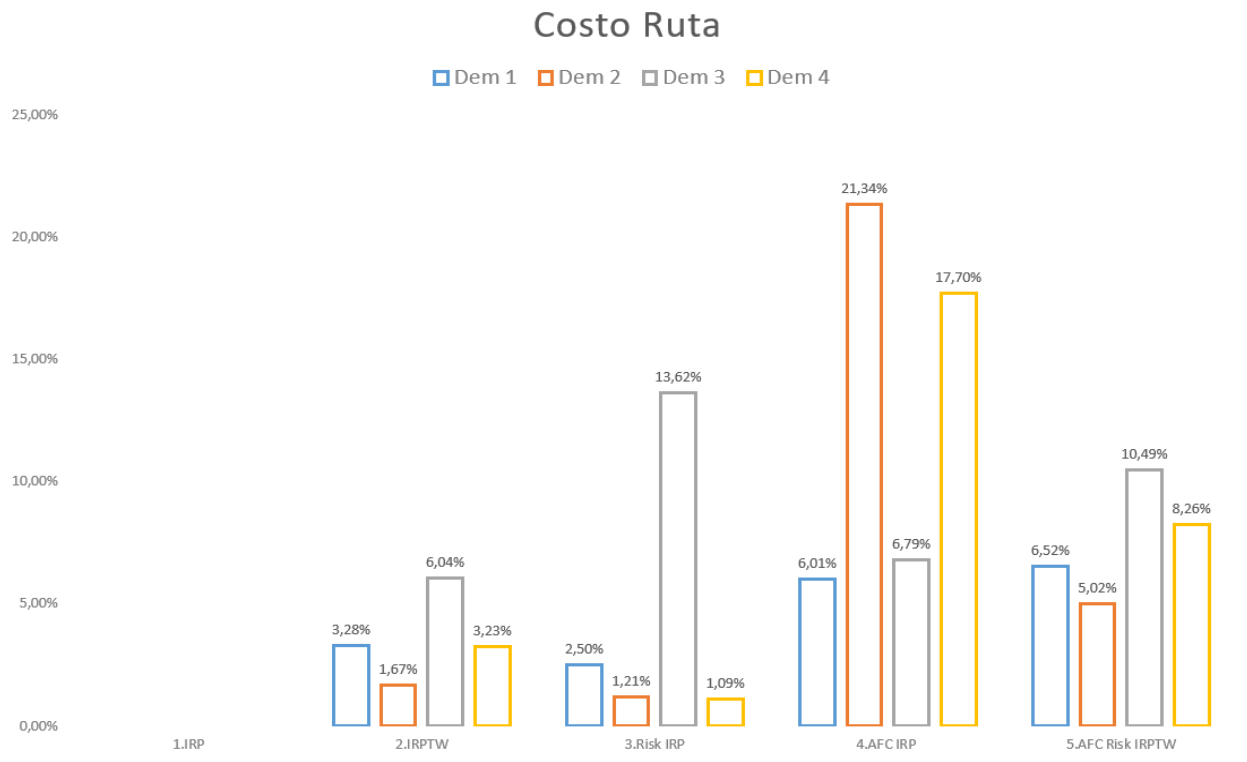


Ilustración 8-14 Costo de ruta

8.3.3 Medida de desempeño: Inventario promedio

A medida que se aplican restricciones al modelo con el fin de mitigar el riesgo de siniestralidad de efectivo, el inventario promedio aumenta ya que se busca concentrar el riesgo en el corresponsal, el cual evacua el dinero con una tasa promedio de dos días de acuerdo a su capacidad máxima de inventario. Por otro lado el nivel de inventario tiende a aumentar ya que es menos costoso mantener inventario de efectivo en el corresponsal que el riesgo asumido mientras se distribuye el efectivo.

