

Modelo determinístico bi-objetivo para el diseño de red de distribución orientada al comercio electrónico.

Luis Felipe Durán Tarazona y German Jesús Avellaneda Quiñonez

Trabajo de Grado para Optar el título de
Ingeniero industrial

Director

Javier Eduardo Arias Osorio

Magister en administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

Agradezco a mi familia César, Elizabeth y Vanessa por su amor y apoyo incondicional, a la Universidad Industrial de Santander por permitirme adquirir variedad de conocimientos y experiencias, a mi compañero de proyecto Luis Felipe por su dedicación y apoyo durante esta investigación, al profesor Javier Arias por su guía y orientación en cada una sus materias y durante esta investigación, a mi novia Natalia por su cariño y compañía durante estos 5 años de carrera.

German Avellaneda

Agradezco a Dios principalmente por llevarme de la mano en cada paso que doy, a mi Madre Luz Amparo por ser la verdadera luz de mi vida, a mi padre por brindarme la educación académica, a mis hermanos por ser ejemplo y guía en este camino y a todos mis amigos y conocidos que me acompañaron en este camino. También a German por su colaboración y disposición en cada fase de esta investigación, a la UIS por formarme como profesional y al profesor Javier Arias por su acompañamiento y orientación.

Luis Felipe Durán

Tabla de Contenido

Introducción 16

1. Generalidades del proyecto..... 18

1.1 Planteamiento del problema..... 18

1.2 Objetivos 21

1.2.1 Objetivo general..... 21

1.2.2 Objetivos específicos 21

1.3 Metodología 21

1.3.1 Definición del problema y recolección de datos..... 21

1.3.2 Formulación del modelo matemático..... 22

1.3.3 Obtención de soluciones a partir de un modelo matemático 23

1.3.4 Validación del modelo 24

1.3.5 Preparación para la aplicación del modelo 24

1.3.6 Síntesis de resultados y conclusiones 24

2. Revisión de la literatura y análisis bibliométrico..... 25

2.1 Análisis Bibliométrico 25

2.1.1 VRP..... 25

2.1.2 2E-VRP 26

2.1.3 2E-VRPTW 27

2.1.4 2E-VRPSTW..... 29

2.2 Análisis preliminar de la literatura 29

2.2.1 Problema de cumplimiento de pedidos electrónicos..... 30

2.2.2 Generalidades del problema de ruteo de vehículos (VRP) 35

2.2.3 Problema de ruteo de vehículos con dos escalones (2E-VRP) 36

2.2.4 Problema de ruteo de vehículos con dos escalones y ventanas de tiempo..... 40

2.2.5 Problema de ruteo con dos escalones y ventanas de tiempo suaves 42

3. Marco de referencia 45

3.1 Marco de antecedentes 45

3.2 Marco teórico 47

3.2.1 Optimización matemática 47

3.2.2 Métodos de optimización 48

3.2.3 Modelo de optimización 48

3.2.4 Problemas de optimización multi-objetivo..... 50

3.2.4.1 Dominancia de Pareto 51

3.2.4.2 Conjunto de Pareto y frente Pareto Óptimo 51

3.2.5 Técnicas de optimización..... 52

3.2.5.1 Técnicas de optimización modelos multiobjetivo..... 53

3.2.5.1.1 Funciones Agregadas.. 53

3.2.5.1.2 Algoritmo VEGA 53

3.2.5.1.3 Algoritmo NSGA. 53

3.2.5.1.4 Algoritmo NSGA II. 54

3.2.5.1.5 Algoritmo PAES. 54

3.2.5.1.6 Algoritmo SPEA 55

3.2.5.1.8 Algoritmo SPEA2 55

3.2.6 Logística..... 56

3.2.6.1 Ruteo de Vehículos.....	57
3.2.7 Orden de compra.....	57
3.2.8 Comercio electrónico.....	58
3.2.9 Problema de entrega de pedidos electronicos	59
3.2.9.1 Asignación de pedidos	59
3.2.9.2 Consolidación de órdenes y sincronización.....	59
3.2.9.3 Entrega de pedido.....	60
4. Modelo para el 2E-VRPSTW	60
4.1 Descripción del modelo	60
4.2 Formulación matemática.....	63
4.2.1 Notación.....	63
4.2.2 Notación de índices.....	64
4.2.3 Parámetros.....	64
4.2.4 Variables de decisión	65
4.2.5 Funciones Objetivo	65
4.2.6 Restricciones	66
5. Descripción del algoritmo genético nsga ii.....	69
5.1 Población inicial.....	72
5.2 Cruzamiento o Crossover.....	73
5.3 Reparación	75
5.4 Mutación	77
5.5 Selección	80

6. DISEÑO DEL ALGORITMO GENÉTICO NSGA II.....	81
6.1 Codificación.....	82
6.1.1 Genes centro de cumplimiento.....	83
6.1.2 Genes centro de distribución.....	83
6.1.3 Genes clientes	83
6.2 Generación de la población inicial.....	83
6.2.1 Ingreso de parámetros de entrada	84
6.2.2 Clasificación de los nodos acorde al tipo de gen	84
6.2.2.1 Centros de cumplimiento.	85
6.2.2.2 Centros de distribución.	85
6.2.2.3 Clientes.	85
6.2.3 Ubicación aleatoria de genes para conformar un cromosoma.	85
6.2.3.1 Centros de cumplimiento.	85
6.2.3.2 Centros de distribución.	86
6.2.3.3 Clientes. Se implantan aleatoriamente los genes clientes para ser asociados a los genes centros de distribución (Ver figura 34).	86
6.2.3.4 Criterio de parada.....	86
6.3 Algoritmo genético (NSGA-II).....	86
6.3.1 Cruce o Crossover.....	87
6.3.2 Reparación	88
6.3.3 Mutación	89
6.3.4 Selección	90

7. Experimentación 91

7.1 Instancias..... 93

7.2 Escenarios 94

8. Resultados y análisis estadístico 95

8.1 Instancia 1 (I1) 96

8.1.1 Función Minimización de costos 98

8.1.2 Función Maximización cumplimiento de pedidos..... 99

8.1.3 Tiempo computacional..... 101

8.2 Instancia 2 (I2) 103

8.2.1 Función minimización de costos..... 105

8.2.2 Función maximización cumplimiento de pedidos 107

8.2.3 Tiempo computacional..... 109

8.3 Instancia 3 (I3) 110

8.3.1 Función minimización de costos..... 112

8.3.2 Función maximización de cumplimiento de pedidos..... 113

8.3.3 Tiempo computacional..... 115

8.4Conjunto de instancias 117

9.Conclusiones 119

10.Recomendaciones 121

Referencias bibliograficas..... 123

Lista de Tablas

Tabla 1. Cumplimiento de objetivos 18

Tabla 2 Marco de antecedentes..... 45

Tabla 3 Restricciones de la formulación matemática 69

Tabla 4 Factores del diseño experimental..... 92

Tabla 5 Variables del diseño experimental 92

Tabla 6 Parámetros de capacidad..... 93

Tabla 7 Parámetros de demanda 93

Tabla 8 Parámetros de cumplimiento de pedidos 93

Tabla 9 Parámetros de costo 93

Tabla 10 Diseño de las instancias a evaluar 94

Tabla 11 Niveles de los factores 94

Tabla 12 Escenarios planteados 95

Tabla 13 Resultados de la primera instancia..... 96

Tabla 14 ANOVA en función de la variable costo para la instancia 1 98

Tabla 15 ANOVA en función del cumplimiento de pedidos para la instancia 1 100

Tabla 16 ANOVA en función del tiempo computacional para la instancia 1 102

Tabla 17 Los resultados de la segunda instancia 103

Tabla 18 ANOVA en función del costo para la instancia 2..... 105

Tabla 19 Interacciones factores principales 107

Tabla 20 ANOVA en función del cumplimiento de pedidos para la instancia 2..... 107

Tabla 21 ANOVA en función del tiempo computacional para la instancia 2..... 109

Tabla 22 Los resultados de la tercera instancia..... 110

Tabla 23 ANOVA en función del costo para la instancia 3.....	112
Tabla 24 ANOVA en función del cumplimiento de pedidos para la instancia 3.....	114
Tabla 25 ANOVA en función del tiempo computacional para la instancia 3.....	116

Lista de figuras

Figura 1 Países líderes en la investigación sobre VRP 26

Figura 2 Investigaciones sobre VRP en los últimos años 26

Figura 3 Investigaciones sobre 2E-VRP en los últimos años 27

Figura 4 Países líderes en la investigación sobre 2E-VRP..... 27

Figura 5 Investigaciones de los últimos años sobre 2E-VRPTW 28

Figura 6 Países líderes en la investigación sobre 2E-VRPTW 28

Figura 7 Áreas de interés investigativo sobre 2E-VRPSTW 29

Figura 8 Problema de optimización tipo. 47

Figura 9 Región de factibilidad y no factibilidad..... 49

Figura 10 Clasificación de los modelos 50

Figura 11 Espacio de búsqueda y espacio objetivo. Maximización de funciones 52

Figura 12 Características geográficas del modelo 2EV-RPSTW 61

Figura 13 Función satisfacción del cliente en términos de itinerario..... 62

Figura 14 Configuración de la población..... 70

Figura 15 Algoritmo NSGA-II..... 70

Figura 16 Matriz de costos ejemplo 72

Figura 17 Generación población inicia ejemplo 73

Figura 18 Cruzamiento de un punto..... 74

Figura 19 Cruzamiento de dos puntos..... 74

Figura 20 Cruzamiento ejemplo..... 75

Figura 21 Explicación proceso reparación..... 76

Figura 22 Población ejemplo Post-Reparación 76

Figura 23 Mutación Centros de cumplimiento..... 77

Figura 24 Mutación Centros de distribución..... 78

Figura 25 Mutación clientes..... 78

Figura 26 Resumen mutación ejemplo..... 78

Figura 27 Resumen ejemplo población total..... 79

Figura 28 Proceso de selección ejemplo 81

Figura 29 Diagrama de flujo del modelo 81

Figura 30 Clasificación de los nodos acorde al gen..... 82

Figura 31 Diagrama de flujo generación población inicial 83

Figura 32 Ubicación centros de cumplimiento 85

Figura 33 Ubicación centros de distribución 86

Figura 34 Ubicación clientes..... 86

Figura 35 Diagrama de flujo NSGA-II 86

Figura 36 Diagrama de flujo de cruce..... 87

Figura 37 Diagrama de flujo Reparación 88

Figura 38 Diagrama de flujo Mutación..... 89

Figura 39 Diagrama de flujo proceso de selección 90

Figura 40 Ventanas de tiempo para los clientes..... 94

Figura 41 Efectos principales para FO1 98

Figura 42 Interacciones de factores FO1-I1 99

Figura 43 Efectos principales para FO2-I1 100

Figura 44 Interacciones de factores para F02-I1 101

Figura 45 Efectos principales TC-I1 102

Figura 46 Interacción de factores para TC-I1 103

Figura 47 Efectos principales FO1-I2 106

Figura 48 Interacción de factores FO1 I2 106

Figura 49 Efectos principales para FO2-I2 108

Figura 50 Interacción de factores para FO2-I2 108

Figura 51 Efectos principales TC-I2 109

Figura 52 Interacción de factores TC-I2 110

Figura 53 Efectos principales FO1-I3 112

Figura 54 Interacción de factores FO1-I2 113

Figura 55 Efectos principales FO2-I3 114

Figura 56 Interacción de factores FO2-I3 115

Figura 57 Efectos principales TC-I3 116

Figura 58 Interacción de factores TC-I3 117

Figura 59 Efectos principales FO1- Conjunto de soluciones 118

Figura 60 Efectos principales FO2 Conjunto de soluciones 118

Figura 61 Efectos principales TC Conjunto de soluciones 119

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. NSGA MATLAB

Apéndice B. Resultados estadísticos

Apéndice C. Instancias de experimentación

Apéndice D. Artículo 2E-VRPSTW

Resumen

Título: Modelo determinístico bi-objetivo para el diseño de red de distribución orientada al comercio electrónico*

Autor: Luis Felipe Durán Tarazona, German Jesús Avellaneda Quiñonez.**

Palabras Clave: Problema de ruteo bi-objetivo de dos escalones, cumplimiento de pedidos electrónicos, ecommerce, NSGA-II, ventanas de tiempo flexibles, logística urbana.

Descripción:

En la presente investigación se aborda el problema de cumplimiento de pedidos de una red de distribución enfocada al comercio electrónico, considerando un modelo de dos escalones con ventanas de tiempo flexibles (Two echelon vehicle routing problema with soft time Windows 2E-VRPSTW) que se caracteriza principalmente porque presenta lotes pequeños, de alta frecuencia y llegada dinámica. La problemática se aborda como un modelo de dos objetivos, que busca minimizar los costos logísticos asociado al ruteo de los vehículos y en simultaneo maximizar el cumplimiento de los pedidos que relaciona una penalización por el incumplimiento del itinerario de entrega. Por otra parte, la demanda es determinística y asociada a cada cliente, la cual se atiende desde los centros de distribución por un único vehículo urbano del segundo escalón en un periodo de tiempo. Se desarrolla una propuesta del algoritmo genético NSGA-II en la herramienta MATLAB para dar solución al ejercicio planteado. Ejecutándose un diseño de experimentos para validar el algoritmo propuesto con 3 instancias y 8 escenarios diferentes para cada una de ellas, en los cuales se realizan diversas iteraciones en los parámetros de entrada del modelo para que en el análisis estadístico se valide la robustez y eficiencia de la heurística y se proponga acorde a la variable respuesta del diseño factorial la mejor configuración posible.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de estudios industriales y empresariales.
Director: MA. Javier Eduardo Arias Osorio.

Abstract

Title: Bi-objective deterministic model for the design of an e-commerce oriented distribution network.*

Author: Luis Felipe Durán Tarazona, German Jesús Avellaneda Quiñonez.**

Key Words: Two-step bi-objective routing problem, electronic order fulfillment, e-commerce, NSGA-II, flexible time windows, urban logistics.

Description:

This research addresses the order fulfillment problem of a distribution network focused on e-commerce, considering a two-echelon vehicle routing problem with soft time Windows 2E-VRPSTW (Two echelon vehicle routing problem with soft time Windows 2E-VRPSTW) which is mainly characterized by small batches, high frequency and dynamic arrival. The problem is approached as a two-objective model, which seeks to minimize the logistics costs associated with vehicle routing and simultaneously maximize order fulfillment, which relates a penalty for non-compliance with the delivery schedule. On the other hand, the demand is deterministic and associated to each customer, which is served from the distribution centers by a single urban vehicle of the second echelon in a period of time. A proposal of the NSGA-II genetic algorithm is developed in MATLAB to solve the proposed exercise. Running a design of experiments to validate the proposed algorithm with 3 instances and 8 different scenarios for each of them, in which several iterations are performed on the input parameters of the model so that the statistical analysis validates the robustness and efficiency of the heuristic and proposes the best possible configuration according to the response variable of the factorial design.

* Senior thesis

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies.
Director: MA. Javier Eduardo Arias Osorio

Introducción

A comienzos del siglo XXI con el auge del internet como herramienta masiva para conectar a la humanidad se da el surgimiento y consolidación del comercio electrónico (e-commerce) como una alternativa al retail tradicional, por ello surgieron compañías que lograron comprender y solventar esas necesidades existentes en el mercado, alcanzando un crecimiento exponencial año tras año, mientras que las empresas de comercio convencional se enfocaron principalmente en robustecer su canal de ventas virtual.

A diferencia del comercio tradicional, el mercado virtual permite a los consumidores un contacto directo y dinámico con los ofertantes de productos y servicios a través del internet, lo que conlleva a la desaparición de intermediarios y de puntos físicos de venta, aumentando así la eficiencia y satisfacción del cliente, ya que tiene acceso a este canal de venta sin importar el horario y el lugar donde se encuentre (Cordero, 2019)

La gran cualidad del comercio electrónico (e-commerce) es el “aporte de un número de pedidos (e-orders), que presentan características distintivas que incluyen lotes pequeños, de alta frecuencia y llegada dinámica.” (Jiang & Li, 2020) Por lo tanto, se hace complejo para los sistemas logísticos obtener un modelo eficiente de la red distribución y ruteo que permita satisfacer las órdenes de los clientes finales de manera integral, a esta problemática se le conoce como el problema de cumplimiento de pedidos electrónicos.

Considerando las características propias del problema de cumplimiento de pedidos electrónicos, se debe partir de un modelo de ruteo de vehículos, puesto que es una herramienta eficaz para

optimizar múltiples factores que tiene un alto impacto en el precio al consumidor final, este establece en líneas generales la manera óptima de distribuir mercancía en un entorno urbano.

Con el avance de la industria han surgido modelos con elevada complejidad, lo que conlleva considerar soluciones más amplias y eficientes que permiten tener un mejor acercamiento a la realidad empresarial. De acuerdo con las actuales exigencias logísticas se considera una variante del ruteo, que contempla un modelo de dos escalones con ventanas de tiempo flexibles que penalizan la impuntualidad con la que se atienden a los clientes, lo que obliga a considerar el cumplimiento de los pedidos y la minimización de los costos de la red de distribución en simultaneidad.

De esta forma se propone una solución matemática que procura dar un conjunto de posibles soluciones optimas, logrando así encontrar el balance entre costos y satisfacción. La problemática planteada se evalúa mediante el algoritmo genético NSGA-II con la herramienta MATLAB, posteriormente, se representan escenarios donde los parámetros de entrada del modelo tengan diferencias significativas, esto con el fin de evaluar el comportamiento y eficiencia de los resultados obtenidos del modelo propuesto.

El objetivo principal es diseñar y evaluar un modelo que permita optimizar los costos y el cumplimiento de pedidos de una red de distribución propia de un entorno de comercio electrónico, se considera que el desarrollo de esta herramienta aporta una perspectiva que complementa de la línea de investigación del ruteo dos escalones con ventanas de tiempo.