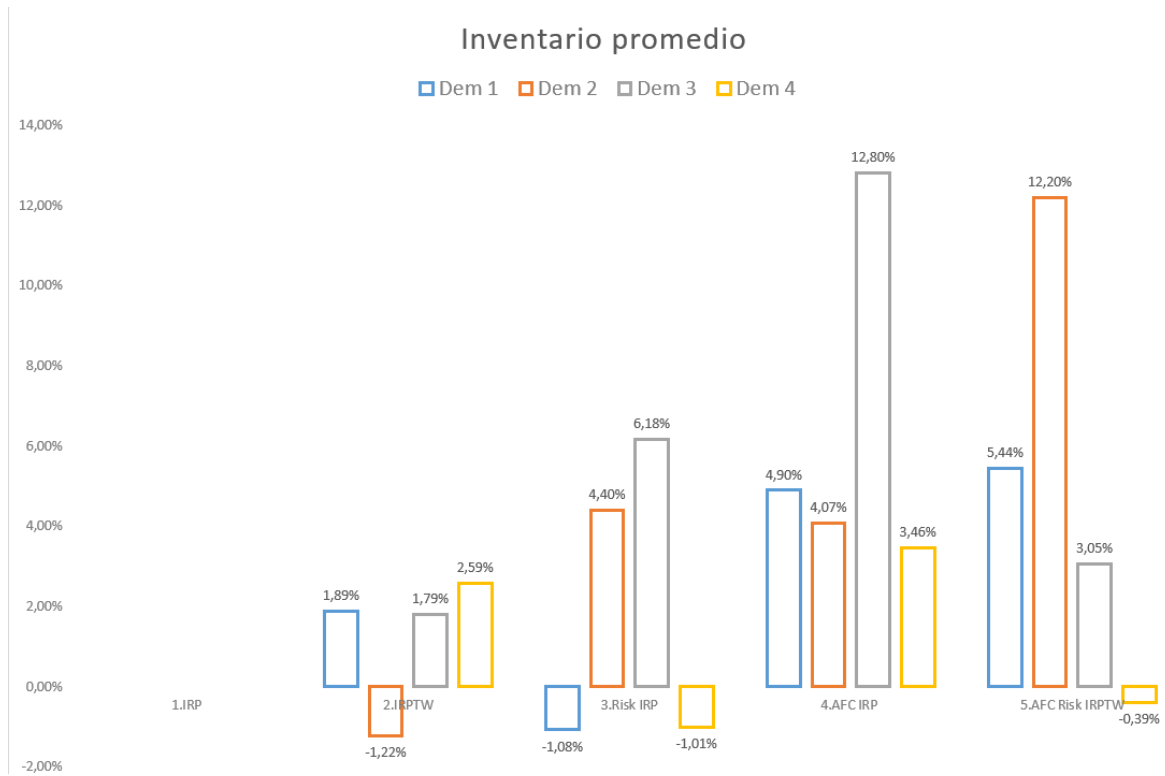


Ilustración 8-15 Inventario promedio

Modelo	Instancia	Inv_Promedio
1.IRP	Dem 1	49,23
2.IRPTW	Dem 1	50,16
3.Risk IRP	Dem 1	48,70
4.AFC IRP	Dem 1	51,64
5.AFC Risk IRPTW	Dem 1	51,91
1.IRP	Dem 2	49,36
2.IRPTW	Dem 2	48,76
3.Risk IRP	Dem 2	51,53
4.AFC IRP	Dem 2	51,37
5.AFC Risk IRPTW	Dem 2	55,38
1.IRP	Dem 3	49,21
2.IRPTW	Dem 3	50,09
3.Risk IRP	Dem 3	52,25
4.AFC IRP	Dem 3	55,51

5.AFC Risk IRPTW	Dem 3	50,71
1.IRP	Dem 4	51,40
2.IRPTW	Dem 4	52,73
3.Risk IRP	Dem 4	50,88
4.AFC IRP	Dem 4	53,18
5.AFC Risk IRPTW	Dem 4	51,20

Tabla 8-4 Inventario promedio modelos de distribución

8.3.4 Medida de desempeño: Uso máximo y promedio de arco

Los indicadores de uso máximo y promedio de arco muestran como los modelos AFC IRP y AFC Risk IRPTW mitigan la imprevisibilidad de rutas de distribución y permiten de esta manera mitigar el riesgo de siniestralidad disminuyendo la probabilidad de entregas repetitivas en un periodo de tiempo. Los resultados muestran que al comparar los modelos de AFC IRP y AFC Risk IRPTW frente al modelo básico de IRP se presenta una reducción significativa en los indicadores de uso máximo de arco y promedio de uso de arco, lo que permite valorar que dichas restricciones mitigan la previsibilidad de la ruta y la generación de múltiples rutas que cumplen las condiciones de entrega y garantía de inventario, pero con el plus de una mayor seguridad. Estas reducciones se ven representadas en los valores negativos de las gráficas de uso máximo de arco y uso promedio de arco al compararse cada modelo con el modelo base de IRP. Por ejemplo al comparar el IRPTW con el IRP se muestra una reducción del 15.38% en el indicador de uso máximo de arco frente al IRP en la instancia demanda 1, de igual manera al evaluarlo con la demanda 2 se presenta una reducción del 38.1% en el uso máximo de arco al usar el IRPTW y no el IRP.

Uso maximo de arco

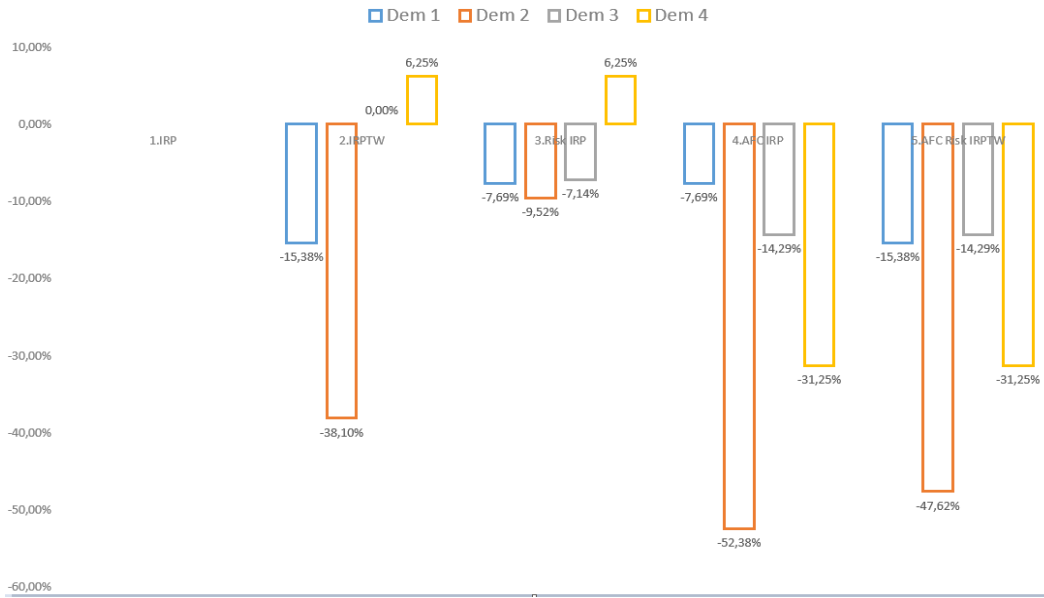


Ilustración 8-16 Uso máximo de arco

Uso promedio de arco

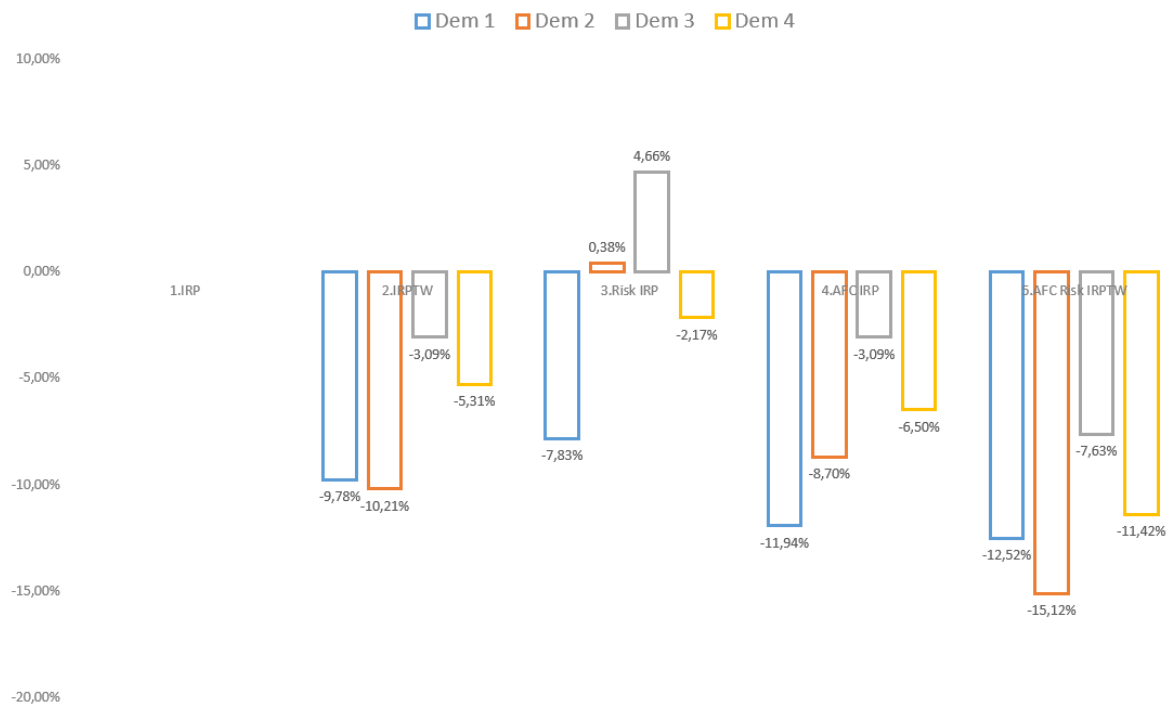


Ilustración 8-17 Uso promedio de arco

Modelo	Instancia	Frec. Maxima uso Arco	Frec. Prom uso arco
1.IRP	Dem 1	13,00	5,11
2.IRPTW	Dem 1	11,00	4,61
3.Risk IRP	Dem 1	12,00	4,71
4.AFC IRP	Dem 1	12,00	4,50
5.AFC Risk IRPTW	Dem 1	11,00	4,47
1.IRP	Dem 2	21,00	5,29
2.IRPTW	Dem 2	13,00	4,75
3.Risk IRP	Dem 2	19,00	5,31
4.AFC IRP	Dem 2	10,00	4,83
5.AFC Risk IRPTW	Dem 2	11,00	4,49
1.IRP	Dem 3	14,00	4,85
2.IRPTW	Dem 3	14,00	4,70
3.Risk IRP	Dem 3	13,00	5,08
4.AFC IRP	Dem 3	12,00	4,70
5.AFC Risk IRPTW	Dem 3	12,00	4,48
1.IRP	Dem 4	16,00	5,08
2.IRPTW	Dem 4	17,00	4,81
3.Risk IRP	Dem 4	17,00	4,97
4.AFC IRP	Dem 4	11,00	4,75
5.AFC Risk IRPTW	Dem 4	11,00	4,50

Tabla 8-5 Uso máximo y promedio de arco

8.3.5 Medida de desempeño: Riesgo máximo

Al evaluar la variable de riesgo los modelos que disminuyen y mitigan el riesgo de efectivo en ruta son los modelos de Risk IRP y AFC Risk IRP que contienen dentro de su modelo la restricción con un parámetro máximo de riesgo que asume el Banco en el momento de distribuir el efectivo a las diferentes zonas programadas. El valor T_m se define como un valor paramétrico que es calculado teniendo en cuenta los cubrimientos de póliza que la aseguradora le ofrece al Banco de acuerdo a los montos de efectivo a distribuir y el tipo de municipios en los que se vaya a distribuir efectivo. El riesgo máximo es evaluado como el riesgo acumulado por la distribución de efectivo periodo a periodo sujeto al nivel máximo de riesgo que se desee asumir en el modelo de distribución de efectivo