Tabla de cumplimiento de objetivos

Tabla 1. *Cumplimiento de objetivos*

Objetivo	Cumplimiento
Realizar una revisión de literatura sobre el problema de diseño de red de distribución orientada al comercio electrónico.	Numeral 2
Formular un modelo matemático para el problema de diseño de red de distribución orientada al comercio electrónico.	Numeral 4
Definir y desarrollar la técnica a usar para dar solución al modelo formulado.	Numeral 6
Evaluar la técnica a partir de instancias propias del problema abordado.	Numeral 8
Elaborar un artículo de carácter publicable sobre la investigación.	Apéndice D

1. Generalidades del proyecto

1.1 Planteamiento del problema

El comercio electrónico se ha convertido en la espina dorsal de la economía actual, un medio irrenunciable para proveer de bienes a la población y garantizar la viabilidad de los negocios (Paredes, 2020). En Latinoamérica se ha evidenciado un crecimiento superior al 300% en el último año, producto de la situación de emergencia sanitaria provocada por el virus COVID-19 (La Republica, 2020). El crecimiento en el sector simboliza un reto logístico de grandes magnitudes para las compañías, los costos logísticos del transporte representan el 4% de total facturado (Mora, 2008). Por consiguiente, es importante minimizarlos mediante un adecuado sistema de ruteo.

El cumplimiento de pedidos del comercio electrónico es fundamental para satisfacer las expectativas de los clientes, los compradores recurrirán a la competencia en caso de no obtener la experiencia deseada. Por lo que aquellas compañías que tengan mejores servicios y estrategias para dar cumplimiento a la demanda de los consumidores obtienen una ventaja competitiva sustentada en un alto nivel de servicio y costo bajo.

Así mismo, el desarrollo de un modelo de ruteo es una herramienta poderosa para optimizar una gran variedad de factores que tiene un alto impacto en el precio al consumidor final. El comercio electrónico se caracteriza por la necesidad de dar solución a tres grandes decisiones, las cuales son: la asignación de pedidos, la sincronización y consolidación de los pedidos, y la entrega de los pedidos a los clientes finales. “Estas tres decisiones dependen una de la otra y se afectan mutuamente. En gran medida, la interacción entre estas decisiones influye significativamente en los gastos de cumplimiento de pedidos y en la experiencia de compra de los clientes”. (Jiang & Li, 2020)

Con base a lo anterior, se propone un modelo de ruteo bi-objetivo para un sistema logístico de dos escalones con ventanas de tiempo flexibles, contemplando la maximización del cumplimiento de los pedidos y simultáneamente la minimización de los costos propios del transporte de mercancías. Para el desarrollo del modelo se emplea una demanda determinística en un único periodo de tiempo empleando el algoritmo genético NSGA-II para encontrar el conjunto de soluciones factibles. Con esto se pretende comparar diferentes escenarios, evaluando el comportamiento y eficiencia de los resultados obtenidos del modelo propuesto.

Esta propuesta académica realiza un aporte teórico a la línea de la investigación de operaciones relacionada con el ruteo, ya que complementa los estudios previos realizados en el entorno del

comercio electrónico, siendo novedoso al considerar de manera integral la disminución de costos y el cumplimiento de pedidos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y evaluar un Modelo determinístico bi-objetivo para el diseño de red de distribución orientada al comercio electrónico.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar una revisión de literatura sobre el problema de diseño de red de distribución orientada al comercio electrónico.

Formular un modelo matemático para el problema de diseño de red de distribución orientada al comercio electrónico.

Definir y desarrollar la técnica a usar para dar solución al modelo formulado.

Evaluar la técnica a partir de instancias propias del problema abordado.

Elaborar un artículo de carácter publicable sobre la investigación.

1.3 Metodología

Para la realización metodológica se ha de seguir la metodología planteada en el libro Introducción a la investigación de operaciones (Hillier & Lieberman, 2010)

1.3.1 Definición del problema y recolección de datos

Una vez definido el problema de investigación (2E-VRPSTW), se plantea una revisión de literatura compuesta por diferentes fases de búsqueda en las que se estudian los elementos que componen el problema, mediante el uso de bases de datos y con el propósito de caracterizar los componentes del problema específico.

Actividad 1: Definir las palabras claves para realizar la búsqueda en las bases de datos científicas.

Actividad 2: Construir la ecuación de búsqueda y seccionarla para caracterizar cada uno de los componentes del problema. (**Fase 1:** VRP. **Fase 2:** 2E-VRP. **Fase 3:** 2E-VRPTW. **Fase 4:** 2E-VRPSTW).

Actividad 3: Ejecutar la ecuación de búsqueda en las bases de datos disponibles.

Actividad 4: Realizar el respectivo análisis bibliométrico de los artículos encontrados en cada una de las fases de búsqueda.

Actividad 5: Establecer la pertinencia de los artículos encontrados para su posterior inclusión en la revisión de literatura

Actividad 6: Elaborar la revisión de literatura respecto a cada una de las fases de caracterización propuestas del problema. En esta sección se describen la estructura de los modelos, las técnicas, y los aportes más relevantes en las diferentes áreas de estudio.

1.3.2 Formulación del modelo matemático

Para esta fase del proyecto se ha de formular matemáticamente el problema a estudiar, esta formulación debe representar fidedignamente las características propias de la realidad que se busca optimizar. Con esta formulación se busca dar cumplimiento al segundo objetivo específico planteado. Por consiguiente, se proponen las siguientes actividades:

Actividad 1: Entender y dominar los fundamentos de la problemática de satisfacción de pedidos electrónicos de una red de distribución 2E-VRPTW.

Actividad 2: Comprender el funcionamiento de los modelos con ventanas de tiempo flexibles que son multiobjetivo.

Actividad 3: Consolidar la estructura del modelo a estudiar, partiendo del modelo 2E-VRPTW y añadiéndole las ventanas de tiempo flexibles para que tome una naturaleza bi-objetivo (2E-VRPSTW).

Actividad 4: Definir el objetivo que se plantea cumplir con la formulación del modelo y posterior búsqueda del mejor conjunto de soluciones.

Actividad 5: Determinar las variables de decisión del problema

Actividad 6: Detallar las dos funciones objetivo del modelo.

Actividad 7: Acotar el modelo mediante el uso de restricciones que se deben cumplir.

Actividad 8: Verificar la congruencia y fiabilidad del modelo construido y los elementos que lo componen.

1.3.3 Obtención de soluciones a partir de un modelo matemático

Una vez formulado el modelo matemático se debe desarrollar un procedimiento computacional que permita obtener soluciones a partir del modelo. En este caso particular el plantea estudiar el modelo matemático propuesto en el software MATLAB, el cual cuenta con un paquete especializado para el análisis de modelos matemáticos usando el algoritmo genético NSGA-II, técnica adecuada para el análisis de modelos bi-objetivo. Para conseguir este el conjunto solución se plantean las siguientes actividades:

Actividad 1: Identificar las metaheurísticas disponibles para el estudio de modelos matemáticos bi-objetivo.

Actividad 2: Analizar y seleccionar la técnica metaheurística más apropiada para el análisis del modelo. En este caso la técnica escogida es el algoritmo genético NSGA-II, por los resultados eficientes y eficaces encontrados en la literatura en el momento de la aplicación de este.

Actividad 3: Estudiar el paquete que dispuesto en el software de Matlab para aplicar la técnica NSGA-II.

Actividad 4: Programar el algoritmo NSGA-II para dar solución al modelo 2EVRPSTW en el software Matlab.

1.3.4 Validación del modelo

Una vez se obtengan el conjunto de mejores soluciones con el algoritmo genético NSGA-II, es necesario hacer una exhaustiva prueba para determinar y corregir los posibles fallos que ocurran en las fases metodológicas realizadas con anterioridad. También se realizarán pruebas de escritorio en pequeñas instancias para verificar el comportamiento del algoritmo. Se realizarán las siguientes actividades:

Actividad 1: Determinar la validez de los resultados obtenidos una vez se ejecute el programa.

Actividad 2: Si es necesario se debe realizar correcciones al modelo.

Actividad 3: Diseñar diferentes escenarios, alterando los parámetros de entrada del modelo.

Actividad 4: Evaluar resultados obtenidos de cada una de las instancias.

1.3.5 Preparación para la aplicación del modelo

Una vez el modelo y el algoritmo muestran eficacia para dar solución a los objetivos planteados con la investigación, estos están completamente disponibles para futuras aplicaciones académicas o industriales en el ámbito del ruteo enfocado en el comercio electrónico.

1.3.6 Síntesis de resultados y conclusiones

Finalmente, mediante la recopilación y análisis de los resultados obtenidos en la investigación. Se realizarán las siguientes actividades:

Actividad 1: Finalizar la elaboración del libro del proyecto de grado.

Actividad 2: Elaboración de un artículo de carácter científico que sintetice la problemática de la satisfacción de pedidos electrónicos en un modelo 2E-VRPSTW.

2. Revisión de la literatura y análisis bibliométrico

2.1 Análisis Bibliométrico

Inicialmente se plantea la ecuación de búsqueda de tal forma que permitiese ir acotando el universo de posibles artículos a estudiar, logrando que los resultados guarden relación con las temáticas 2E-VRPTW y el problema de cumplimiento en el comercio electrónico. Es decir, la exploración investigativa se aborda de lo general a lo particular.

Para estructurar la ecuación de búsqueda fue necesario el uso de operadores lógicos como los son: AND y OR. El proceso de búsqueda se realizó mediante el uso de la herramienta para estudios bibliométricos y evaluaciones de producción científica Scopus, dado que “engloba una colección multidisciplinar a nivel mundial de resúmenes, referencias e índices de literatura científica, técnica y médica” (Biblioteca virtual UIS, s.f.)

Para poder abarcar la temática se realizaron cuatro ecuaciones de búsqueda:

2.1.1 VRP

Tema: ("*VRP*" OR "*vehicle routing problem*" OR "*Routing problem*" OR "*urban distribution*")

Con esta ecuación de búsqueda se pretende identificar las publicaciones científicas que abordan el problema general del ruteo de vehículos (VRP). Se obtuvieron 11,973 resultados en los últimos 11 años. En esta búsqueda destaca China y Estados Unidos como los países donde más se publica en relación con el tema (Figura 1). Finalmente, se observa que sigue en aumento el interés en el tema y sus variaciones en los últimos años (Figura 2).

Figura 1

Países líderes en la investigación sobre VRP

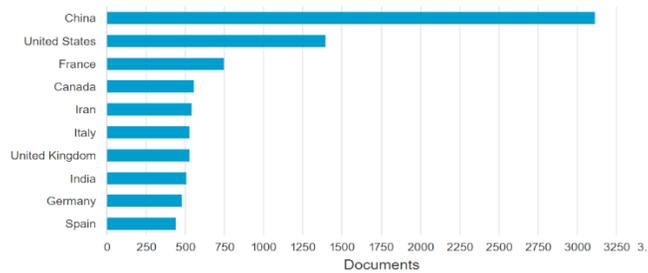
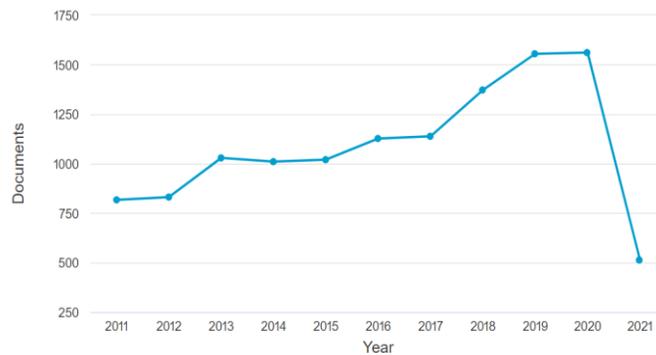


Figura 2

Investigaciones sobre VRP en los últimos años



Para continuar con el proceso de análisis bibliométrico y de literatura es necesario ajustar la ecuación de búsqueda, como se muestra a continuación.

2.1.2 2E-VRP

Tema: ("2*echelon" OR "two*echelon" OR "2E") AND ("VRP" OR "vehicle routing problem" OR "Routing problem" OR "urban distribution")

Esta ecuación de búsqueda pretende identificar las publicaciones científicas que abordan la temática de ruteo de vehículos de dos escalones (2E-VRP). De esta forma, se obtuvieron 109

resultados en los últimos 11 años, en esta búsqueda destacan los países de China y Francia como los países donde mayoritariamente se publica acerca de este tema (Figura 4). Así mismo, se observa un comportamiento en aumento en el número de publicaciones desde 2016 (Figura 3).

Figura 3

Investigaciones sobre 2E-VRP en los últimos años

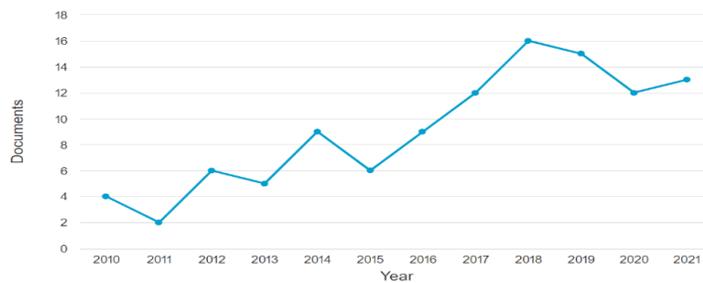
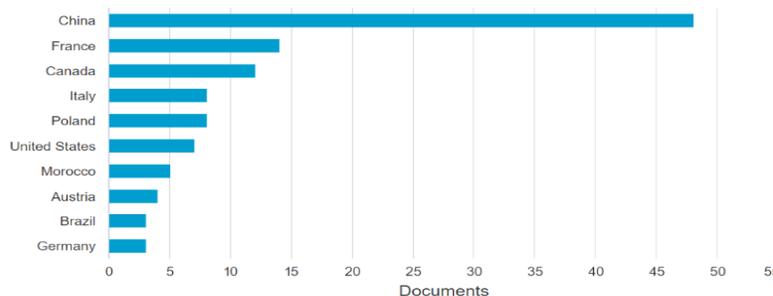


Figura 4

Países líderes en la investigación sobre 2E-VRP



Nuevamente y a partir de la anterior, se realiza un ajuste complementario a la ecuación de búsqueda como se muestra a continuación.

2.1.3 2E-VRPTW

Tema: ("2*echelon" OR "two*echelon" OR "2E") AND ("VRP" OR "vehicle routing problem" OR "Routing problem" OR "urban distribution") AND ("time windows" OR "TW")

Esta nueva ecuación de búsqueda pretende identificar las publicaciones más recientes en el campo de ruteo de vehículos de dos escalones con ventanas de tiempo (2E-VRPTW). De esta forma, se obtuvieron 14 resultados en los últimos 11 años, los cuales se han publicado artículos esporádicamente desde 2014, resaltando el número de publicaciones en el año 2019 (Figura 5). Así como en la ecuación anterior, China es el país con la mayor cantidad de publicaciones en este tema (Figura 6).

Figura 5

Investigaciones de los últimos años sobre 2E-VRPTW

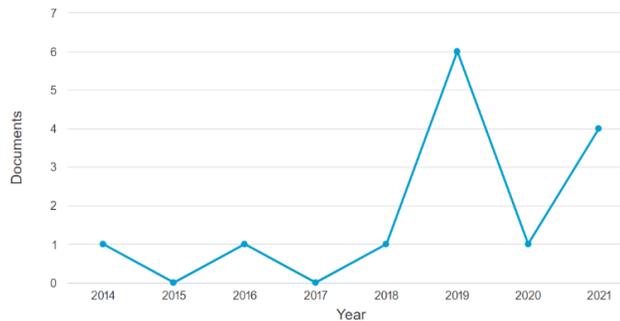
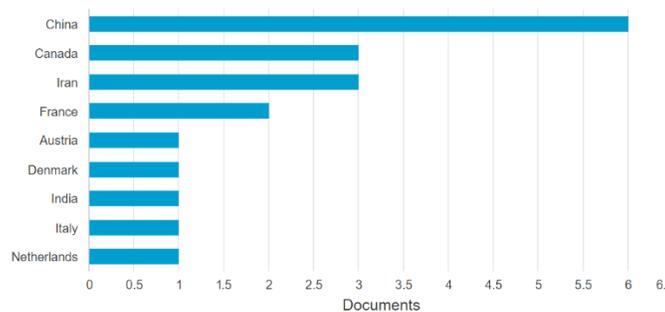


Figura 6

Países líderes en la investigación sobre 2E-VRPTW



Por último, se incorpora a la ecuación de búsqueda el concepto de ventanas de tiempo flexible o suaves como se muestra a continuación.

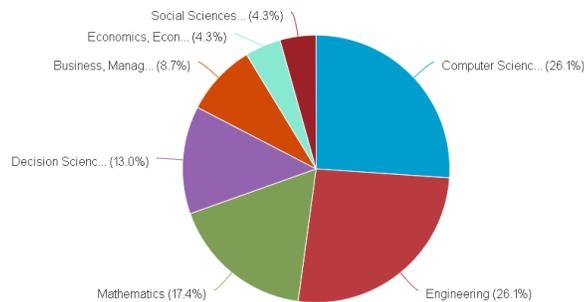
2.1.4 2E-VRPSTW

Tema: ("2*echelon" OR "two*echelon" OR "2E") AND ("VRP" OR "vehicle routing problem" OR "Routing problem" OR "urban distribution") AND ("Soft time windows" OR "flexible time windows" OR "STW")

La ecuación de búsqueda es modificada por última vez para acotar los resultados a obtener a la especificidad de la problemática a tratar, añadiendo la temática de las ventanas de tiempo suaves (STW, por su sigla en inglés). Por lo tanto, haciendo uso de la misma herramienta con la que se trabajó anteriormente, se obtuvo un total de 10 resultados, siendo el tema de investigación asociado a las áreas de las ciencias de la computación y la ingeniería (Figura 8).

Figura 7

Áreas de interés investigativo sobre 2E-VRPSTW



2.2 Análisis preliminar de la literatura

En el presente análisis se realiza una revisión detallada de la literatura publicada en relación con el problema de cumplimiento de pedidos electrónicos (E-order fulfillment problem), generalidades del problema de ruteo, problema de ruteo con dos escalones y ventanas de tiempo suaves

2.2.1 Problema de cumplimiento de pedidos electrónicos

Es a comienzos del siglo XXI que el mundo del comercio minorista cambió drásticamente debido a la consolidación del comercio electrónico (comercio minorista electrónico), puesto que la interconectividad del planeta fue mayor gracias a la evolución del internet en cobertura, seguridad y velocidad. Por consiguiente, conforme avanzaban los años la academia fue profundizando en el estudio de las problemáticas que surgían a partir de él, mostrando resultados que permitieron grandes oportunidades de mejora en costo y servicio, a su vez que se acercaban a soluciones más realistas.

(Chen & Leteney, 2000) hacen una comparativa entre el comercio tradicional y el comercio electrónico, teniendo este último propiedades y costos de mantenimiento de existencias más bajos, así como menores gastos de impresión y envío que los tradicionales, además cuentan con una ventana de oportunidad de decisión que les da suficiente flexibilidad para tratar con los requisitos de los clientes de manera eficiente.

(Lin & Mahmassani, 2002) consolidan algunas de las políticas de entrega de muchas tiendas en línea en los Estados Unidos, utilizando software de generación de rutas para evaluar el impacto de algunas de estas políticas en situaciones reales del problema, especialmente se comparan las políticas atendidas y desatendidas, junto con diferentes anchos de ventana de entrega.

(Cao & Zhao, 2004) presentan una estructura conceptual integrada para evaluar el impacto de varios atributos del minorista electrónico en el rendimiento que se obtiene al cumplir con sus pedidos. Los resultados de este trabajo revelan que el precio del producto, el sistema de seguimiento de pedidos, los sistemas de control de inventario y los múltiples canales de cumplimiento tienen un impacto significativo en el rendimiento de la entrega de pedidos.

(Mokhtarian, 2004) estudia varios problemas relacionados con los impactos espaciales y de la evaluación del transporte en el comercio minorista electrónico. Y luego de realizar un análisis comparativo entre las ventajas de los dos estilos de comercio: tradicional y electrónico, concluye que ninguno está en una posición dominante sobre el otro.

(Campbell & Savelsbergh, 2005) definen una solución basada en algoritmos de inserción a los problemas de enrutamiento y programación. En el problema de entrega a domicilio propuesto, la empresa decide qué entregas aceptar o rechazar, así como la franja horaria para las entregas aceptadas a fin de maximizar los beneficios esperados.

(Xu, 2005) se enfoca en el cumplimiento de pedidos en el comercio minorista en línea. Formula tres problemas diferentes a analizar: el de un almacén o centro logístico, el de toda la red de almacenes y clientes, y el de la asignación de inventario entre almacenes para SKU (Stock Keeping Unit) de baja demanda. Y para cada modelo por separado, presenta un método de solución apropiado:

- Almacén: Se investiga un sistema de inventario donde la demanda es estocástica minimizando los costos totales esperados relacionados con el inventario sujeto a una restricción de espacio.
- Redes de almacenes y clientes: Se construyen heurísticas casi óptimas para la reasignación de un gran conjunto de pedidos de clientes minimizando el número total de envíos.
- Asignación de inventarios entre almacenes: considerando las unidades de inventario del sistema, se asigna un nivel de existencia a cada uno de los almacenes garantizando la minimización de los costos de transporte.

(Catalán & Fisher, 2012) estudian el problema de asignar unidades de mantenimiento de existencias a los centros de distribución para minimizar los pedidos divididos, lo que ha demostrado ser un problema de naturaleza NP-hard. Los autores proponen varias heurísticas como lo son los algoritmos voraces y los prueban con otros algoritmos de referencia utilizando datos de transacciones reales.

(Torabi, Hassini, & Jeihoonian, 2015) estudian un problema de optimización que integra la asignación de fuentes de cumplimiento y transbordo de inventario. En este entorno problemático, el comerciante de pedidos electrónicos opera un sistema de cumplimiento de un solo escalón compuesto por centros de distribución y clientes, pero no se trata el enrutamiento de pedidos. Los autores desarrollan un enfoque de descomposición de Benders basado en la minimización de los costos de logística en el cumplimiento de los pedidos, este enfoque dio resultados más favorables que el método CPLEX en las pruebas realizadas. El desarrollo de este modelo permite que los minoristas pueden administrar el cumplimiento de los pedidos electrónicos desde múltiples centros de cumplimiento, lo que permite la posibilidad de transbordo de inventario, así como transferencias de pedidos completos o parciales entre los centros. El modelo también ayuda a los tomadores de decisiones a decidir si instituir una política de transferencia puede mejorar su servicio al cliente, así como el impacto de los costos de transbordo en sus políticas de cumplimiento.

(Jasin & Sinha, 2015) estudian el problema de cumplimiento de pedidos de múltiples artículos donde el minorista electrónico necesita construir una política de cumplimiento para decidir desde qué instalación se debe dar cumplimiento a los componentes de la orden, de una manera que minimice los costos de envío totales esperados por el cliente sobre un horizonte finito. Los autores introducen dos heurísticas de cumplimiento y examinan su desempeño. Por su naturaleza estocástica es computacionalmente intratable con programación lineal determinística (PLD), no

obstante, de la solución derivada del PLD se implementa la primera heurística como una probabilidad de cumplimiento para cada elemento, dado que la decisión de cumplimiento para cada artículo se toma independientemente de la decisión de cumplimiento de otros artículos de la misma orden, esta heurística no tiene un desempeño satisfactorio. La segunda heurística mejora la primera heurística al permitir consolidación de cumplimiento en diferentes artículos en el mismo pedido esto se logra gracias a la modificación de la solución PLD a través de un redondeo (o acoplamiento correlacionado cuidadosamente construido entre las variables de decisión proporcionando un límite superior teórico sobre la razón competitiva asintótica de ambas heurísticas con respecto a la política óptima. Los experimentos numéricos muestran que la segunda heurística funciona muy cerca del óptimo para una amplia gama de parámetros de problemas.

(Schrotenboer, Wruck, Roodbergen, Veenstra, & Dijkstra, 2017) proponen un problema de enrutamiento en los almacenes de comercio electrónico, que integra la preparación de pedidos y el reabastecimiento de productos devueltos. Los productos que son devueltos al almacén por los clientes necesitan reconsiderar el clásico problema de enrutamiento de los preparadores de pedidos en el almacén. Los autores abordan un algoritmo híbrido genético (algoritmo genético con aspectos de búsqueda local) para resolver este problema. En experimentos numéricos, se demuestra el rendimiento de este enfoque y se evalúa las ganancias potenciales en distancia de viaje en comparación con una heurística de búsqueda local y con soluciones óptimas. Se demuestra que el algoritmo híbrido genético produce soluciones casi óptimas, y en su mayoría óptimas, y que las distancias de viaje se reducen hasta en un 23,48% cuando las devoluciones de productos se incluyen en las rutas de picking¹, en lugar de procesar las devoluciones de productos por separado.

¹ Actividad de preparación de pedidos, la cual consiste en la recogida y combinación de cargas no para conformar un pedido

(Leung, y otros, 2018) desarrollan un sistema de preprocesamiento de cumplimiento de pedidos electrónicos basado en la nube, que integra un algoritmo genético y un motor de inferencia basado en reglas, de modo que los proveedores de servicios logísticos (PSL) puedan planificar eficazmente las operaciones de procesamiento interno de los pedidos recibidos antes de la ejecución real del proceso. A través de un caso de estudio realizado en una empresa de logística, este enfoque brinda soluciones de manejo de pedidos para procesar pedidos de logística de comercio electrónico de manera muy eficiente, con una reducción significativa en el tiempo de procesamiento de pedidos y la distancia de viaje. A su vez, una mayor eficiencia operativa en el manejo de pedidos de comercio electrónico permite que los PSL se alineen mejor estratégicamente con los minoristas en línea, que brindan a los clientes fechas de entrega garantizadas.

(Nasiri, Rahbari, Werner, & Karimi, 2018) estudian un nuevo problema de enrutamiento de vehículos con cross dock², que incorpora la selección de proveedores y asignación de pedidos. Este problema tiene como objetivo minimizar los costos totales, incluida la compra, el transporte, el cross-docking, costos de inventario y multas por entrega temprana o tardía. Los autores proponen un modelo de solución de dos etapas y lo solucionaron con el optimizador CPLEX. Además, se presenta un análisis de sensibilidad para evaluar cómo el costo de distribución afecta las decisiones de suministro, encontrándose una optimización de los costos de compra y transporte simultáneamente, así como los costos de penalización por anticipación o tardanza.

(Perboli, Rosano, Saint-Guillain, & Rizzo, 2018) proponen un marco de simulación-optimización para la construcción de instancias para el transporte urbano de mercancías y evaluación de los entornos operativos logísticos de la ciudad. Para ilustrar la utilidad del marco

² Implica transferir los embarques del medio de transporte en el que llegan al medio de transporte en el que salen, sin que existan stocks o medie un almacenaje intermedio

desarrollado y evaluar el impacto de las opciones de entrega multimodal para hacer frente a la demanda del comercio electrónico, los autores presentan un caso de estudio en Turín, Italia. Se obtiene un acercamiento a la realidad ya que se introduce diferentes fuentes de datos reales y requisitos de las partes interesadas, ahondando en el uso de diferentes tipos de vehículos para la entrega de pedidos, resultando en que aquellos que son amigables con el medio ambiente son los más adecuados para hacer frente a la alta demanda.

(Li, Li, Aneja, Guo, & Tian, 2019) estudiaron el problema de cumplimiento de pedidos, que integra la asignación de pedidos y decisiones de enrutamiento de pedidos de un minorista en línea. Los autores asumieron que no se asoció ninguna ventana de tiempo con cada orden.

(Jiang & Li, 2020) en este estudio se profundiza en el problema de cumplimiento de pedidos con ventanas de tiempo y sincronización del comercio minorista electrónico, bajo las premisas de un modelo de dos escalones con ventanas de tiempo. Se desarrolla un enfoque basado en la descomposición de Benders, mostrando resultados muy favorables en la coordinación y sincronización de las operaciones de diferentes tipos de vehículos y en la organización en la entrega de los pedidos mientras se cumplen los plazos de servicio de los clientes, para minimizar los gastos de cumplimiento de la orden.

2.2.2 Generalidades del problema de ruteo de vehículos (VRP)

El problema de ruteo de vehículos hace su aparición por primera vez (Dantzig & Ramser, 1959), estudian la ruta óptima de una flota de camiones de reparto de gasolina, en su trabajo se buscan determinar la manera de asignar estaciones a camiones de tal manera que se satisfaga la demanda de las estaciones y el kilometraje total cubierto por la flota de camiones sea el mínimo, para conseguir este objetivo se utiliza un método exacto de programación lineal, de esta forma los cálculos de modelo se pueden realizar fácilmente a mano o mediante una maquinaria de

computación automática. Posteriormente (Clarke & Wright, 1964) proponen el método conocido como algoritmo de ahorro, método utilizado para resolver problemas de optimización, la toma de decisiones se basa en información disponible en el momento, fácil y rápida de implementar. Sin embargo, el modelo no garantiza encontrar una solución óptima, ya que se considera una heurística.

El problema de ruteo de vehículos se caracteriza por considerar a los clientes, las bodegas y a la flota de vehículos como lo principales elemento a tener en cuenta. Actualmente existen multitudes de variaciones al problema original donde se consideran restricciones y variaciones en el objetivo del modelo como la capacidad de los vehículos (CVRP), limitaciones de ventanas de tiempo (VRPTW), considerar los viajes de regreso (VRPB), la recogida y entrega de mercancía (VRPPD), mezcla de flota o flota heterogénea (MFVRP), y combinaciones entre estas variantes aplicadas a los múltiples campos de la industria que de acuerdo con sus necesidades modifican el modelo para buscar buenas soluciones.

2.2.3 Problema de ruteo de vehículos con dos escalones (2E-VRP)

Este planteamiento se deriva del problema inicial de ruteo de vehículos, esta variación considera dos escalones y es especialmente usado en cadenas de suministro, en el primer escalón comprende el envío y consolidación de la mercancía desde el depósito central hasta un depósito intermedio denominado satélite, y en el segundo escalón la mercancía es enviada del satélite al cliente final.

El primero en abordar esta temática es (Gonzales, Perboli, Tadei, & vigo, 2007) presentando la formulación del modelo teniendo en cuenta la capacidad (2E-CVRP) y en el cual se empleó un algoritmo de ramificación y acotamiento que les permite encontrar soluciones óptimas para un número limitado de clientes y satélites (20 clientes, 2 satélites).

(Crainic, Mancini, Perboli, & Tadei, 2008) Presentan un estudio en el que se utilizan algunas metaheurísticas basadas en separar los problemas de enrutamiento de primer y segundo escalón, resolviendo iterativamente los dos problemas de enrutamiento resultantes. Las dos metaheurísticas utilizan el agrupamiento (clustering) y el enfoque multi-deposito, para finalmente compararse el desempeño de las diferentes metaheurísticas utilizadas entre sí, examinando el impacto de diferentes distribuciones espaciales de clientes y satélites sobre el desempeño de cada uno de los métodos y el costo del sistema. Como conclusión, se afirma que las metaheurísticas funcionan bien y el sistema de dos escalones puede reducir en gran medida los costos de distribución.

(Crainic, Perboli, Tadei, & Vigo, 2011) desarrollan una familia de metaheurísticas Multi-Inicio para el modelo 2E-VRP, estos métodos se basan en separar la transferencia de depósito a satélites, y de la entrega de satélites a clientes, resolviendo iterativamente estos problemas resultantes. Las heurísticas consisten en que después de encontrar una solución inicial se realiza una búsqueda local seguida de una diversificación, si la nueva solución es factible nuevamente se realiza una búsqueda local, de lo contrario se realiza un procedimiento de búsqueda de factibilidad, y en el caso donde se tenga éxito se aplica la búsqueda local. Se proponen diferentes procedimientos de diversificación y de búsqueda de viabilidad. Como resultado, los métodos heurísticos presentados muestran un mejor desempeño a los métodos previos, tanto en eficiencia como en precisión.

(Crainic, Ricciardi, & Storchi, 2009) consideran los desafíos que conllevan las operaciones logísticas en áreas urbanas, enfocándose en la planificación de la logística de la ciudad, mediante la programación integral de la distribución de dos escalones (2E-VRP). Teniendo como objetivo el favorecer el desarrollo económico y social de las ciudades, la idea fundamental es analizar las partes interesadas (cargadores, transportistas, y demás) y las decisiones que componen el sistema

logístico integral. Este documento se enfoca en la programación integral de corto plazo de las operaciones y la administración de los recursos.

(Crainic, Mancini, Perboli, & Tadei, 2012) abordan situaciones realistas en las operaciones logísticas urbanas, considerando de una forma amplia la composición de los costos (costos fijos del uso de las rutas, los costos operativos, y los costos ambientales). Además, se analizan cómo los componentes del costo afectan la ubicación del satélite en el 2E-VRP y en qué condiciones es mejor el enfoque de dos escalones al de solo uno. El objetivo del modelo es minimizar el costo total de transporte y la satisfacción de la capacidad de los vehículos y satélites; de igual forma se emplearon métodos heurísticos de agrupamiento rápido que permiten resolver instancias grandes de clientes. Como conclusión se afirma que un enfoque 2E-VRP funciona mejor que el VRP aplicado por separado a cada escalón, pues se obtiene una mayor reducción en los costos.

(Macini, 2012) destaca la aplicabilidad del 2E-CVRP en los niveles de planeación estratégicos, tácticos y operativos. De igual forma recomienda que los métodos de solución aplicados a este tipo de problemas sean ágiles y precisos, y finalmente presenta los enfoque en el que el modelo de dos escalones es una mejor alternativa frente a un modelo de un solo escalón.

(Hemmerlmayr, Cordeau, & Crainic, 2012) presentan una heurística de búsqueda adaptativa de vecindarios grandes para el problema de dos escalones (2E-VRP) que supera los algoritmos existentes y el problema de enrutamiento de ubicación (LRP), donde el número y la ubicación de un conjunto de instalaciones deben determinarse simultáneamente con las rutas de los vehículos.

La heurística de búsqueda local adaptativa en el vecindario (ALNS) es exitosa para los dos modelos usando los mismos operadores y valores de parámetros. Este planteamiento permite trabajar un conjunto de instancias grandes para el 2E-VRP (200 clientes y 10 instalaciones

satelitales) Este planteamiento permite trabajar un conjunto de instancias grandes para el 2E-VRP (200 clientes y 10 instalaciones satelitales).

(Crainic, Mancini, Perboli, & Tadei, 2013) presentan una metaheurística basada en un codicioso procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria (GRAPS con Path Relinking) y un procedimiento de búsqueda local (LS) en secuencia, la solución resultante de estos procedimientos se vincula a una solución elite mediante un procedimiento vinculante de rutas, esto para evadir las soluciones inviables. Los resultados computacionales de este procedimiento son efectivos en instancias de 50 clientes y 4 satélites, mejorando en la eficiencia y la precisión de los métodos anteriormente utilizados.

(Zeng, Xu, & Xu, 2013) proponen una heurística híbrida de dos fases para 2E-VRP. Se compone de un codicioso procedimiento GRASP y un descenso de vecindad variable (VND). En primer lugar, la solución factible inicial completa se obtiene aplicando el algoritmo GRAPS al problema del primer escalón. En segundo lugar, el VND trabaja en la solución hasta que no se pueda encontrar mejoras en los vecindarios. Las pruebas computacionales muestran una efectividad y eficiencia hasta con 39 instancias. Las pruebas computacionales muestran una efectividad y eficiencia hasta con 39 instancias.

(Jiang H. , 2014) Presentan una especie de algoritmo heurístico híbrido para resolver el problema de enrutamiento de vehículos de dos escalones, que busca mejorar la calidad y la aceleración del algoritmo de solución. Combinaron el algoritmo codicioso, el algoritmo de colonias de hormigas y el algoritmo de búsqueda de vecindarios. Los resultados encontrados al aplicar este algoritmo híbrido comparados con otro algoritmo de alta precisión muestra una menor calidad en la solución, a la vez que muestra mayor rendimiento en términos de velocidad de

resolución. De los resultados experimentales también se puede encontrar que el algoritmo presenta un mejor desempeño en el caso del modelo 2E-VRP respecto al modelo clásico de VRP.

(Niño & Arias, 2017) implementan un híbrido metaheurístico compuesto por dos técnicas, la primera de ellas fue GRASP, y se enfocan en la formulación de una solución inicial, y el segundo método usado es recocido simulado que mediante los operadores 2-opt, Or-Opt y Exchange (métodos de construcción de vecindades) intensifican la búsqueda de una mejor solución inicial. Las pruebas sobre este híbrido reflejan alta intensificación, puesto que en la primera fase hay un alto componente de aleatoriedad, y la etapa de intensificación no impacta sustancialmente la función objetivo, debido a la calidad de las soluciones iniciales. En conclusión, el híbrido GRASP+SA es mejor en todos los casos que el método GRASP, las heurísticas de intercambio son mejores que el método GRASP+SA, y al comparar el GRASP+SA extendido (método propuesto) contra la técnica GRASP+VND (método extraído de la literatura) se encuentran ligeras diferencias, y en uno de los casos se logra mejorar la solución.