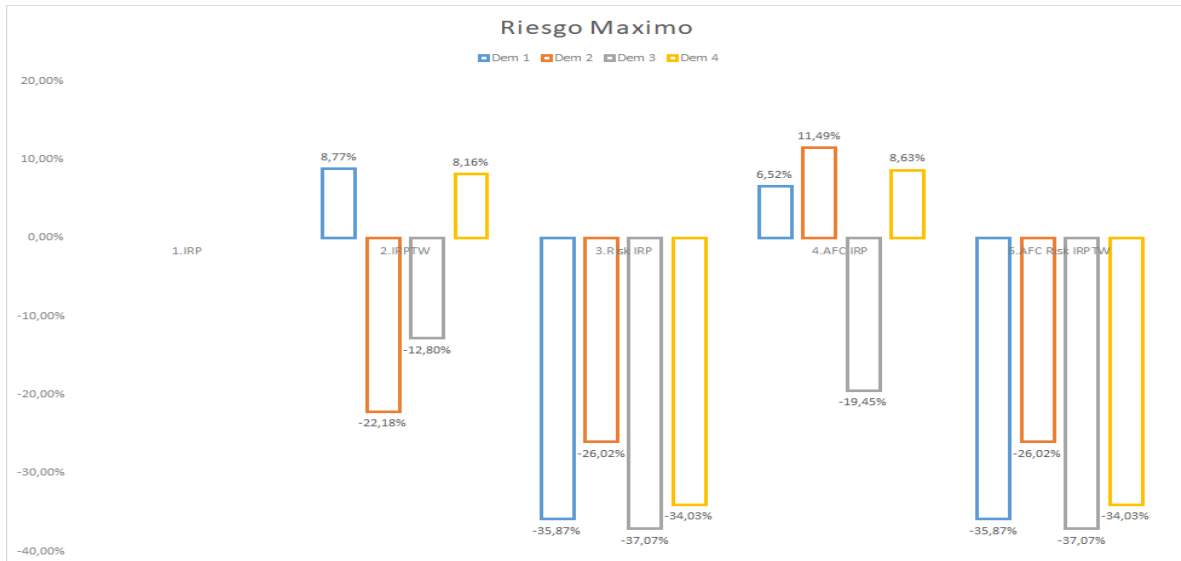


Ilustración 8-18 Riesgo máximo

Modelo	Instancia	Riesgo Max
1.IRP	Dem 1	12.475,50
2.IRPTW	Dem 1	13.569,15
3.Risk IRP	Dem 1	8.000,00
4.AFC IRP	Dem 1	13.288,80
5.AFC Risk IRPTW	Dem 1	8.000,00
1.IRP	Dem 2	10.813,80
2.IRPTW	Dem 2	8.415,15
3.Risk IRP	Dem 2	8.000,00
4.AFC IRP	Dem 2	12.056,40
5.AFC Risk IRPTW	Dem 2	8.000,00
1.IRP	Dem 3	12.712,95
2.IRPTW	Dem 3	11.085,45
3.Risk IRP	Dem 3	8.000,00
4.AFC IRP	Dem 3	10.240,50
5.AFC Risk IRPTW	Dem 3	8.000,00
1.IRP	Dem 4	12.127,50
2.IRPTW	Dem 4	13.116,75
3.Risk IRP	Dem 4	8.000,00
4.AFC IRP	Dem 4	13.174,20
5.AFC Risk IRPTW	Dem 4	8.000,00

Tabla 8-6 Riesgo máximo modelos de distribución

Modelo riesgo	Instancia	Costo total	CI	CR	Riesgo Max	Frec. Maxima uso Arco	Frec. Prom uso arco	Inv_Promedio	GAP	Cota inf	Cota inf ajustada	Dif	Tiempo de computo (Resource usage)	Solver status	Model Status
1.IRP	Dem 1	6.853,72	169,72	6.684,00	12.475,50	13,00	5,11	49,23	5,9%	6.446,61	6.446,61	407,11	96.198,48	4 Terminated by solver	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 1	7.073,15	170,15	6.903,00	13.569,15	11,00	4,61	50,16	0,0%	7.073,15	7.073,15	-	494,86	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 1	7.020,96	169,96	6.851,00	8.000,00	12,00	4,71	48,70	8,5%	6.425,58	6.446,61	574,35	47.258,67	4 Terminated by solver	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 1	7.260,47	174,47	7.086,00	13.288,80	12,00	4,50	51,64	12,1%	6.379,05	6.446,61	813,86	62.447,19	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 1	7.305,64	185,64	7.120,00	8.000,00	11,00	4,47	51,91	0,0%	7.305,64	7.305,64	-	28.105,34	1 Normal completion	1 Optimal
1.IRP	Dem 2	6.524,72	169,72	6.355,00	10.813,80	21,00	5,29	49,36	7,1%	6.064,07	6.064,07	460,65	70.196,89	8 User interrupt	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 2	6.622,94	161,94	6.461,00	8.415,15	13,00	4,75	48,76	0,0%	6.622,94	6.622,94	-	49,64	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 2	6.620,40	188,40	6.432,00	8.000,00	19,00	5,31	51,53	8,7%	6.045,09	6.064,07	556,33	12.408,03	4 Terminated by solver	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 2	7.859,32	148,32	7.711,00	12.056,40	10,00	4,83	51,37	24,8%	5.910,21	6.064,07	1.795,25	53.398,59	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 2	6.863,99	189,99	6.674,00	8.000,00	11,00	4,49	55,38	0,0%	6.863,99	6.863,99	-	7.858,41	1 Normal completion	1 Optimal
1.IRP	Dem 3	7.133,84	165,84	6.968,00	12.712,95	14,00	4,85	49,21	4,6%	6.806,40	6.806,40	327,44	26.530,50	4 Terminated by solver	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 3	7.549,44	160,44	7.389,00	11.085,45	14,00	4,70	50,09	0,0%	7.549,44	7.549,44	-	717,59	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 3	8.070,75	153,75	7.917,00	8.000,00	13,00	5,08	52,25	16,7%	6.719,71	6.806,40	1.264,35	57.687,45	4 Terminated by solver	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 3	7.619,07	178,07	7.441,00	10.240,50	12,00	4,70	55,51	9,8%	6.870,12	6.806,40	812,67	27.378,95	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 3	7.866,54	167,54	7.699,00	8.000,00	12,00	4,48	50,71	0,0%	7.866,54	7.866,54	-	25.459,16	1 Normal completion	1 Optimal
1.IRP	Dem 4	6.582,47	176,47	6.406,00	12.127,50	16,00	5,08	51,40	6,7%	6.142,76	6.142,76	439,71	97.257,56	8 User interrupt	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 4	6.791,97	178,97	6.613,00	13.116,75	17,00	4,81	52,73	0,0%	6.791,97	6.791,97	-	47,48	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 4	6.650,02	174,02	6.476,00	8.000,00	17,00	4,97	50,88	7,3%	6.166,56	6.142,76	507,26	97.271,32	8 User interrupt	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 4	7.701,39	161,39	7.540,00	13.174,20	11,00	4,75	53,18	21,2%	6.071,01	6.142,76	1.558,63	33.102,53	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 4	7.112,28	177,28	6.935,00	8.000,00	11,00	4,50	51,20	0,0%	7.112,28	7.112,28	-	6.055,79	1 Normal completion	1 Optimal