2.2.4 Problema de ruteo de vehículos con dos escalones y ventanas de tiempo

(Grangier, Gendreau, Lehuédé, & Rousseau, 2016) presentan la variante del 2E-VRP que integra las limitaciones relacionadas con la logística en la ciudad, más precisamente las ventanas de tiempo de entrega, la sincronización y los viajes de segundo nivel, se denomina el problema de enrutamiento de vehículos múltiples de viajes con sincronización satelital (2E-MTVRP-SS). Para resolver este planteamiento proponen una búsqueda adaptativa (ALNS) de grandes vecindarios, el principio general de ALNS es destruir iterativamente y repara la solución actual utilizando heurísticas, que se seleccionan basado en su desempeño en el pasado. Los métodos de reparación evalúan miles de posibles inserciones en términos de rentabilidad y viabilidad. En este caso se

describe la forma eficiente de probar si una inserción es factible con respecto a las limitaciones temporales a través del método holguras de tiempo de avances (FTS).

(Dallaert, Saridarq, Woensel, & Crainic, 2018) proponen dos formulaciones matemáticas basados en la trayectoria, con el propósito de solucionar el problema de ruteo de dos escalones con ventanas de tiempo. Una de las formulaciones plantea la trayectoria del primer y segundo escalón de forma conjunta, mientras que la otra establece la trayectoria por separado entre los escalones. El método es efectivo para problemas compuestos por 100 clientes y cinco satélites.

(Jiang & Li, 2020) estudian el problema de cumplimiento de pedidos con ventanas de tiempo y sincronización, que surgen del entorno de ventas minoristas en línea. Los pedidos de los clientes son emitidos en las ventanas de tiempo de decisión, los minoristas deben coordinar y sincronizar las operaciones de los vehículos y la entrega de pedidos en el plazo establecido. El objetivo del estudio es minimizar los costos de en el cumplimiento de pedidos, para esto presentan un modelo de programación lineal entera mixta, realizan experimentos extensos para verificar la efectividad del enfoque y lo comparan con un solucionador comercial y una heurística codiciosa.

(Dellaert, Woensel, Crainic, & Saridarq, 2020) Presentan un estudio del problema de ruteo de vehículos con capacidad y dos escalones de múltiples productos básicos con ventanas de tiempo. Se tiene en cuenta especialmente el recorrido del primer escalón, recorridos de segundo escalón y el movimiento de mercancías del primer escalón al segundo, considerando la conexión y sincronización de rutas. En este estudio proponen un esquema de descomposición que desacopla los problemas de enrutamiento del primer y del segundo escalón, y elimina el tercer componente de conexión y sincronización, posteriormente vuelve a acoplar usando restricciones que aseguran el movimiento de mercancías entre los dos escalones. Para llevar a cabo esta descomposición, presentan una serie de formulaciones para el MC-2E-VRPTW, y desarrollan un enfoque de

solución exacta para el problema de la vida real. Finalmente presentan un estudio computacional completo donde muestra la efectividad en términos de esfuerzo computacional y calidad de la solución.

(Farham, Iyigun, & Haldun, 2020) consideran el problema de enrutamiento de ubicación de dos escalones con ventanas de tiempo (2E-LRPTW) para abordar las decisiones estratégicas y tácticas del transporte urbano de carga. En su planteamiento el objetivo del modelo es disminuir el costo total, el problema está limitado por la capacidad de los centros de distribución, satélites y vehículos; además consideran las ventanas de tiempo de los clientes. Finalmente proporcionan una formulación de partición del problema general, proponen una solución exacta basada en la generación de columnas y desarrollan dos heurísticas basadas en la estructura jerárquica y clústers, con tres enfoques diferentes.

2.2.5 Problema de ruteo con dos escalones y ventanas de tiempo suaves

(Kang & Lee, 2018) estudiaron un problema mono-objetivo de generación de rutas de vehículos múltiples (MVRP) con ventanas de tiempo suave y una flota de vehículos heterogénea. Para ello se desarrollaron dos modelos, que utilizan programación entera mixta (MIP) y algoritmo genético (GA). El primer modelo (MIP) se construye inicialmente para minimizar el costo total de transporte, que incluye el costo de asignación, el costo de viaje y el coste de tardanza para el fabricante, posteriormente se aplica el Algoritmo Genético para resolver el problema de modo que se puede obtener una solución casi óptima cuando el problema es demasiado difícil de resolver utilizando el MIP. La gran problemática radica cuando el problema se torna NP-Hard donde el modelo no puede encontrar la solución óptima.

(Chen, Gu, & Gao, 2020) Formulan un modelo Bi-objetivo del problema de enrutamiento de vehículos de varios depósitos con ventanas de tiempo suave (MDVRPSTW). Este acercamiento

matemático tiene como objetivo minimizar el costo de transporte, en el cual va inmerso el costo del enrutamiento y la función de penalización por prestar el servicio fuera de la ventana de tiempo establecida. El algoritmo de dos fases está diseñado para resolver este problema, en la primera fase, los pedidos de los clientes se distribuyen al centro de distribución mediante un algoritmo exacto y en la segunda fase, se calcula todo el recorrido de cada centro de distribución. Porque este problema es un NP-Hard, es difícil obtener una solución óptima rápidamente cuando se calculan a gran escala, entonces se adopta un algoritmo genético mejorado para resolverlo.

(Wang & Yin, 2018) Desarrollan un método para garantizar que los alimentos frescos se puedan entregar justo a tiempo y con un costo total mínimo mientras mantener la calidad de los alimentos frescos (PFVRPSTW). En la primera etapa se agrupan los clientes determinando que camión es responsable de la entrega. La segunda etapa, que es con base en los resultados de la agrupación de consumidores, los autores desarrollan un modelo de costo total que incluye el transporte, refrigerado, devaluado y costos de penalización incurridos durante la distribución. Este modelo se utiliza para determinar la selección de ruta óptima, el control de temperatura, y la velocidad promedio de cada camión en distribución. Este artículo propone un método de agrupamiento difuso para agrupar clientes y mejora un algoritmo genético difuso que se utiliza para resolver el modelo de costo total propuesto.

(Zhang, Zhang, Ma, Zhang, & Liu, 2019) Este artículo utiliza una interpretación directa del problema de generación de rutas de vehículos con ventanas de tiempo flexible (VRPFlexTW) como un problema de objetivos múltiples, donde los costos totales de distribución (incluidos los costos de viaje y los costos fijos del vehículo) se minimizan, y se maximiza la satisfacción del cliente, la cual se encuentra directamente relacionada con el cumplimiento de la entrega en la ventana de tiempo establecida. Esta satisfacción del usuario es representada mediante un modelo

lineal. Como metodología se desarrolla una estrategia de solución basada en la optimización de colonias de hormigas y tres operadores de mutación, que incorpora el concepto de optimización de Pareto para la optimización multiobjetivo obteniendo resultados experimentales efectivos.

(Wang & Wen, 2020) estudian el problema de enrutamiento de vehículos de flotas heterogéneas de dos escalones y bajas emisiones de carbono (LC-2EHVRP) para servidores de logística de terceros de cadena de frío (3PL) con ventana de tiempo mixta bajo una política de bajo carbono, entonces, tiene como objetivo minimizar los costos, emisiones y maximizando la satisfacción total del cliente simultáneamente. Para encontrar la solución proponen un algoritmo genético adaptativo (GAA) validado mediante una prueba de referencia numérica. Además, se presenta un estudio para demostrar que la influencia del cambio de la ventana de tiempo mixta afecta la satisfacción final de los clientes. Así mismo, en la configuración del comercio de carbono en el modelo LC-2EHVRP los resultados muestran que la satisfacción del cliente es un factor de influencia fundamental para que las empresas planifiquen la estrategia de enrutamiento de vehículos. La gran característica de este estudio es que representan la satisfacción del cliente mediante una expresión no lineal, lo que representa un aumento en la complejidad de la resolución del modelo, no obstante, es un acercamiento muy cercano a la realidad.

3. Marco de referencia

3.1 Marco de antecedentes

Tabla 2

Marco de antecedentes.

Autores	Descripción del proyecto de grado	Aportes
Andrés Fernando Niño Sáenz (2017)	<p>Estudio del problema de ruteo de vehículos de dos escalones:</p> <p>El propósito de este proyecto de investigación fue ahondar en el problema de ruteo de vehículos de dos escalones (2E-CVRP) extendiendo la búsqueda de rutas que minimicen el costo asociado al transporte de los vehículos, para dos escalones.</p> <p>Para dar solución a la problemática el autor implementó un híbrido metaheurístico de dos técnicas: GRASP con la cual da una solución inicial y posteriormente se usa la técnica de Recocido simulado en la que, mediante el uso de operadores de construcción de vecindades, logró mejorar la primera solución obtenida.</p>	<p>Se consiguieron aportes importantes que sirvieron como bases fundamentales del proyecto a investigar (2E-VRPSTW), entre sus resultados se destaca el correcto uso del híbrido metaheurístico que permitió proponer una extensión la cual encuentra soluciones favorables respecto del método inicial, siendo probada sobre las instancias encontradas en la literatura para el 2E-CVRP</p>

Continuación Tabla 2.

Marco de antecedentes

Autores	Descripción del proyecto de grado	Aportes
Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento (2020)	<p>Solución a un modelo de optimización para la gestión de inventario y ruteo de vehículos de dos escalones con transbordos laterales (2e-irpt) a través de una metaheurística híbrida.</p> <p>En el presente proyecto se aborda el problema de gestión de inventarios y ruteo de vehículos de dos escalones considerando transbordos laterales, el objetivo era minimizar los costos logísticos totales (transporte e inventario) mediante una metaheurística híbrida compuesta por dos metodologías: Algoritmo Genético y Búsqueda Tabú. Guarda relación con el modelo 2E-VRPSTW ya que brindan soluciones a un complejo sistema de ruteo dos escalones.</p>	<p>El principal resultado es que evidenció que el algoritmo obtiene buenas soluciones, reduciendo el tiempo computacional requerido por las metodologías exactas. Construyendo así el progreso de la línea de investigación del ruteo.</p>
Julio César Camacho Pinto (2018)	<p>Diseño de una red de distribución de dos escalones, de un solo producto y multipremiado con demanda estocástica, como un problema de optimización LIRP (location inventory routing problema) que se resuelve mediante una metaheurística híbrida:</p> <p>Este proyecto busca estudiar</p> <p>Organizar la cadena de suministro tomando decisiones por separado para los problemas de localización, ruteo e inventarios, lleva a soluciones subóptimas, debido a que se ignora la relación que tiene estos problemas entre sí. En la investigación se diseñó un modelo de red de distribución de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica.</p>	<p>Se logró comprobar que una metaheurística híbrida puede generar mejores soluciones que las metaheurísticas clásicas, para un diseño red de distribución de dos escalones y multiperiodo con demanda estocástica.</p>

3.2 Marco teórico

3.2.1 Optimización matemática

La optimización matemática es una parte importante de la investigación operativa que gracias a los diferentes avances tecnológicos ha permitido dar solución a problemáticas más complejas y cercanas a la realidad empresarial. Esta se define como “un conjunto de resultados, métodos analíticos y numéricos enfocados a encontrar e identificar al mejor candidato de entre una colección de alternativas, sin tener que enumerar y evaluar explícitamente todas esas alternativas.” (Paredes S. , 2012)

Los problemas de optimización se componen generalmente de la función objetivo, variables y restricciones. La siguiente (Figura 8) es una forma genérica y simple con la cual se representan:

Figura 8

Problema de optimización tipo.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimizar } f(x) \\ \text{sujeto a} \\ g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ x \in S \subset \mathfrak{R}^n. \end{array} \right.$$

La función objetivo es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Las variables representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo, estas se clasifican en dependientes e independientes. Finalmente, las restricciones representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables deben satisfacer (Ramos, Sanchez, Ferrer, Barquín, & Linares, 2010).

3.2.2 Métodos de optimización

Los métodos de optimización se pueden clasificar en: métodos clásicos y métodos heurísticos. Los clásicos buscan garantizar un óptimo local, encontrándose métodos como: optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, dinámica, entre otros. Mientras que los heurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global y se incluyen los algoritmos evolutivos, el método de algoritmo recocido simulado, las búsquedas heurísticas (métodos tabúes, búsqueda aleatoria, avariciosa, etc.).

3.2.3 Modelo de optimización

El modelo de optimización es un esquema teórico, en forma matemática representa la realidad del problema a analizar, se elabora con el fin de facilitar la comprensión y el estudio del comportamiento de las variables que se ven involucradas en el problema. Una clara representación de la realidad permite tomar mejores decisiones para resolver el problema. (Ortiz, Varas, & Jorge, 2000)

Un modelo matemático de optimización consiste en determinar los valores de las variables de decisión, de modo que se optimice el valor de una medida de rendimiento o efectividad, cumpliendo con las restricciones que componen el planteamiento del problema. El modelo matemático es representado por la función objetivo y se expresa como una función escalar multivariada. (Hossein, 1994)

$$f: R^n \rightarrow R. \text{ si } x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Esto implica de los valores de las variables de decisión pertenecen al subconjunto de soluciones factibles $S \subseteq R^n$ (Figura 9).

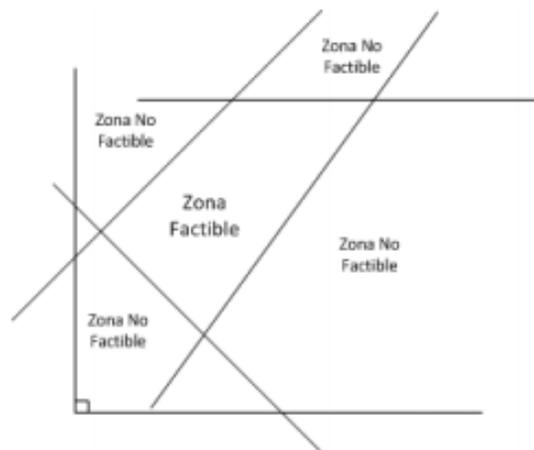
Si $S = R^n$ el conjunto de funciones factibles es todo el espacio (excepto aquellos puntos donde la función f no esté definida). Es decir, el conjunto de soluciones factibles no está restringido. En

caso contrario el problema contiene restricciones, por lo tanto, el conjunto S puede caracterizarse de diversas formas, igualdades y desigualdades que representan un conjunto dado de posibles valores, donde cada una de las funciones $g_i, R^n \rightarrow R, i = 1, \dots, m$ representa alguna característica o condición que se desea incorporar a la solución del modelo.

Si la función f y $g_i, i = 1, \dots, m$. representa líneas afines, de la forma $a^2x + b$. Donde a es el vector R^n y b un vector escalar, indicando que el problema es de tipo programación lineal. En el caso de que alguna de las líneas afines no sea lineal, se cataloga el problema como de programación no lineal. (Hossein, 1994)

Figura 9

Región de factibilidad y no factibilidad



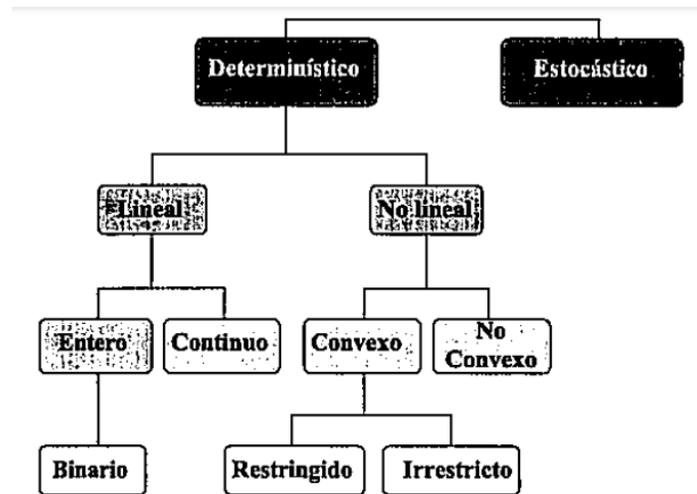
Por otra parte, las restricciones se componen de variables, mínimo una variable por restricción, si todas las variables son tales que pueden tomar valores en un intervalo de la recta real, se afirma que las variables son continuas. Siguiendo con este razonamiento, si se establece que las variables de las restricciones sólo toman valores enteros, el problema de programación será entero. De la misma manera, y en casos más particulares cuando las variables toman uno de dos valores posibles,

generalmente 0 o 1, se tiene un problema de programación binario, y las variables se denominan variables binarias.

Finalmente, (Dantzing, 1963) clasifica los modelos de optimización de acuerdo con las características de las funciones que intervienen en él (Figura 10). De modo que los modelos estocásticos contienen parámetros que se comportan de forma aleatoria, contraria a los modelos determinísticos en los cuales no hay ningún tipo de aleatoriedad y riesgos, eliminando los factores de difícil control.

Figura 10

Clasificación de los modelos



3.2.4 Problemas de optimización multi-objetivo.

Para dar solución a problemáticas del mundo real se requiere tener en consideración múltiples criterios de evaluación simultáneamente que tienden a estar en conflicto entre sí. A este tipo de formulación se le conoce como problemas de optimización multi-objetivo y se diferencia claramente de los mono-objetivo ya que requieren la optimización simultánea de más de una

función objetivo en paralelo buscando producir un conjunto de buenas soluciones para que el tomador de la decisión pueda decantarse por una de ellas. (López J. , 2013)

Este conjunto de buenas soluciones es llamado Pareto-óptimo y se encuentra representado en un espacio n-dimensional acorde a la cantidad de funciones a evaluar, teniendo entonces dos tipos de espacio: de decisiones o de búsqueda y el objetivo. El primero corresponde al dominio de las funciones a optimizar. Mientras que el segundo corresponde al co-dominio de la función o de las funciones. (López J. , 2013)

3.2.4.1 Dominancia de Pareto. Al tener más de una función se obtiene un conjunto de soluciones y de cada una de ellas un vector de variables n-dimensional. En estos casos, se usa el criterio de dominancia de Pareto para evaluar la bondad de las soluciones. Este criterio sustenta que: Una solución a pertenecer a un conjunto de soluciones óptimas si no puede encontrarse una solución b tal que mejore uno de los objetivos sin empeorar al menos uno de los otros. (López J. , 2013)

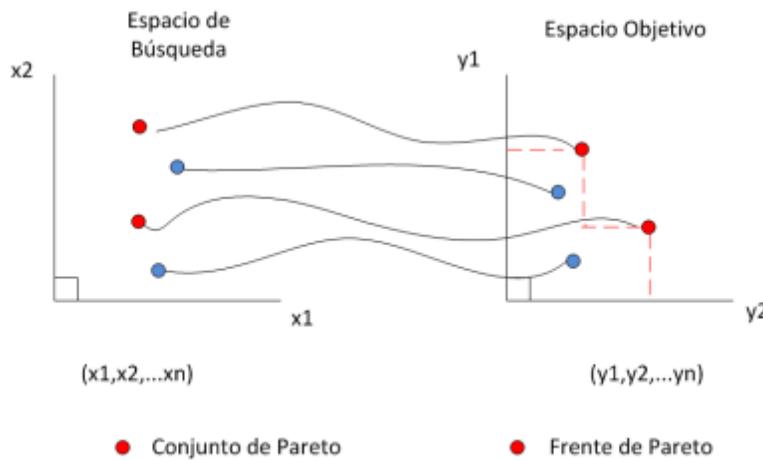
(von Lucken, Hermosilla, & Barán, 2004) lo definen como “Entonces, un vector x es Pareto óptimo si no existe otro vector de decisión factible $X_O \in X_f$ que lo domine”.