Tabla 8-7 Matriz de resultados modelo matemático en GAMS

La Matriz de resultados_ escenarios de riesgo muestra un resumen de los escenarios evaluados bajo el modelo matemático trabajado en GAMS, en el que se puede comparar las diferentes variables y su estatus de solución definitivo de acuerdo al modelo de riesgo trabajado.

Se observa bajo las 4 instancias de demandas que los modelos IRPTW y AFC Risk IRPTW logran una solución óptima con tiempos de computo favorables y menores en comparación a los modelos IRP, Risk IRP y AFC IRP, lo que permite indicar que las ventanas de tiempo establecidas dentro del modelo de distribución de una forma aleatoria y con cumplimiento fuerte hacen que el modelo se comporte de una manera eficiente frente a las demás restricciones para aseguramiento de la distribución de valores.

El establecer límites de riesgo sobre los modelos hace que la búsqueda de una solución se dificulte, puesto que se está obligando al modelo a cumplir condiciones especiales en la distribución de valores, de igual manera dan una solución factible con un GAP relativamente mínimo en donde permiten elegir entre un modelo y otro dependiendo el riesgo y las condiciones que se requieran asumir.

8.4 Resultados computacionales de la Heurística

8.4.1 Solver vs Heurística: Calidad de la solución

Instancia	GAMS_ IRPTW	Heurística_ IRPTW	GAP
Dem 1	7.073,15	7.398,75	4,4%
Dem 2	6.622,94	7.111,84	6,9%
Dem 3	7.549,44	8.012,67	5,8%
Dem 4	6.791,97	7.205,14	6,1%

Tabla 8-8 Calidad de la solución _ Costo total de ruta

Se muestra en la tabla 8-7 los resultados obtenidos para cada una de las instancias estudiadas según su costo total de ruta. Se presentan las diferencias porcentuales (GAP) entre el modelo evaluado en GAMS IRPTW y la solución resultante de la heurística evaluada bajo el modelo IRPTW. La heurística tiene un comportamiento adecuado frente a los resultados generados bajo el modelamiento matemático en GAMS en donde el modelo IRPTW encontró solución óptima.

8.4.2 Solver vs Heurística: Tiempo computacional

Instancia	GAMS_IRPTW	Heurística IRPTW
Dem 1	494,86	0,16
Dem 2	49,64	0,14
Dem 3	717,59	0,15
Dem 4	47,48	0,14

Tabla 8-9 Tiempo computacional

Se muestra en la tabla 8-8 los tiempos de computo dados en segundos tanto del modelo matemático en GAMS y la heurística propuesta donde los tiempos de solución son bajos frente a los obtenidos en el solver, dado esto, al momento de configurar una red de distribución, los tiempos de solución permiten la toma de decisiones de una forma ágil y confiable donde la solución arrojada por la heurística se encuentra dentro del conjunto factible.

8.4.3 Matriz de resultados Solver vs Heurística IRPTW

A continuación, se muestra la matriz de resultados comparativa entre los escenarios de los modelos IRPTW y la heurística bajo el modelo IRPTW con sus respectivos indicadores medidos para cada una de las demandas asignadas.

La heurística muestra resultados favorables con GAP promedio de 5.8% al compararse con el modelo matemático IRPTW en términos de costo total siendo este un modelo referente que arroja optimalidad.