3.2.4.2 Conjunto de Pareto y frente Pareto Óptimo. El conjunto de Pareto es un conjunto de puntos en el espacio de búsqueda que se corresponden con las mejores soluciones al problema de optimización. Mientras que un frente de Pareto es un conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo. Este conjunto de soluciones se integra con aquellos puntos encontrados en el espacio objetivo que se corresponden con las soluciones no dominadas, de acuerdo con el criterio de dominancia de Pareto. Este conjunto de soluciones representa las mejores soluciones de compromiso considerando todos los objetivos en juego. Naturalmente, cuando se la gráfica en el espacio objetivo forma un frente (Figura 11), de ahí su nombre característico. (López J. , 2013)

Este frente puede ser lineal, cóncavo, convexo, continuo, discontinuo, etc., dependiendo de las funciones objetivo integrantes del problema. Todas las soluciones pertenecientes al frente de Pareto son igualmente buenas, y no se puede especificar si alguna de las soluciones es preferible a las otras, excepto en aquellos casos en que el DM haya definido una preferencia a priori. El desafío de los algoritmos de optimización multiobjetivo se encuentra en encontrar el frente de Pareto real del problema en ciernes, o lograr la mejor aproximación del mismo sujeta a las limitaciones de recursos (tiempo y memoria) existentes. (López J. , 2013)

Figura 11

Espacio de búsqueda y espacio objetivo. Maximización de funciones



3.2.5 Técnicas de optimización

Algunos modelos matemáticos manejan un nivel de complejidad alto, haciéndolos imposibles de responder con cualquier algoritmo de optimización. En ese escenario es necesario abandonar la búsqueda de la solución óptima y buscar buenas soluciones al modelo, aplicando técnicas heurísticas y metaheurísticas (Taha, 2012). Es por ello que es necesario hacer énfasis en las técnicas metaheurísticas tales como algoritmos genéticos.

3.2.5.1 Técnicas de optimización modelos multiobjetivo. Estas técnicas buscan generar opciones considerando varios objetivos de forma sincrónica y generalmente contrapuestos. Por lo anterior, la noción de solución óptima se redefine, dejando de lado la idea de la mejor y única solución, por la búsqueda de un conjunto de buenas soluciones. Este conjunto de buenas soluciones es presentado ante el tomador de decisiones (Decision Maker- DM) para que seleccione una de ellas. (López J. , 2013)

3.2.5.1.1 Funciones Agregadas. Pretende utilizar técnicas mono-objetivo para resolver el planteamiento multi-objetivo. Para desarrollar este planteamiento se busca descomponer función objetivo compleja en funciones objetivo-simples o escalares. Este enfoque tiene como ventaja la utilización de las técnicas mono-objetivo existentes, funciona bien con pocas funciones objetivo y espacios de búsqueda convexo (Das & Dennis, 1997).

3.2.5.1.2 Algoritmo VEGA. Es un algoritmo genético cuya estructura básica es muy similar a la estructura de un algoritmo genético tradicional, modificando la manera como se realiza la selección inicial, está consiste en generar tantas subpoblaciones iniciales como funciones objetivo. Posteriormente se realiza una selección proporcional considerando sólo el valor de la función objetivo, que le corresponde a cada subpoblación (López J. , 2013).

3.2.5.1.3 Algoritmo NSGA. Es un algoritmo genético que clasifica a los individuos de la población de acuerdo con el ranking de Pareto. Donde todos los individuos no dominados se agrupan y se le asigna un valor Fitness alto (las mejores soluciones). posteriormente se utiliza la técnica de Sharing manteniendo una diversidad en la población. Seguidamente se realiza el mismo procedimiento, pero con un conjunto nuevo conjunto de individuos no dominado, con la

particularidad que para este nuevo grupo el valor fitness será menor que el grupo inicial. El procedimiento es iterativo y termina en el momento que todos los individuos reciben una valoración Fitness (Coello, Lamont, & Van Veldhuizen, 2007).

3.2.5.1.4 Algoritmo NSGA II. Versión mejorada del algoritmo NSGA, reduciendo la complejidad de la ordenación y la clasificación de los individuos. Aplicando la utilización del elitismo, se logra una mejora en la convergencia del algoritmo frente al Pareto del problema. Finalmente, cambia el procedimiento Sharing por uno que compara las poblaciones de las áreas cercanas a cada una de las soluciones (crowded operator).

En este algoritmo la población descendiente Q de tamaño N es creada usando una población de padre P de tamaño N, posteriormente las poblaciones son combinadas para formar una población de tamaño 2N. Seguidamente se realiza un ordenamiento de no dominancia y se clasifica la población R en diferentes Pareto de acuerdo con su nivel de dominancia. Finalizado este proceso se genera una nueva población, constituida por el mejor frente de no dominancia F1, continuando con las soluciones del segundo frente de no dominancia F2, y así sucesivamente. La población R es de tamaño 2N, y N individuos conforma la población descendiente, por lo que no todos los individuos de la población R podrán ser acomodados en la nueva población, en consecuencia, una parte de los individuos serán rechazados.

Esta técnica metaheurística de línea base se utiliza para medir el rendimiento comparativo de las nuevas propuestas (López J. , 2013).

3.2.5.1.5 Algoritmo PAES. Este algoritmo utiliza un solo individuo como agente de búsqueda, trabaja dividiendo el espacio objetivo conformado por los individuos que componen las soluciones

en una cantidad constante de áreas rectangulares, llamadas regiones grillas o cuadrillas de regiones. El algoritmo pretende encontrar el conjunto de soluciones no dominadas que minimiza el número de individuos de cada región. Asegurando una distribución uniforme a lo largo de toda la extensión del frente de Pareto (López J. , 2013).

3.2.5.1.6 Algoritmo SPEA. Utiliza dos conjuntos de poblaciones: La población principal donde los operadores evolutivos son aplicados, y un archivo externo con una cantidad de variables de soluciones no dominadas. En cada iteración del algoritmo, las mejores soluciones de la población se almacenan en el archivo externo de soluciones utilizando la técnica de Clustering. A través de un torneo binario entre ambos conjuntos como operador de selección, los individuos que pertenecen a la población externa se le calculan un factor de dominancia, como en el algoritmo MOGA. Por otra parte, el valor de aptitud de cada individuo de la población principal se calcula considerando el ranking de los individuos de la población externa que este individuo domina (Coello, Lamont, & Van Veldhuizen, 2007).

3.2.5.1.7 Algoritmo SPEA2. Esta versión tiene tres diferencias principales con la versión original, incorporan una asignación de aptitud más elaborada considerando los individuos dominados por la solución y los individuos que dominan. De forma similar, se utiliza la técnica Clustering que permite calcular el individuo vecino cercano, mejorando el rendimiento de búsqueda. Y finalmente, se mejora el proceso de eliminación de soluciones preservando aquellas que están en los límites del frente de Pareto

Esta técnica es considerada por la comunidad investigadora como línea base para la comparación al igual que el algoritmo NSGA II (López J. , 2013).

3.2.6 Logística

La logística se ha conformado como un proceso estratégico para organizar las actividades de producción y de distribución de las empresas. El concepto de sistema logístico ha incluido un amplio espectro de procesos que condicionan la eficiencia y la competitividad empresarial en el actual contexto de globalización de la economía asegurando así la consecución del objetivo fundamental de las mismas (Robusté Antón, 2005). Estos procesos son:

- Procesos de almacenamiento. Administración de diversas clases de bodegas.
- Procesos de transporte desde y hacia la empresa de toda clase de bienes.
- Flujos internos, en planta, de materias primas, bienes terminados, o en proceso.
- Manejo de las distintas clases de inventarios.
- Recolección, administración, almacenamiento y transmisión de datos. (Vélez Maya, 2014)

Es importante entonces considerar a profundidad los procesos de transporte y distribución de mercancías hacia los clientes, esta se define como: el conjunto de operaciones necesarias para el desplazamiento de los productos preparados como cargas, desde el lugar de producción o manufactura, bajo el concepto de óptima calidad, costo razonable y entrega justo a tiempo (Barón, Barrios, Ávila, & Álvaro).

3.2.6.1 Ruteo de Vehículos. Se estima que en Colombia los costos logísticos representan el 15% de las ventas de productos de empresas nacionales, de los cuales una tercera parte corresponde al transporte de la mercancía (Puentes, 2015). Es por ello, que es vital para las compañías acelerar sus investigaciones en el ámbito de ruteo de vehículos para garantizar competitividad en el mercado.

El Problema de Ruteo de Vehículos – VRP, permite establecer las rutas que debe seguir una flota de carros, con el propósito de optimizar las variables asociadas al transporte de mercancías o prestación de servicios tales como: costos, distancias, nivel de satisfacción al cliente, entre otros (Velásquez L. , 2015).

Su objetivo principal es obtener el menor costo total asociado a transporte, menor distancia recorrida, menor tiempo de distribución, entre otras variables (Rocha, González, & Orjuela, 2011). Existen gran cantidad de tipos de VRP que se definen gracias a las características propias del modelo de negocio a analizar, en el caso de la presente investigación se usará el 2E-VRPSTW.

3.2.7 Orden de compra

El proceso de compra en el comercio electrónico se oficializa en el momento en cual se genera una orden de compra, esta se define como “un documento que establece una relación comercial entre un proveedor y un cliente, en donde se registra la solicitud por parte de un comprador a una empresa para adquirir un producto o servicio.” (Fetecua, 2021)

Esta usualmente se compone de:

- Nombre, datos de contacto y dirección del proveedor y del comprador.
- Número de orden de compra.
- Lugar y fecha de la generación del pedido.

- Todos los términos de entrega y de pago del pedido.
- Cantidad y descripción (nombre) de productos o servicios solicitados.
- Precio por unidad de los productos referidos en la orden de compra.
- Costos de envío, impuestos y los demás pertinentes.
- Firma válida de autorización. (Fetecua, 2021)

3.2.8 Comercio electrónico

El desarrollo de las tecnologías de la información y las telecomunicaciones, favorecieron la globalización y un mercado emergente en el cual los oferentes y demandantes situaron sus transacciones a través de medios electrónicos, de esta manera surgieron las empresas y consumidores digitales.

El comercio electrónico tiene sus orígenes en el comercio tradicional y adopta los principios de la economía clásica como los procesos de oferta, demanda, precio, etc. Sin embargo, la naturaleza tecnológica le permite desarrollar sus propios principios. Por lo que el comercio electrónico no se puede considerar sólo como una forma complementaria de realizar actos de comercio vía electrónica (Oropeza, 2018).

La Organización Mundial del Comercio lo define como: “la producción, distribución, comercialización, venta o entrega de bienes y servicios por medios electrónicos” (Lopez, 2020). Por otra parte, La organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) define el comercio electrónico como: “la compra o venta de bienes o servicios, ya sea entre empresas, hogares, individuos, gobiernos y otras organizaciones públicas o privadas, realizadas en redes mediadas por computación” (OCDE, 2019)

3.2.9 Problema de entrega de pedidos electronicos

Se define como los pasos involucrados en recibir, procesar y entregar pedidos a los clientes en un ambiente de comercio electrónico, específicamente incluye la toma de decisiones relacionadas con la captura y asignación de pedidos electrónicos, el suministro, el ensamblaje de pedidos, la consolidación, la sincronización de pedidos y el enrutamiento de pedidos (Cleophas & Ehmke, 2014). El objetivo principal es que el comerciante electrónico se beneficie al integrar todos estos subproblemas en un modelo de optimización.

Existen tres macro decisiones en el cual el comerciante buscará reducir costos, estas son:

3.2.9.1 Asignación de pedidos. Se refiere a como se asignan los pedidos a lo largo del modelo de dos escalones, como se asignan los centros de cumplimiento para dar satisfacción al pedido del cliente, como se asignan los inventarios de los centros de cumplimiento para satisfacer la demanda consolidada en cada centro de distribución, como se asignan los pedidos de los clientes en los grandes camiones de distribución. (Jiang & Li, 2020)

3.2.9.2 Consolidación de órdenes y sincronización. Que vehículos de distribución urbana deben consolidarse en cada centro de distribución. Que pedidos de clientes deben completarse desde cada centro de distribución. Como se coordinan y sincronizar las operaciones que se llevan a cabo en los centros de distribución, relacionado con los transbordos de los grandes camiones de distribución y los vehículos de distribución urbana. (Jiang & Li, 2020)

3.2.9.3 Entrega de pedido. Como organizar las rutas en el primer escalón del modelo, desde los centros de cumplimiento hasta los centros de distribución. Como organizar las rutas desde los centros de distribución hasta los clientes finales. (Jiang & Li, 2020)

4. Modelo para el 2E-VRPSTW

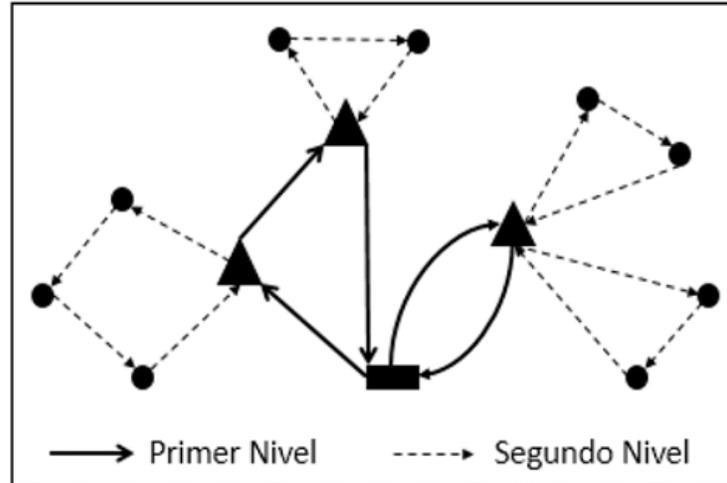
4.1 Descripción del modelo

Se define el 2E-VRPSTW como un modelo de ruteo de dos escalones con ventanas de tiempo flexibles denotado por el grafo $G = (V, A)$, en el cual V representa los nodos: Centros de cumplimiento D , Centros de distribución S y Clientes C . Mientras que los posibles arcos A del modelo se dan por la comunicación de cada uno de los nodos, detallado así: $A1$ entre nodos de D y S , $A2$ conjunto de arcos que conectan a S entre sí, $A3$ como aquellos arcos que comunican a S y C y finalmente $A4$ como las conexiones entre nodos C .

Este modelo tiene las siguientes características geográficas. Ver Figura 12. Donde el centro de cumplimiento se encuentra en la periferia de la ciudad comunicándose exclusivamente con centros de distribución en donde se generan los transbordos necesarios para atender a cada uno de los clientes.

Figura 12

Características geográficas del modelo 2EV-RPSTW



Se considera una demanda determinística en un horizonte de un periodo de tiempo, siendo atendida por un único vehículo en cada escalón. La capacidad de los vehículos depende del nivel en el que se encuentra Q_1 (vehículos del primer escalón) $>$ Q_2 (vehículos del segundo escalón). La ubicación espacial y la demanda de cada uno de los clientes se conocen previamente y se atienden por vehículos que se movilizan por cada uno de los arcos a una velocidad constante.

Cada arco perteneciente a A tiene un costo asociado C_{ij} y un tiempo de viaje t_{ij} determinado por la distancia euclidiana y la velocidad en la que se transporta la mercancía. De esta forma se pretende minimizar el costo del ruteo y simultáneamente maximizar el cumplimiento de los pedidos de los clientes, por lo tanto, se clasifica como un modelo bi-objetivo. Para este modelo en particular no se tienen en cuenta los inventarios en cada uno de los vértices.

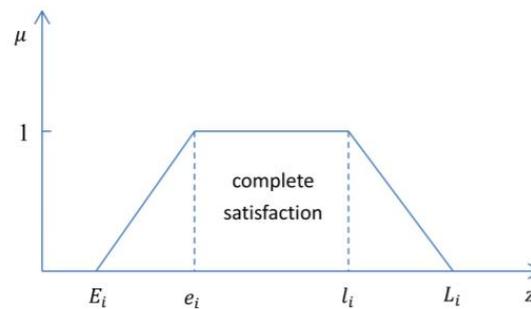
Con el fin de determinar el cumplimiento de los pedidos electrónicos se tienen en cuenta ventanas de tiempo flexibles, en este caso se definen límites E_i y L_i como la tolerancia máxima del cliente para recibir su pedido, mientras que e_i y l_i son las ventanas de tiempo a las que se compromete el comerciante electrónico a atenderlo. Es decir, que si un pedido es atendido entre

las fronteras máximas y las establecidas al momento de realizar la compra tendrá una penalización que afectará la satisfacción del cliente producto del incumplimiento de los itinerarios de entrega.

Ver figura 13.

Figura 13

Función satisfacción del cliente en términos de itinerario



El modelo pretende:

- Mostrar conjuntos de soluciones óptimas para que el tomador de la decisión pueda decantarse por una de ellas acorde a las necesidades y requerimientos de los clientes.
- Mostrar la ruta optima que deben llevar los vehículos de cada solución para que sea el máximo posible de satisfacción y el mínimo de costos.
- Determinar esfuerzos computacionales acorde a la magnitud de la problemática en términos de tiempo de procesamiento.
- Verificar el cumplimiento de las siguientes restricciones:
 1. Capacidad: La demanda transportada por un vehículo del segundo escalón no debe ser mayor a Q_2 . De igual forma, la capacidad de los vehículos del primer escalón no puede ser excedida por la demanda de los clientes a atender.

2. Indivisibilidad de los pedidos: asegurar que cada vehículo del segundo escalón visite máximo uno vez cada uno de los clientes y centros de distribución.
3. Un vehículo del primer escalón no puede atender a un cliente y uno del segundo escalón no puede visitar un centro de cumplimiento.
4. Ruteo: debe haber un orden de atención que no genere subrutas. También los vehículos con capacidad Q1 deben empezar y terminar la ruta en los centros de cumplimiento, mientras que vehículos con capacidad Q2 deben empezar y terminar la ruta en los centros de distribución.
5. Cumplimiento: Todos los clientes deben ser atendidos.

4.2 Formulación matemática

4.2.1 Notación

Definición formal del problema de cumplimiento de pedidos electrónicos con ventanas de tiempo flexibles $G = (V, A)$:

V: Conjunto de nodos que se dividen en 3 subconjuntos, conjuntos de centros de cumplimiento

V_D: conjunto de centros de distribución V_s , y conjunto de nodos de orden V_c .

A: Conjunto de arcos que se dividen en A_1, A_2, A_3, A_4

A₁: Conjunto de arcos que conectan los centros de cumplimiento (FCs) y los centros de distribución (DCs)

A₂: Conjunto de arcos que conectan pares de centros de distribución (DCs)

A₃: Conjunto de arcos que conectan los centros de distribución (DCs) y los nodos de orden (clientes).

A₄: Conjunto de arcos que conectan pares de nodos de orden.

A₁₂: Unión de los conjuntos A1 y A2.

A₃₄: Unión de los conjuntos A3 y A4.

Π₁: Vehículo del primer escalón.

Π₂: Vehículo del segundo escalón.

$\delta + (i, \theta)$ y $\delta - (i, \theta)$: Conjunto de arcos θ que parte y llega al nodo i .

4.2.2 Notación de índices.

(i, j): nodos.

P: nodo de posición.

C: Clientes.

S: Centros de distribución.

D: Centros de cumplimiento.

4.2.3 Parámetros

Q₁: Capacidad camión.

Q₂: Capacidad vehículo urbano.

C_{ij}: costo del viaje desde el nodo i a j .

t_{ij}: Tiempo de viaje desde el no i a j .

d_c: demanda de los clientes c .

e_i: Tiempo en el que se programa el inicio del servicio.

E_i: Tiempo más temprano en el que se iniciar el servicio.

l_i: Tiempo límite en el que se programa el inicio del servicio.

L_i: Tiempo más tardío en el que se inicia el servicio.

M: Un número muy grande.

4.2.4 Variables de decisión

$x_{ij\Pi_1}$: es igual a 1 si el camión viaja directamente del nodo i al nodo j.

$y_{ij\Pi_2}$: es igual a 1 si el vehículo urbano viaja directamente del nodo i a al nodo j.

$w_{\Pi_1\Pi_2}^c$: es igual a 1 si la demanda de los clientes i es primero transportada por un camión y transferida a un vehículo urbano.

$u_{i\Pi_1}$: la posición de los centros de distribución i en la ruta de camiones.

$st_{i\Pi_2}$: tiempo en el que un camión o vehículo urbano inicia el servicio al cliente en el nodo i.

$z_{i\Pi_2}$: la posición del nodo i en la ruta de vehículos urbanos.

N_i : función satisfacción al cliente.

4.2.5 Funciones Objetivo

$$Min \sum_{(i,j) \in A_{12}} C_{ij} X_{ij\Pi_1} + \sum_{(i,j) \in A_{34}} C_{ij} Y_{ij\Pi_2} \tag{1}$$

$$Max \frac{1}{Vc} \sum_{(i,j) \in Vc} N_i \tag{2}$$

4.2.6 Restricciones

$$N_i = \begin{cases} 0, & st_{i\Pi_2} \leq E_i \\ \frac{st_{i\Pi_2} - E_i}{e_i - E_i}, & E_i < st_{i\Pi_2} < e_i \\ 1, & e_i \leq st_{i\Pi_2} \leq l_i \\ \frac{L_i - st_{i\Pi_2}}{L_i - l_i}, & l_i < st_{i\Pi_2} < L_i \\ 0, & st_{i\Pi_2} > L_i \end{cases} ; \forall i \in V_c \quad (3)$$

$$\sum_{s \in V_s \cup \{p\}} \sum_{(i,j) \in \delta^+(s, A_{12})} x_{ij\Pi_1} \leq 1, \quad \forall p \in V_D \quad (4)$$

$$\sum_{s \in V_s \cup \{p\}} \sum_{(i,j) \in \delta^-(s, A_{12})} x_{ij\Pi_1} - \sum_{s \in V_s \cup \{p\}} \sum_{(i,j) \in \delta^+(s, A_{12})} x_{ij\Pi_1} = 0, \quad \forall p \in V_D \quad (5)$$

$$w_{\Pi_1\Pi_2}^c = 1, \quad \forall c \in V_c \quad (6)$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^-(p, A_{12})} x_{ij\Pi_1} \geq w_{\Pi_1\Pi_2}^c, \quad \forall c \in V_c, \quad \forall p \in V_s \quad (7)$$

$$\sum_{c \in V_c} d_c w_{\Pi_1\Pi_2}^c \leq Q_1 \quad (8)$$

$$\sum_{c \in V_c} d_c w_{\Pi_1\Pi_2}^c \leq Q_2 \quad (9)$$

$$\mu_{i\pi_1} + 1 \leq \mu_{j\pi_1} + M(1 - x_{ij\pi_1}), \quad \forall (i, j) \in A_2 \quad (10)$$

$$St_{j\pi_1} \geq St_{i\pi_1} + t_{ij} - M(1 - x_{ij\pi_1}), \quad \forall (i, j) \in \delta^+(\{p\} \cup V_s, A_{12}), \quad \forall p \in V_D \quad (11)$$

$$\sum_{s \in V_c \cup \{p\}} \sum_{(i, j) \in \delta^-(s, A_{34})} y_{ij\pi_2} \leq 1, \quad \forall p \in V_s \quad (12)$$

$$\sum_{(i, j) \in \delta^-(p, A_{34})} y_{ij\pi_2} - \sum_{(i, j) \in \delta^+(p, A_{34})} y_{ij\pi_2} = 0, \quad \forall p \in V_s \quad (13)$$

$$\sum_{(i, j) \in \delta^-(c, A_{34})} y_{ij\pi_2} - \sum_{(i, j) \in \delta^+(c, A_{34})} y_{ij\pi_2} = 0, \quad \forall c \in V_c \quad (14)$$

$$\sum_{s \in V_s} \sum_{(i, j) \in \delta^-(c, \delta^+(s, A_3) \cup A_4)} y_{ij\pi_2} = 1, \quad \forall c \in V_c \quad (15)$$

$$z_{i\pi_2} + 1 \leq z_{j\pi_2} + M(1 - y_{ij}), \quad \forall (i, j) \in A_4 \quad (16)$$

$$\sum_{c \in V_c} \sum_{(i, j) \in \delta^-(c, \delta^+(p, A_3) \cup A_4)} d_c y_{ij\pi_2} = \sum_{c \in V_c} d_c w_{\pi_1\pi_2}^c, \quad \forall p \in V_s \quad (17)$$

$$st_{c\pi_2} \geq t_{pc} - M(1 - w_{\pi_1\pi_2}^c), \quad \forall c \in V_c, \quad \forall p \in V_s \quad (18)$$

$$st_{j\pi_2} \geq st_{i\pi_2} + t_{ij} - M(1 - y_{ij\pi_2}), \quad \forall (i, j) \in \delta^-(p, A_3) \cup A_4, \quad \forall p \in V_s \quad (19)$$

$$E_i \leq st_{i\pi_2} \leq L_i, \quad \forall i \in V_c \quad (20)$$

$$x_{ij\pi_1} \in \{0,1\}, \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup \delta^+(p, A_1), \quad \forall p \in V_D \quad (21)$$

$$w_{\pi_1\pi_2}^c \in \{0,1\}, \quad \forall c \in V_c \quad (22)$$

$$y_{ij\pi_2} \in \{0,1\}, \quad \forall (i, j) \in A_4 \cup \delta^+(p, A_3), \quad \forall p \in V_s \quad (23)$$

$$u_{i\pi_1} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i \in V_s \quad (24)$$

$$z_{i\pi_2} \in \mathbb{Z}, \quad \forall i \in V_s \quad (25)$$

$$st_{i\pi_1} \geq 0, \quad \forall i \in V_s \cup \{p\}, \quad \forall p \in V_D \quad (26)$$

$$st_{i\pi_2} \geq 0, \quad \forall i \in V_c \cup \{p\}, \quad \forall p \in V_s \quad (27)$$

Las funciones objetivo son representadas en (1) y (2), mientras que las restricciones son descritas en la tabla 2.

Tabla 3

Restricciones de la formulación matemática

Restricciones	Descripción
3	Cuantifica la satisfacción del cliente producto del cumplimiento de pedidos.
4-5	Establece los lineamientos para el ruteo del primer escalón.
6-7	Transbordos del primer al segundo escalón.
8-9	Garantiza el cumplimiento de la capacidad de los vehículos.
10-11-12-13-14-15-16-19	Directrices del ruteo del segundo escalón
17-18	Sincronización entre los vehículos de los dos escalones para satisfacer la demanda
20	Establece los límites máximos en los que se puede atender a los clientes
21-22-23-24-25-26-27	Definición de variables

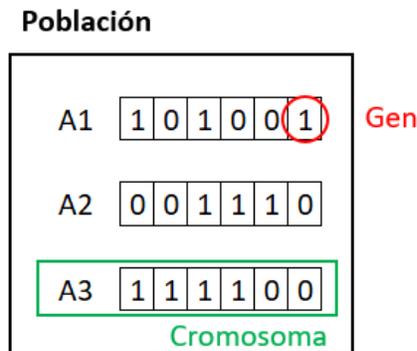
5. Descripción del algoritmo genético NSGA II

Se propone estudiar el planteamiento anteriormente descrito mediante el algoritmo genético NSGA-II. Este fue propuesto por Deb y sus estudiantes a principios de los años 2000 (Kalyanmoy, 2002) como una evolución al NSGA con el fin de incorporar elitismo y reducir la complejidad del procedimiento de ordenamiento rápido por no dominancia.

Este algoritmo se basa en los principios genéticos que ocurren en la reproducción de cualquier especie animal, donde se tienen en cuenta características propias de la población, individuos, cromosomas y genotipos (Ver Figura 14).

Figura 14

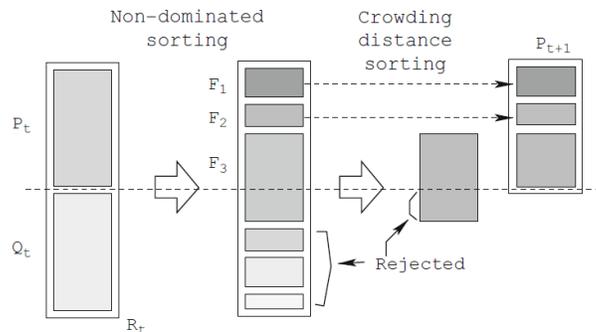
Configuración de la población



El algoritmo inicia generando una población (P) de tamaño (N), sobre la cual se realiza un proceso de cruzamiento o crossover a un número (C) de individuos con el fin de generar descendientes. Posterior a ello, un número (m) de individuos del conjunto (P + C) se somete al proceso de mutación. De esta forma, se tiene que la población generada por el cruzamiento y mutación debe ser un grupo de individuos (Q) de tamaño (N) que añadida a la población inicial (P) genera un conjunto (R_t) de tamaño (2N). (Ver figura 15)

Figura 15

Algoritmo NSGA-II



Seguidamente, mediante un ordenamiento no dominado se clasifica la población (R_t) en diferentes frentes de Pareto. Una vez el proceso de ordenamiento no dominado ha finalizado, la nueva población es formada a partir de las mejores configuraciones, para ello es importante considerar que se inicia la construcción a partir del mejor frente no dominado (F1), continúa con las soluciones del segundo frente (F2), tercero (F3) y así sucesivamente.

Como la población (R_t) tiene un tamaño ($2N$) y se debe seleccionar un conjunto (N) de individuos para conformar la siguiente generación del algoritmo genético, no todas las configuraciones de los frentes pertenecientes a la población (R_t) podrán ser acomodados en la nueva población. Aquellos frentes que no pueden ser acomodados desaparecen. (Florez, Bolaños, & Molina, 2008).

Con fines ilustrativos se propone el desarrollo de un ejemplo en el que se detalle cada una de las fases del algoritmo NSGAI, permitiendo así facilitar la apropiación del funcionamiento técnica planteada. Para ello es importante tener en cuenta los siguientes parámetros de entrada:

- Nodo 1 y 2 representan los centros de cumplimiento.
- Nodos del 3 al 5 centro de distribución.
- Nodos del 6 al 10, clientes.
- La siguiente matriz de costos en unidades monetarias (Ver figura 16):

Figura 16

Matriz de costos ejemplo

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	\$ -	\$ -	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ 6	\$ 7	\$ 8	\$ 9	\$ 10
2	\$ -	\$ -	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ 6	\$ 7	\$ 8	\$ 9	\$ 10
3	\$ 1	\$ 2	\$ -	\$ 4	\$ 5	\$ 6	\$ 7	\$ 8	\$ 9	\$ 10
4	\$ 1	\$ 2	\$ 3	\$ -	\$ 5	\$ 6	\$ 7	\$ 8	\$ 9	\$ 10
5	\$ 1	\$ 2	\$ 3	\$ 4	\$ -	\$ 6	\$ 7	\$ 8	\$ 9	\$ 10
6	\$ 1	\$ 2	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ -	\$ 7	\$ 8	\$ 9	\$ 10
7	\$ 1	\$ 2	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ 6	\$ -	\$ 8	\$ 9	\$ 10
8	\$ 1	\$ 2	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ 6	\$ 7	\$ -	\$ 9	\$ 10
9	\$ 1	\$ 2	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ 6	\$ 7	\$ 8	\$ -	\$ 10
10	\$ 1	\$ 2	\$ 3	\$ 4	\$ 5	\$ 6	\$ 7	\$ 8	\$ 9	\$ -

- La satisfacción de los clientes puede tomar valores de 0 a 1.

A continuación, se ilustra con mayor profundidad cada una de las fases descritas anteriormente.

5.1 Población inicial

Para inicializar la población es necesario realizar una construcción de las posibles rutas que permitan atender a todos los nodos cliente. Este paso previo se realiza utilizando una técnica de búsqueda exhaustiva, la cual consiste en recorrer cada uno de los nodos hasta encontrar todos los posibles arcos que los conecten entre sí. Posteriormente, la aleatoriedad seleccionará una de las rutas y esta se convierte entonces en un individuo o cromosoma de la población inicial. Si este individuo ya forma parte de la población inicial, se descarta y se construye uno nuevo. El proceso se repite hasta que la población sea de tamaño N. (Alvarado, Herazo, Ardila, & Donoso, 2005)

Inicialmente el algoritmo genera aleatoriamente una población inicial de 5 individuos que cumplen las restricciones básicas del ruteo del modelo. (Ver figura 17).

Figura 17

Generación población inicia ejemplo

Población inicial de tamaño N															Costo (\$)	Satisfacción			
Individuo 1	2	3	6	10	9	3	4	8	7	4	2					56	0.56		
Individuo 2	1	4	8	10	4	1	2	3	9	7	6	3	2			57	0.40		
Individuo 3	1	5	10	6	5	1	2	3	7	3	2	2	4	8	9	4	2	69	0.80
Individuo 4	1	4	9	6	7	4	1	2	3	10	3	5	8	5	2			67	0.80
Individuo 5	1	4	9	6	4	1	1	5	7	10	5	1	2	3	8	3	2	68	0.80

5.2 Cruzamiento o Crossover

Posterior a la creación de la población inicial, se establece la cantidad necesaria de cromosomas para la reproducción, seleccionando los cromosomas parentales que producirán vástagos. Esta reproducción consiste en un cruzamiento de la información de ambos padres a sus descendientes y se pueden dar de diferentes maneras: la forma más básica, conocida como cruce de un punto en el que se selecciona un punto de cruce aleatorio y las colas de ambos cromosomas se intercambian para producir una nueva descendencia (Ver figura 18). En cambio, si se toman dos puntos de cruce, se denomina cruce de múltiples puntos (Ver figura 19), como se muestra a continuación:

Figura 18

Cruzamiento de un punto

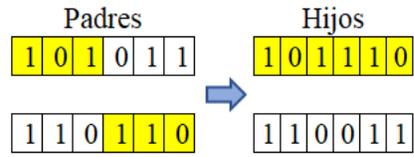
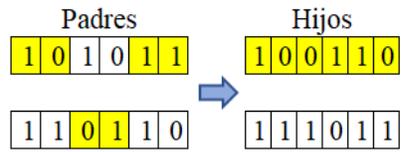


Figura 19

Cruzamiento de dos puntos



Para el ejemplo trabajado anteriormente se seleccionan dos cromosomas aleatorios de la población inicial, de ellos se eligen genes pertenecientes a los nodos clientes para entrecruzar la información y generar hijos. En este caso los cromosomas seleccionados fueron el individuo 1 y 4 (Ver figura 20):

Figura 20

Cruzamiento ejemplo

Padres															
Individuo 1	2	3	6	10	9	3	4	8	7	4	2				
Individuo 4	1	4	9	6	7	4	1	2	3	10	3	5	8	5	2

Hijos															
Hijo 1	2	3	6	6	9	3	4	8	8	4	2				
Hijo 2	1	4	9	9	7	4	1	2	3	10	3	5	7	5	2

Nótese que con el cruzamiento es posible que se violen las restricciones al reemplazar genes, por lo tanto, es necesario hacer uso de un proceso de reparación para poder atender a todos los clientes una única vez.

5.3 Reparación

Una vez termina el cruzamiento de cromosomas, el algoritmo debe garantizar que la descendencia generada cumpla con las restricciones básicas del modelo, este proceso se denomina reparación y consta de modificaciones sobre los genes de los nuevos individuos de tal forma que se atienda la totalidad de los clientes en una única ocasión.

En esta etapa el algoritmo hace una búsqueda en los individuos hijos, detectando aquellos clientes que fueron atendidos en más de una ocasión y reemplazando los duplicados por aquellos que fueron omitidos (Ver figura 21).

Continuando con el ejemplo desarrollado, se aprecia que para ambos descendientes se tienen pares de genes clientes duplicados. Por lo tanto, se reemplaza la primera posición repetida por aquel cliente no atendido.