Modelo riesgo	Instancia	Costo total	CI	CR	Riesgo Max	Frec. Maxima uso Arco	Frec. Prom uso arco	Inv_Promedio	GAP	Cota inf	Cota inf ajustada	Dif	Tiempo de computo (Resource usage)	Solver status	Model Status
1.IRP	Dem 1	6.853,72	169,72	6.684,00	12.475,50	13,00	5,11	49,23	5,9%	6.446,61	6.446,61	407,11	96.198,48	4 Terminated by solver	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 1	7.073,15	170,15	6.903,00	13.569,15	11,00	4,61	50,16	0,0%	7.073,15	7.073,15	-	494,86	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 1	7.020,96	169,96	6.851,00	8.000,00	12,00	4,71	48,70	8,5%	6.425,58	6.446,61	574,35	47.258,67	4 Terminated by solver	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 1	7.260,47	174,47	7.086,00	13.288,80	12,00	4,50	51,64	12,1%	6.379,05	6.446,61	813,86	62.447,19	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 1	7.305,64	185,64	7.120,00	8.000,00	11,00	4,47	51,91	0,0%	7.305,64	7.305,64	-	28.105,34	1 Normal completion	1 Optimal
6. IRPTW_Heurística	Dem 1	7.398,75	179,75	7.219,00	9.773,10	12,00	5,00	58,81	0,0%	7.398,75	7.398,75	460,65	0,16	1 Normal completion	8 Integer solution
1.IRP	Dem 2	6.524,72	169,72	6.355,00	10.813,80	21,00	5,29	49,36	7,1%	6.064,07	6.064,07	-	70.196,89	8 User Interrupt	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 2	6.622,94	161,94	6.461,00	8.415,15	13,00	4,75	48,76	0,0%	6.622,94	6.622,94	556,33	49,64	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 2	6.620,40	188,40	6.432,00	8.000,00	19,00	5,31	51,53	8,7%	6.045,09	6.064,07	1.795,25	12.408,03	4 Terminated by solver	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 2	7.859,32	148,32	7.711,00	12.056,40	10,00	4,83	51,37	24,8%	5.910,21	6.064,07	-	53.398,59	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 2	6.863,99	189,99	6.674,00	8.000,00	11,00	4,49	55,38	0,0%	6.863,99	6.863,99	327,44	7.858,41	1 Normal completion	1 Optimal
6. IRPTW_Heurística	Dem 2	7.111,84	155,84	6.956,00	10.000,50	13,00	5,03	51,10	0,0%	7.111,84	7.111,84	-	0,14	1 Normal completion	8 Integer solution
1.IRP	Dem 3	7.133,84	165,84	6.968,00	12.712,95	14,00	4,85	49,21	4,6%	6.806,40	6.806,40	1.264,35	26.530,50	4 Terminated by solver	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 3	7.549,44	160,44	7.389,00	11.085,45	14,00	4,70	50,09	0,0%	7.549,44	7.549,44	812,67	717,59	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 3	8.070,75	153,75	7.917,00	8.000,00	13,00	5,08	52,25	16,7%	6.719,71	6.806,40	-	57.687,45	4 Terminated by solver	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 3	7.619,07	178,07	7.441,00	10.240,50	12,00	4,70	55,51	9,8%	6.870,12	6.806,40	439,71	27.378,95	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 3	7.866,54	167,54	7.699,00	8.000,00	12,00	4,48	50,71	0,0%	7.866,54	7.866,54	-	25.459,16	1 Normal completion	1 Optimal
6. IRPTW_Heurística	Dem 3	8.012,67	156,67	7.856,00	8.891,25	13,00	5,29	61,25	0,0%	8.012,67	8.012,67	507,26	0,15	1 Normal completion	8 Integer solution
1.IRP	Dem 4	6.582,47	176,47	6.406,00	12.127,50	16,00	5,08	51,40	6,7%	6.142,76	6.142,76	1.558,63	97.257,56	8 User Interrupt	8 Integer solution
2.IRPTW	Dem 4	6.791,97	178,97	6.613,00	13.116,75	17,00	4,81	52,73	0,0%	6.791,97	6.791,97	-	47,48	1 Normal completion	1 Optimal
3.Risk IRP	Dem 4	6.650,02	174,02	6.476,00	8.000,00	17,00	4,97	50,88	7,3%	6.166,56	6.142,76	507,26	97.271,32	8 User Interrupt	8 Integer solution
4.AFC IRP	Dem 4	7.701,39	161,39	7.540,00	13.174,20	11,00	4,75	53,18	21,2%	6.071,01	6.142,76	1.558,63	33.102,53	4 Terminated by solver	8 Integer solution
5.AFC Risk IRPTW	Dem 4	7.112,28	177,28	6.935,00	8.000,00	11,00	4,50	51,20	0,0%	7.112,28	7.112,28	-	6.055,79	1 Normal completion	1 Optimal
6. IRPTW_Heurística	Dem 4	7.205,14	187,05	7.018,09	9.813,31	11,00	5,13	57,90	0,0%	7.205,14	7.205,14	-	0,14	1 Normal completion	8 Integer solution

Tabla 8-10 Matriz de resultados modelo matemático en GAMS vs Heurística IRPTW

Conclusiones

Esta investigación presenta la formulación de un modelo matemático con la implementación de diferentes restricciones que permiten la mejora en niveles de riesgo, costos de distribución y costo de mantenimiento de efectivo en un proceso de distribución de valores en una red de corresponsales bancarios.

Actualmente en Colombia se manejan modelos de distribución de valores basados en el establecimiento de condiciones de seguridad y fortalecimiento de la flota con armamento. Sin embargo, estas condiciones se pueden hacer vulnerables cuando las rutas de distribución se hacen comunes y predecibles, por lo que con la investigación planteada se propone el uso de alternativas tales como tiempos de visita aleatorios a los puntos de distribución, así como condiciones de repetición mínima de entrega entre un punto y otro, con el fin de disminuir la previsibilidad y riesgo de robo de la flota designada para la distribución de valores.

Manejar la planeación de distribución de efectivo por medio de este tipo de modelos permite fijar otro tipo de alternativas en donde ya que no solo se sigue manejando por la experiencia y el conocimiento normal de la operación logística, sino que permite establecer reglas de variabilidad de ruta y condiciones que permiten hacer eficiente el uso de los recursos y reducir los costos de distribución de una manera significativa.

El uso del algoritmo exacto desarrollado permite encontrar soluciones óptimas para instancias de hasta 7 clientes con 50 periodos contemplando restricciones de ventanas de tiempo fuertes con tiempos de solución estables y coherentes para una planeación de efectivo con alta complejidad, de igual manera se presenta una heurística en la que se mejora notablemente los tiempos de cómputo y muestra un GAP aceptable frente a los valores de costo evaluados, lo que permite dar al usuario alternativas de selección al momento de planear rutas de distribución en una red de corresponsales.

El manejo de ventanas cortas genera un mayor costo de ruta sin embargo permiten garantizar un mayor nivel de servicio y mitigación de riesgo en los tiempos de permanencia en ruta del vehículo ya que circunscribe las entregas en un intervalo de tiempo corto, mientras que las ventanas de tiempo amplias genera un mayor riesgo al tener el efectivo un mayor tiempo disponible en ruta y generando entregas en horarios que están fuera del tiempo de servicio del corresponsal ocasionando riesgo en el corresponsal bancario.

El modelo matemático implementado bajo la consideración de las estrategias de mitigación de riesgo formuladas permitieron determinar modelos con solución óptima (IRPTW y AFC Risk IRPTW) y soluciones factibles (Risk IRP y AFC IRP) buscando diseñar un modelo de distribución de efectivo con nuevas alternativas al momento de distribuir tales como rutas menos predecibles, variación constante de rutas y atención de corresponsales dentro de ventanas de tiempo fijas garantizando el cumplimiento de niveles de servicio y mejorando la experiencia del servicio de efectivo en una red de corresponsalía. Adicional permitieron evaluar parámetros tales como el Riesgo máximo y variables como el riesgo acumulado con el fin de que el Banco pueda tomar decisiones al momento de implementar una planeación de distribución de efectivo cumpliendo de esta manera con las condicionales de las aseguradoras al momento de asignar efectivo en municipios con condiciones de vulnerabilidad al siniestro de pérdida económica. Con el modelo presentado no solo se consideraron las condiciones de ruteo, sino que se mezcló la condición de manejo de inventarios con el fin de modular los procesos de atención de demanda de efectivo y flujos de efectivo dentro de un corresponsal bancario. Con los planteamientos estudiados se da cumplimiento a los objetivos planteados y se establecen nuevas metas de investigación a futuro que permitan mejorar los modelos logísticos en el sector financiero.

Investigaciones futuras

Tomando como referencia que en la realidad las entregas de efectivo en corresponsales están sujetas a unos tiempos de entrega en sitio y a una disponibilidad de horarios de atención, se sugiere como investigación futura la inclusión de tiempos de entrega en el modelamiento de rutas de los vehículos y la medición de los niveles de riesgo para disminuir la probabilidad de robo de los vehículos de valores usando programación estocástica o modelos de simulación.

Así mismo se propone trabajar en métodos heurísticos y meta-heurísticos que permitan abordar problemas de localización de centros de efectivo que permitan optimizar los costos de distribución y la ampliación de más rutas de entrega, el modelamiento de problemas de entrega de efectivo con flota heterogénea o múltiples vehículos y la implementación de modelos heurísticos contemplando el factor riesgo dentro de la función objetivo.

Bibliografía

- Antón, F. (2005). *Logística del transporte (Vol.10)*. Universitat politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica.
- Arango, M., Romano, C., & Zapata, J. (2016). Collaborative goods distribution using the IRP model. *DYNA*, 203-212.
- Arango, M., Zapata, J., & Gutierrez, D. (2015). Modeling the inventory routing problem (IRP) with multiple depots with genetic algorithms. *IEEE Latin American Transactions*, 3959-3965.
- Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, A., & Speranza, M. (2011). A hybrid heuristic for an inventory routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 101-116.
- Asobancaria. (2014). *Informe trimestral de inclusion financiera cifras a diciembre de 2014*. Obtenido de <http://www.asobancaria.com/portal/pls/portal/docs/1/4484750.PDF>
- Atuesta, D. (2011). *Formulas las metaheurísticas búsqueda tabú y recocido simulado para la solución del CVRP*. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137753.pdf>
- Aziz, N., & Moin, N. (2007). Genetic algorithm based approach for the multi product multi period inventory routing problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1619-1623.
- Azuma, R., Coelho, G., & Von Zuben, F. (2011). Evolutionary multiobjective optimization for the vendor managed inventory routing problem. In *IEEE congress on evolutionary computation (CEC)*, 1457-1464.
- Baez, S. (2014). *Problema de rutas con múltiples depósitos y ventanas de tiempo*. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/4148/1/1080253731.pdf>
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Pearson Educación.
- Banca de las Oportunidades. (01 de Mayo de 2012). *Banca de las Oportunidades*. Obtenido de Reportes de inclusión financiera: <http://bancadelasoportunidades.gov.co/es/reportes/312>
- Camara de Comercio de Bogota. (2015). Caso Daviplata-Premio Valor Compartido. *Camara de Comercio de Bogota*, 1-5.