Figura 21

Explicación proceso reparación



En resumen, se cuenta con una población total de 7 individuos, detallado así (Ver figura 22):

Figura 22

Población ejemplo Post-Reparación

Población inicial	Individuo 1	2	3	6	10	9	3	4	8	7	4	2					
	Individuo 2	1	4	8	10	4	1	2	3	9	7	6	3	2			
	Individuo 3	1	5	10	6	5	1	2	3	7	3	2	2	4	8	9	4
	Individuo 4	1	4	9	6	7	4	1	2	3	10	3	5	8	5	2	
	Individuo 5	1	4	9	6	4	1	1	5	7	10	5	1	2	3	8	3
Cruzamiento	Hijo 1	2	3	7	6	9	3	4	10	8	4	2					
	Hijo 2	1	4	6	9	8	4	1	2	3	10	3	5	7	5	2	

5.4 Mutación

La mutación es un operador de exploración que le permite al algoritmo examinar otras regiones, permitiendo así salir de óptimos locales, consiste en cambiar algunos valores de genes elegidos aleatoriamente de alguno de los individuos obtenidos después del cruzamiento (Velásquez & Villota, 2019).

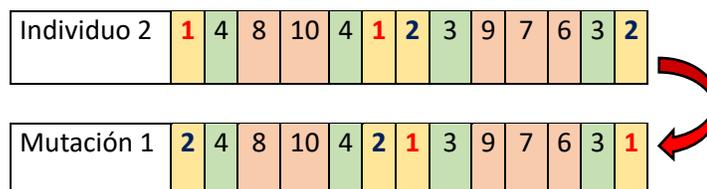
Este procedimiento inicia con la selección de una cantidad predeterminada (m) de individuos de la población total (P+C), sobre la cual se efectúa una copia o clonación de individuos para posteriormente realizar el proceso de mutación descrito anteriormente.

Siguiendo con el ejemplo propuesto, el algoritmo debe seleccionar 3 individuos aleatoriamente de los 7 totales sobre los cuales se realizará un proceso de clonación y mutación. Esta fase se intercambian dos centros de cumplimiento entre sí y de igual forma se opera en los centros de distribución y clientes. Es importante recalcar que no se pueden hacer intercambios entre nodos que no pertenecen a la misma especie. Ahora bien, con fines ilustrativos se detallará el procedimiento de un solo individuo de los tres seleccionados.

1. Centros de cumplimiento: Se seleccionan dos centros de cumplimiento que se intercambiarán entre sí en el resultante, en caso en el que se haga uso de un único centro de cumplimiento se omite este proceso (Ver figura 23).

Figura 23

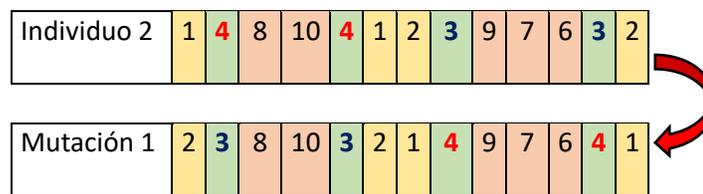
Mutación Centros de cumplimiento.



- Centros de distribución: Se seleccionan dos centros de distribución que se intercambiarán entre sí en el resultante, en caso en el que se haga uso de un único centro se omite este proceso (Ver figura 24).

Figura 24

Mutación Centros de distribución



- Cientes: Se seleccionan dos clientes que se intercambiarán entre sí en el resultante (Ver figura 25).

Figura 25

Mutación clientes



En términos generales se obtienen tres mutaciones detalladas así (Ver figura 26):

Figura 26

Resumen mutación ejemplo

Mutación 1	2	3	8	7	3	2	1	4	9	10	6	4	1		
Mutación 2	2	5	9	7	6	5	2	1	3	10	3	4	8	4	1
Mutación 3	2	4	7	8	9	4	3	10	6	3	2				

Finalizando el proceso de mutación, se obtiene una población total $R_t = P + Q$ de tamaño $2N$

(Ver figura 27)

Figura 27

Resumen ejemplo población total

														Costo	Satisfacción				
Población inicial	Individuo 1	2	3	6	10	9	3	4	8	7	4	2	56	0.56					
	Individuo 2	1	4	8	10	4	1	2	3	9	7	6	3	2	57	0.40			
	Individuo 3	1	5	10	6	5	1	2	3	7	3	2	2	4	8	9	4	69	0.80
	Individuo 4	1	4	9	6	7	4	1	2	3	10	3	5	8	5	2	67	0.80	
	Individuo 5	1	4	9	6	4	1	1	5	7	10	5	1	2	3	8	3	68	0.80
Cruzamiento	Hijo 1	2	3	7	6	9	3	4	10	8	4	2	56	0.42					
	Hijo 2	1	4	6	9	8	4	1	2	3	10	3	5	7	5	2	67	0.54	
Mutación	Mutación 1	2	3	8	7	3	2	1	4	9	10	6	4	1	57	0.63			
	Mutación 2	2	5	9	7	6	5	2	1	3	10	3	4	8	4	1	67	0.64	
	Mutación 3	2	4	7	8	9	4	3	10	6	3	2	56	0.27					

5.5 Selección

Finalmente, después de generar una población R_t de tamaño $2N$ se debe realizar un proceso de selección en la cual se promueva hacia el siguiente ciclo generacional de tamaño N las configuraciones que ocupen los mejores frentes, y las más diversas, a través de las distancias de apilamiento o crowding distance (Correa, Bolaños, & Molina, 2008).

Con la distancia de apilamiento se busca normalizar cada solución obtenida de las funciones objetivos con respecto a los mínimos y máximos valores encontrados en el frente Pareto, para este modelo en particular se usa el criterio Max-Min propuesto por (Ramírez & Domínguez, 2004):

$$\left(\frac{FO1_{max} - FO1_i}{FO1_{max} - FO1_{min}}, \frac{FO2_i - FO2_{min}}{FO2_{max} - FO2_{min}} \right) \quad (28)$$

- FO1-max: valor máximo obtenido de la función de costos para el frente de Pareto
- FO1-min: valor mínimo obtenido de la función de costos para el frente de Pareto
- FO2-max: valor máximo obtenido de la función de confiabilidad para el frente de Pareto
- FO2-min: valor mínimo obtenido de la función de confiabilidad para el frente de Pareto
- FO1-i: valor de la función de costos de la solución i del frente de Pareto
- FO2-i: valor de la función de confiabilidad de la solución i del frente de Pareto

El objetivo es encontrar la mejor solución posible del algoritmo, en este caso se selecciona el menor valor obtenido por individuo del par de soluciones conseguidas en la ecuación (28). Y posteriormente, el máximo valor de los mínimos encontrados (López, Hincapié, & Gallego, 2011).

Para concluir el ejemplo desarrollado se calcula la distancia de apilamiento o crowding distance (CD) haciendo uso de la metodología anteriormente descrita y se ordenan acorde al criterio de selección, obteniendo el siguiente resultado (Ver figura 28):

Figura 28

Proceso de selección ejemplo

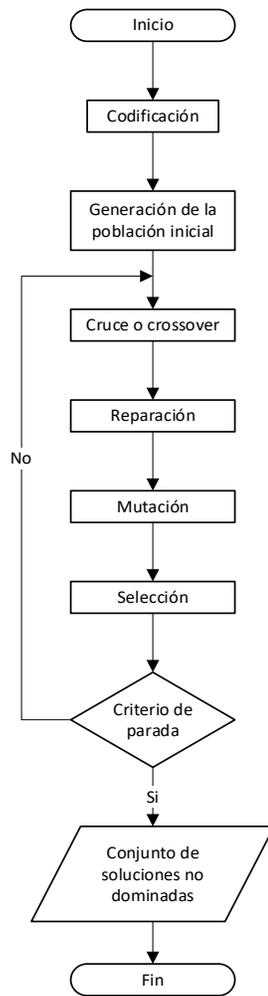
	Costo (\$)	Satisfacción	CD Costos	CD Satisfacción	VCDmin	
Mutación 1	2 3 8 7 3 2 1 4 9 10 6 4 1	57	0,63	0,92	0,68	0,68
Individuo 1	2 3 6 10 9 3 4 8 7 4 2	56	0,56	1,00	0,55	0,55
Hijo 1	2 3 7 6 9 3 4 10 8 4 2	56	0,42	1,00	0,28	0,28
Individuo 2	1 4 8 10 4 1 2 3 9 7 6 3 2	57	0,40	0,92	0,25	0,25
Individuo 4	1 4 9 6 7 4 1 2 3 10 3 5 8 5 2	67	0,80	0,15	1,00	0,15
Hijo 2	1 4 6 9 8 4 1 2 3 10 3 5 7 5 2	67	0,54	0,15	0,51	0,15
Mutación 2	2 5 9 7 6 5 2 1 3 10 3 4 8 4 1	67	0,64	0,15	0,70	0,15
Individuo 5	1 4 9 6 4 1 1 5 7 10 5 1 2 3 8 3	68	0,80	0,08	1,00	0,08
Individuo 3	1 5 10 6 5 1 2 3 7 3 2 2 4 8 9 4	69	0,80	0,00	1,00	0,00
Mutación 3	2 4 7 8 9 4 3 10 6 3 2	56	0,27	1,00	0,00	0,00

Los primeros cinco individuos resultantes del algoritmo genético continuaran a la siguiente generación replicando el proceso de cruce, reparación, mutación y selección. El investigador estipula cuantas generaciones o iteraciones se realizarán del modelo acorde a la rigurosidad y a los recursos computacionales con los que disponga.

6. Diseño del algoritmo genético NSGA II

Figura 29

Diagrama de flujo del modelo

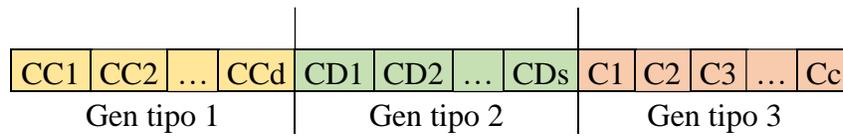


6.1 Codificación

Inicialmente se establece la estructura básica del cromosoma de acuerdo con las características del problema a investigar, por consiguiente, es crucial definir y clasificar los tipos de genes (Ver figura 30)

Figura 30

Clasificación de los nodos acorde al gen



6.1.1 Genes centro de cumplimiento

Desde los cuales inicia la consolidación y distribución de la red de logística de cumplimiento de pedidos electrónicos. Caracterizándose porque el ruteo inicia y finaliza en uno de ellos.

6.1.2 Genes centro de distribución

En ellos se recibe la mercancía proveniente de los centros de cumplimiento, y se transborda la misma a los vehículos urbanos para ser enviados a los clientes finales.

6.1.3 Genes clientes

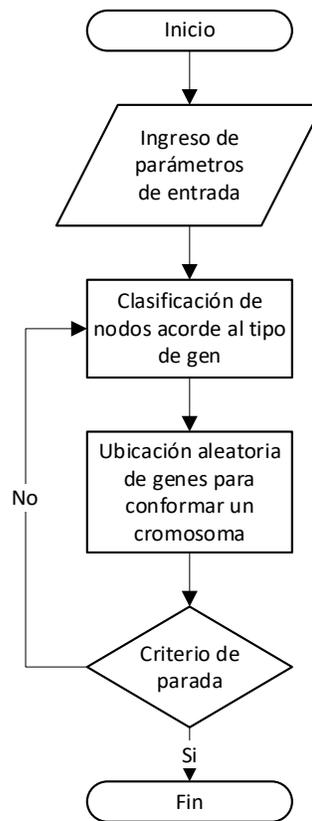
Los cuales poseen una demanda de mercancías que busca ser satisfecha, es a ellos a los que se les mide la satisfacción producto del cumplimiento en las entregas acorde a las ventanas de tiempo establecidas.

6.2 Generación de la población inicial

En esta sección se establece la forma como se genera la población inicial de tamaño N de acuerdo con las características logísticas del problema. Específicamente se centra en cumplir con las generalidades del ruteo, tales como: cada vehículo debe volver al centro de cumplimiento desde donde partió, cada cliente debe ser atendido una única vez por un único vehículo, se debe realizar un transbordo en el centro de distribución conectado los escalones del modelo. Cabe aclarar que esta generación inicial se generó de forma aleatoria (Ver figura 31).

Figura 31

Diagrama de flujo generación población inicial



6.2.1 Ingreso de parámetros de entrada

Para la creación de la población inicial es esencial determinar cuántos centros de cumplimiento (Nd), centros de distribución (Ns) y clientes (Nc) contará el sistema, con el fin de obtener la cantidad de vértices totales $N = Nd + Ns + Nc$.

6.2.2 Clasificación de los nodos acorde al tipo de gen

Previo a la generación aleatoria se debe catalogar en un vector específico cada uno de los nodos acorde a su naturaleza:

- Vector Centros de cumplimiento: [1, Nd]
- Vector Centros de distribución: [Nd + 1, Nd+ Ns]

- Vector clientes: $[N_d + N_s + 1, N_d + N_s + N_c]$

Consecutivamente, se establece un orden específico en el que se organizarán los genes dentro del cromosoma, detallado así:

6.2.2.1 Centros de cumplimiento. Se establecen los lineamientos que deben tener los centros de cumplimiento acorde al problema a abordar, estos deben ser el inicio y el fin del ruteo en el primer escalón, a partir de ellos se debe atender únicamente los centros de distribución.

6.2.2.2 Centros de distribución. Estos son el punto intermedio entre los centros de cumplimiento y los clientes, en ellos se realiza el transbordo entre los camiones y los vehículos urbanos, de igual forma, son el inicio y el fin del ruteo del segundo escalón. Los centros de distribución pueden conectarse a través de arcos con todos los nodos del sistema incluyendo transbordos entre sí.

6.2.2.3 Clientes. Son el eslabón final de la red de distribución, deben ser atendidos una única vez por un vehículo del segundo escalón, es decir que los pedidos deben ser indivisibles. Se establece como lineamiento del modelo que se deben satisfacer la demanda de todos los clientes.

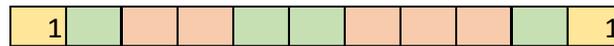
6.2.3 Ubicación aleatoria de genes para conformar un cromosoma.

Una vez establecidos las reglas básicas para la creación de la población inicial, se procede a posicionar aleatoriamente cada uno de los nodos en la red de ruteo.

6.2.3.1 Centros de cumplimiento. Se seleccionan al azar nodos del vector centro de cumplimiento y se ubican en el cromosoma vacío (Ver figura 32).

Figura 32

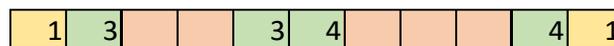
Ubicación centros de cumplimiento



6.2.3.2 Centros de distribución. Se establecen aleatoriamente los centros de distribución asociados a cada uno de los centros de cumplimiento (Ver figura 33). Se puede dar el caso de que un centro de distribución no sea seleccionado para realizar la ruta.

Figura 33

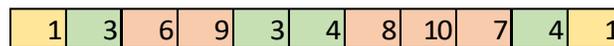
Ubicación centros de distribución



6.2.3.3 Clientes. Se implantan aleatoriamente los genes clientes para ser asociados a los genes centros de distribución (Ver figura 34).

Figura 34

Ubicación clientes

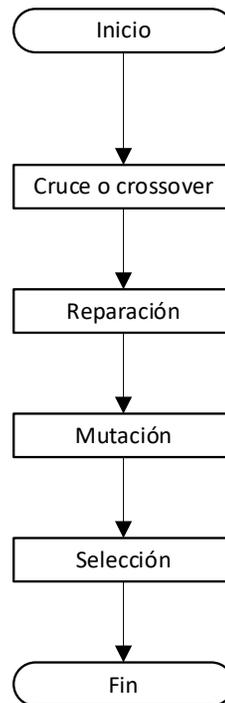


6.2.3.4 Criterio de parada. La generación de la población inicial se da hasta que se cumpla el criterio de parada, este está vinculado con el tamaño p de la población y se determina con los parámetros de entrada del modelo. Una vez, la población inicial sea de tamaño (P) , se procede a finalizar el proceso.

6.3 Algoritmo genético (NSGA-II)

Figura 35

Diagrama de flujo NSGA-II



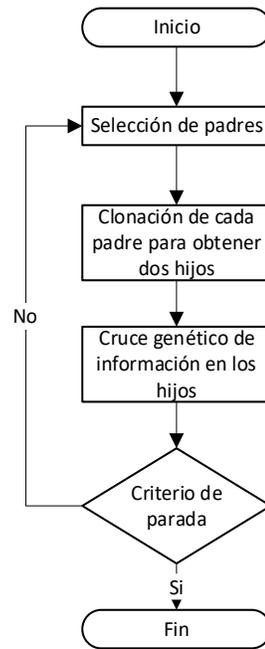
La figura 35 evidencia el diagrama de flujo del NSGA-II, a continuación, se detalla cada uno de los procesos internos que ocurren dentro del algoritmo.

6.3.1 Cruce o Crossover

La figura 36 representa el diagrama de flujo del proceso de cruce, se seleccionan pares de padres, los cuales generarán pares de hijos con un cruce de información genética en sus genes. Este proceso se realiza hasta que se cumpla el criterio de parada, donde la población de descendientes sea igual a la cantidad de cromosomas padres necesarios para el cruce.

Figura 36

Diagrama de flujo de cruce

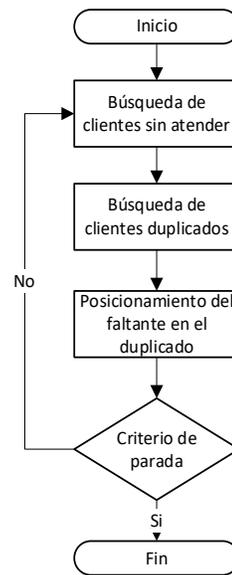


6.3.2 Reparación

El proceso de reparación se da en los cromosomas descendientes de la operación de cruce, partiendo de una búsqueda e identificación de aquellos clientes que quedaron sin ser atendidos y aquellos que fueron doblemente satisfechos. Posteriormente se posiciona el cliente faltante en la primera posición en la que se encuentra uno de los clientes duplicados, realizando este procedimiento hasta que se reparan todos los descendientes (Ver figura 37).