- Campbell, A., & Savelsbergh, M. (2004). A decomposition approach for the inventory routing problem. *INFORMS Transportation Science*, 488-502.
- Cepeda, G. (2013). *diseño e implementación de una heurística para el problema de ruteo vehicular con recolección y entrega de mercadería*. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24610>
- Coelho, L. (2012). Consistency in multi-vehicle inventory-routing. *Transportation research Part C*, 270-287.
- Cordeau, J. (2007). Vehicle Routing. *Handbooks in operations research and management science*, 367-428.
- Daviplata. (2015). *Informe historico comportamiento de capilaridad Daviplata a nivel Nacional*. Bogota: Daviplata.
- Daza, J. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehiculos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista ELA, ISSN 1794-1237 Numero 12*, 23-38.
- Fengjiao, W., & Qingnian, Z. (2008). The research on the inventory routing problem with split pick ups based on genetic algorithm. *WiCOM 08 4th International conference on Wireless Communications*, 1-4.
- Galvan, S. (2013). *Optimización por simulación basado en epso para el problema de ruteo de vehiculos con demandas estocásticas*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n179/v80n179a07.pdf>
- Grupo Banco Mundial. (20 de Abril de 2018). *Banco Mundial*. Obtenido de Banco Mundial. Inclusion financiera: <http://www.bancomundial.org/es/topic/financialinclusion/overview>
- Herazo Padilla, N. (2013). *Modelación matemática del problema de ruteo de vehículos con restricciones de múltiples depósitos, flota heterogénea de vehículos y ventanas de tiempos* . Obtenido de <http://repositorio.cuc.edu.co/xmlui/handle/11323/90>
- Kleywegt, A., Nori, V., & Savelsbergh, M. (2004). Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem. *Transportation Science*, 42-70.
- Liu, G.-S., Lin, K.-P., Lee, H.-W., & Wang, C.-Y. (2011). A study of inventory-routing problem for the distribution system by applying genetic algorithm. *IEEE International Summer Conference of Asia pacific*, 104-108.

- Liu, S., & Lee, W. (2011). A heuristic method for the inventory routing problem with time windows. *A heuristic method for the inventory routing problem with time windows*, 13223-13231.
- Luer, A. B. (2009). *El Problema de Rutas de Vehículos: Extensiones y Métodos de Resolución, estado del Arte*. Obtenido de http://www.researchgate.net/profile/Barbara_Venegas/publication/221419373_EL_Problema_de_Rutas_de_Vehiculos_Extensiones_y_Mtodos_de_Resolucin_estado_del_Arte/links/54062db00cf2c48563b24957.pdf
- Mateos, D. (2013). *DESARROLLO DE UN MÉTODO HÍBRIDO PARA LA RESOLUCIÓN DEL MDVRP*. Obtenido de <http://www.revista.jacobe.edu.mx/n5/3.Desarrollo%20de%20un%20m%C3%A9todo%20h%C3%ADbrido%20para%20la%20resoluci%C3%B3n%20del%20MDVRP%20V2.pdf>
- Medina, L. (2011). *Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución*. Obtenido de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/3832>
- Michallet, J. (8 de Agosto de 2013). *Multi start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813002050>
- Michallet, J. P. (2014). Multi-start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. *Computers & operations research*, 41, 196-207.
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos*. Montevideo, Uruguay: Instituto de computación, Facultad de ingeniería, Universidad de la República.
- Perez, E. (2015). *Ruteo de inventarios con ventanas de tiempo fuertes*. Obtenido de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/2415/2113>
- Rocha, L., Gonzalez, C., & Orjuela, J. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería, Vol.16*, 35-55.
- Siswanto, N., Essam, D., & Sarker, R. (2011). Multi-heuristics based genetic algorithm for solving maritime inventory routing problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 116-120.
- SOLOMON, M. M. (1987). *ALGORITHMS FOR THE VEHICLE ROUTING AND SCHEDULING PROBLEMS WITH TIME WINDOW CONSTRAINTS*. *Operations Research*, 35(2), 254-265. Obtenido de http://www.iro.umontreal.ca/~dift6751/paper_solomon.pdf

- Superintendencia Financiera de Colombia. (26 de 03 de 2018). *SFC*. Obtenido de Estrategia nacional de inclusión financiera en Colombia: <https://www.superfinanciera.gov.co/inicio/informes-y-cifras/informes/inclusion-financiera-10084716>
- Talarico, L. (2015 A). *Secure Vehicle Routing: models and algorithms to increase security*. Obtenido de http://antor.uantwerpen.be/system/files/phd-defence-luca-talarico_2.pdf
- Talarico, L. (2015). Metaheuristics for the risk-constrained cash in transit vehicle routing problem. *European Journal of operational research*, 457-470.
- Talarico, L. A. (2015 B). *Secure vehicle routing: models and algorithms to increase security and reduce costs in the cash-in-transit sector*. Obtenido de <http://link.springer.com/article/10.1007/s10288-015-0290-y>
- Van Anholt, R. G., Coelho, L. C., Laporte, G., & Vis, I. F. (2016). An inventory-routing problem with pickups and deliveries arising in the replenishment of automated teller machines. *Transportation Science*, 1077-1091.
- Yan, S. (9 de Abril de 2012). *A model with a solution algorithm for the cash transportation vehicle routing and scheduling problem*. *Computers & Industrial Engineering*, 63(2), 464-473. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835212000927>
- Zeng, Z., & Wang, J. (2010). Study of stochastic demand inventory routing problem soft time windows based on MDP. *Adv. in neural network research & appli*, 193-200.