Figura 37

Diagrama de flujo Reparación

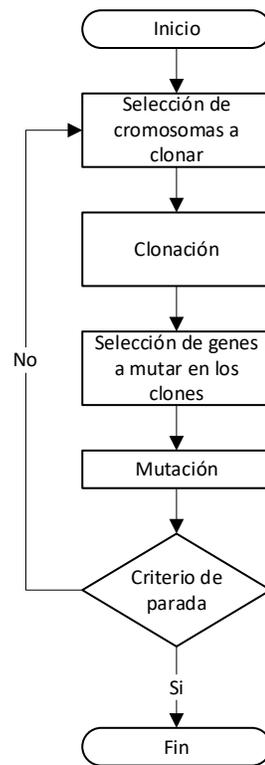


6.3.3 Mutación

En la figura 38 se muestra el diagrama de flujo del proceso de mutación, inicializando con una selección de los cromosomas de la totalidad de la población (Población inicial + Hijos), a estos individuos seleccionados se les realiza el proceso de clonación y a sus resultantes se les realiza la mutación acorde a lo explicado en la sección 5.4. Este proceso se efectúa hasta que los cromosomas mutados sean igual al parámetro (m) de cromosomas necesarios para la mutación.

Figura 38

Diagrama de flujo Mutación

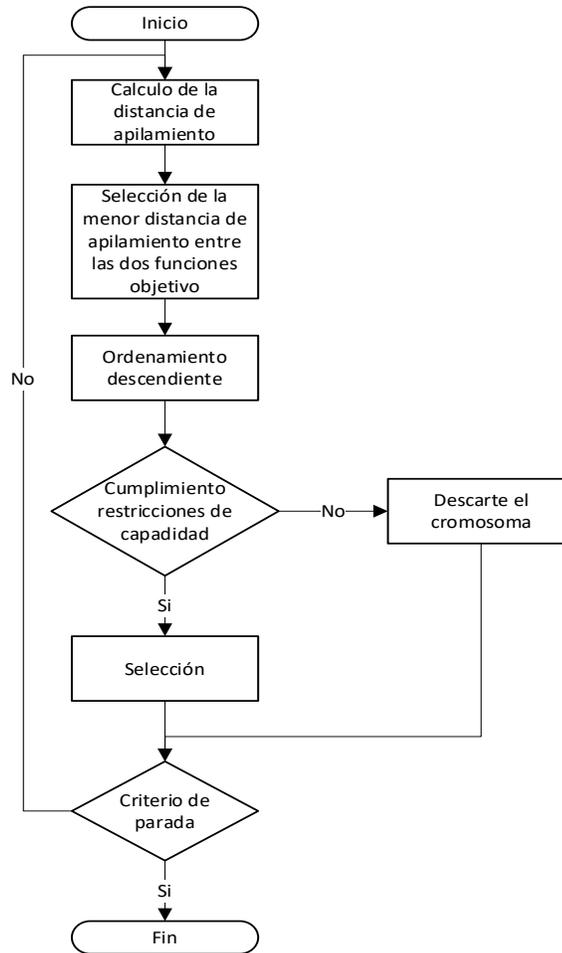


6.3.4 Selección

En la figura 39 se muestra el diagrama de flujo del proceso de selección, este inicia con la población de tamaño (2N) a la cual se le medirá la distancia de apilamiento que es la encargada de determinar la no dominancia de los individuos que la componen, acorde a lo escrito en la sección 5.5. Una vez se obtenga el vector ordenado descendientemente con las menores distancia de apilamiento de ambas funciones objetivo se da inicio al primer proceso de selección, el cual descarta aquellos individuos que no cumplen con la restricción de capacidad del sistema, los individuos que si cumplen la restricción continúan al segundo proceso de selección, el cual elige a los primeros (N) individuos del vector mencionado anteriormente.

Figura 39

Diagrama de flujo proceso de selección



7. Experimentación

Una vez diseñado el algoritmo genético NSGA-II para el 2E-VRPSTW, se bosquejan las instancias y parámetros que permitan dar cabida al proceso de experimentación. Por lo tanto, se plantea un diseño de experimentos en función de los parámetros del algoritmo genético con el fin de establecer la configuración más eficiente considerando el desempeño del mismo. El proceso de experimentación y análisis se da de forma independiente en cada una de las instancias, replicando

10 veces cada uno de los posibles escenarios, lo que permite analizar las variables: Costo del ruteo, cumplimiento de pedidos y el tiempo computacional. Finalmente, se consolidan las tres instancias para hacer un análisis global del diseño experimental. A continuación, se detallan los factores a analizar.

Tabla 4

Factores del diseño experimental.

Factores	Nomenclatura
Generaciones del algoritmo genético NSGA-II	Gen
Población de clientes	PobC
Población N del algoritmo genético NSGA-II	PobN

Seguidamente, se describen las variables a estudiar.

Tabla 5

Variables del diseño experimental

Variables	Nomenclatura
Función Objetivo 1: Minimización del costo	FO1
Función Objetivo 2: Maximización del cumplimiento de pedido	FO2
Tiempo computacional	TC

Este diseño experimental se clasifica como multifactorial y generalmente busca determinar los factores que tienen una incidencia significativa sobre los resultados obtenidos (Navidi, 2006). Este tipo de experimentos se denotan de la forma 2^p , donde 2 representa los niveles de los factores y p

representa el número de factores a tener en cuenta en la investigación. Por lo que en este caso su notación es 2^3 .

7.1 Instancias

Se definen 3 instancias para la evaluación del modelo matemático y del algoritmo construido. A continuación, se describen aquellos parámetros que son transversales a todas las instancias.

Tabla 6

Parámetros de capacidad

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Capacidad vehículo primer escalón	Q1	50 m ³
Capacidad vehículo segundo escalón	Q2	10 m ³

Tabla 7

Parámetros de demanda

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Demanda de los clientes	d_c	Aleatorio en el intervalo [0.1, 0.6]

Tabla 8

Parámetros de cumplimiento de pedidos

Parámetro	Nomenclatura	Valor unitario
Satisfacción máxima producto del cumplimiento	<i>Satmax</i>	5
Satisfacción mínima producto del cumplimiento	<i>Satmin</i>	1
Velocidad de los vehículos	V	0.2 min/km

Tabla 9

Parámetros de costo

Parámetro	Nomenclatura	Valor unitario
Costo de ir de un vértice a otro	C_{ij}	Aleatorio en el intervalo [1, 99]

Figura 40

Ventanas de tiempo para los clientes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ei	1	4	6	15	28	35	50	67	73	81	86	90	100	105	120	128	135	150	162	175
ei	10	14	16	25	38	45	60	77	83	91	96	100	110	115	130	138	145	160	172	185
li	20	40	60	80	100	120	145	160	166	175	186	200	210	220	230	238	240	255	260	280
Li	30	50	70	90	110	130	155	170	176	185	196	210	220	230	240	248	250	265	270	290

Tabla 10

Diseño de las instancias a evaluar

Instancia	Centros de cumplimiento	Centros de distribución	Nomenclatura
1	1	2	I1
2	2	3	I2
3	3	4	I3

7.2 Escenarios

Teniendo en cuenta que se tiene un diseño experimental 2^3 , se proponen 8 diferentes escenarios en cada instancia donde se combinan los dos niveles (alto y bajo) de cada uno de los factores. Estos niveles se especifican en la tabla 9.

Tabla 11

Niveles de los factores

Factor	Nivel bajo	Nivel alto
Generaciones del algoritmo genético NSGA-II	20	100
Población de clientes	10	20
Población N del algoritmo genético NSGA-II	30	60

Seguidamente, se detallan la estructura de cada uno de los escenarios acorde a la variación de los niveles factoriales.

Tabla 12

Escenarios planteados

Escenario	Pobc	Gen	PobN	Nomenclatura
1	Baja	Baja	Baja	E1
2	Alta	Baja	Baja	E2
3	Baja	Alta	Baja	E3
4	Alta	Alta	Baja	E4
5	Baja	Baja	Alta	E5
6	Alta	Baja	Alta	E6
7	Baja	Alta	Alta	E7
8	Alta	Alta	Alta	E8

8. Resultados y análisis estadístico

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos del diseño experimental anteriormente descrito. Mediante el análisis de cada una de las instancias se determinan aquellos factores que son significativos para la minimización del costo del ruteo, la maximización del cumplimiento de pedidos y el esfuerzo computacional. Por lo tanto, se propone la mejor configuración de los factores garantizando la eficiencia del algoritmo genético y describiendo el comportamiento del mismo de acuerdo a la robustez del problema planteado.

El análisis estadístico se realiza mediante la herramienta MINITAB 19 (Ver apéndice B) y el algoritmo genético NSGA-II propuesto en MATLAB R2021a (Ver apéndice A).

8.1 Instancia 1 (I1)

Los resultados obtenidos de la primera instancia se muestran a continuación.

Tabla 13

Resultados de la primera instancia

Escenario	Variables	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
E1	FO1 (\$)	377	373	374	341	393	345	376	374	342	367
	FO2	33,7	33,4	34,0	34,2	33,4	32,9	32,8	31,7	32,5	31,2
	TC (s)	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,0	2,1	2,1	2,0	2,0
E2	FO1 (\$)	771	753	687	690	694	676	717	655	708	626
	FO2	49,7	48,0	48,0	46,4	52,0	48,0	48,5	52,1	48,0	46,0
	TC (s)	1,7	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,9	1,8	1,9	1,8

Continuación Tabla 13.

Resultados de la primera instancia

Escenario	Variables	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
E3	FO1 (\$)	351	363	365	358	354	339	304	368	338	342
	FO2	35,7	33,1	34,5	35,2	34,0	37,4	32,6	37,7	32,5	34,0
	TC (s)	5,4	5,0	5,1	5,2	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,0
E4	FO1 (\$)	588	662	645	600	656	724	601	580	681	694
	FO2	50,6	50,8	53,9	49,3	50,2	51,5	48,1	50,6	49,0	49,7
	TC (s)	4,1	4,4	4,2	4,4	4,3	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4
E5	FO1 (\$)	375	388	328	334	353	319	383	389	362	365
	FO2	34,0	34,1	32,5	34,0	30,7	32,9	33,1	32,6	32,8	33,7
	TC (s)	2,3	2,3	2,4	2,4	2,3	2,5	2,3	2,4	2,3	2,1
E6	FO1 (\$)	690	687	568	681	729	771	650	667	679	677
	FO2	50,5	48,0	48,0	53,0	47,5	53,0	53,2	54,9	51,3	50,6
	TC (s)	2,0	1,9	1,9	2,1	2,1	1,9	2,5	2,5	2,8	2,6
E7	FO1 (\$)	329	357	338	358	308	344	336	299	334	368
	FO2	32,5	34,4	32,4	33,0	34,0	33,7	33,7	36,1	34,0	35,2
	TC (s)	6,7	6,3	5,9	5,8	5,9	5,9	5,8	5,9	6,1	6,5
E8	FO1 (\$)	574	691	643	528	637	658	682	670	641	642
	FO2	47,9	52,0	53,5	51,9	20,2	60,0	51,9	53,6	50,3	51,4
	TC (s)	7,5	7,7	7,8	5,7	5,4	5,4	6,0	5,6	5,4	5,5

Para proceder con el análisis estadístico se configura un análisis de varianza para cada una de las variables respuesta.

8.1.1 Función Minimización de costos

A continuación, se muestra la ANOVA de la variable respuesta: costo de ruteo. Con un nivel de confianza del 95%, indica que la población de clientes (PobC) y el número de generaciones del algoritmo genético (Gen) tienen un efecto significativo sobre el costo del ruteo.

Tabla 14

ANOVA en función de la variable costo para la instancia 1

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	1941268	1941268	1381,70	0,000
GEN	1	23943	23943	17,04	0,000
POBN	1	2205	2205	1,57	0,214
POBC*GEN	1	4118	4118	2,93	0,091
POBC*POBN	1	54	54	0,04	0,844
GEN*POBN	1	58	58	0,04	0,840
POBC*GEN*POBN	1	312	312	0,22	0,639
Error	72	101159	1405		
Total	79	2073118			

Figura 41

Efectos principales para FO1

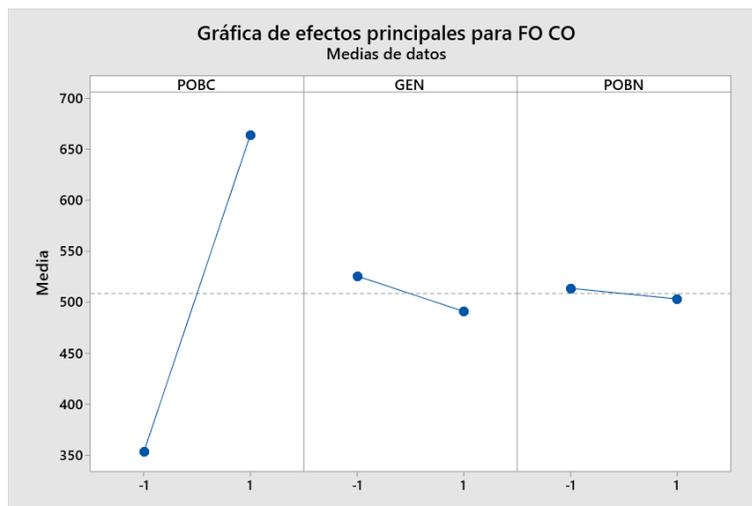
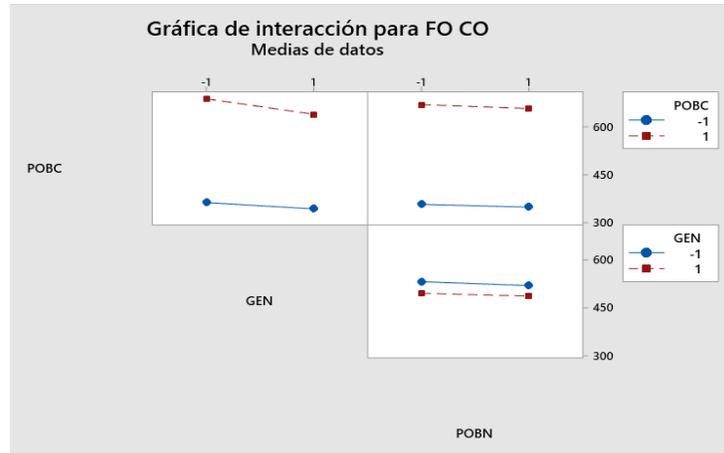


Figura 42

Interacciones de factores FO1-II



La grafica de efectos principales (Ver grafica 41) muestra la configuración optima, la cual para esta instancia es una población de clientes baja y generaciones altas. Mientras que la gráfica de interacciones de los efectos principales evidencia la insignificancia de las interacciones de los factores (ver figura 42).

8.1.2 Función Maximización cumplimiento de pedidos

Posteriormente, se muestra la ANOVA de la variable respuesta: cumplimiento de pedidos. Con un nivel de confianza del 95%, indica que la población de clientes (PobC) es el único factor que tiene un efecto significativo sobre el cumplimiento de pedidos.

Tabla 15

ANOVA en función del cumplimiento de pedidos para la instancia 1

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	5240,92	5240,92	312,90	0,000
GEN	1	7,93	7,93	0,47	0,494
POBN	1	0,34	0,34	0,02	0,886
POBC*GEN	1	8,23	8,23	0,49	0,486
POBC*POBN	1	4,54	4,54	0,27	0,604
GEN*POBN	1	23,07	23,07	1,38	0,244
POBC*GEN*POBN	1	8,58	8,58	0,51	0,477
Error	72	1205,96	16,75		
Total	79	6499,57			

Figura 43

Efectos principales para FO2-II

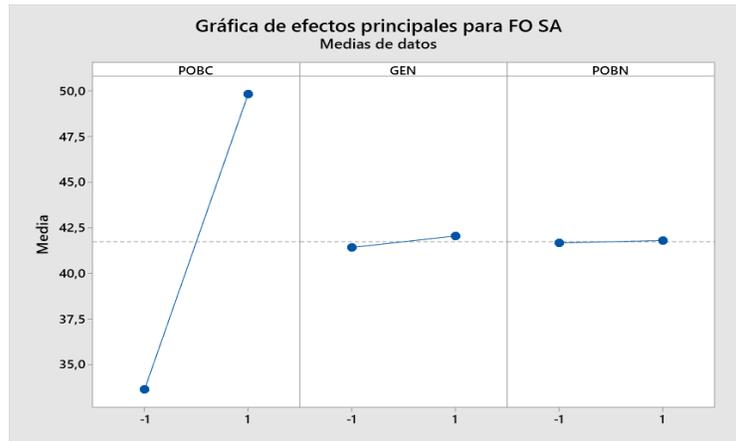
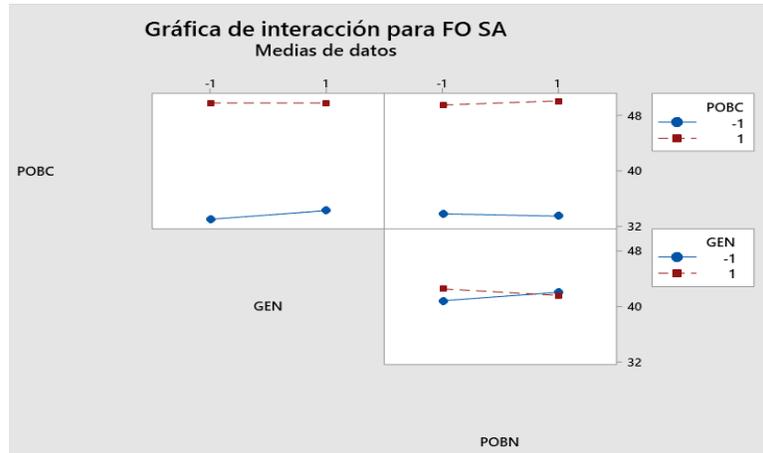


Figura 44

Interacciones de factores para F02-II



De una población de clientes alta se obtiene los resultados más significativos del cumplimiento de pedidos (Ver figura 43). En cuanto a la interacción de los efectos principales se evidencia una interacción entre los factores PobN y Gen, sin embargo carecen de significancia acorde al análisis de varianza. (Ver figura 44).

8.1.3 Tiempo computacional.

Finalmente, se evidencia el análisis de varianza del tiempo computacional. Con un nivel de confianza del 95%, indica que todos los factores y sus interacciones son significativos a excepción de la interacción PobC y Gen.

Tabla 16

ANOVA en función del tiempo computacional para la instancia 1

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	1,484	1,484	8,88	0,004
GEN	1	223,448	223,448	1336,89	0,000
POBN	1	15,341	15,341	91,78	0,000
POBC*GEN	1	0,232	0,232	1,39	0,243
POBC*POBN	1	1,610	1,610	9,63	0,003
GEN*POBN	1	5,790	5,790	34,64	0,000
POBC*GEN*POBN	1	0,747	0,747	4,47	0,038
Error	72	12,034	0,167		
Total	79	260,685			

Figura 45

Efectos principales TC-II

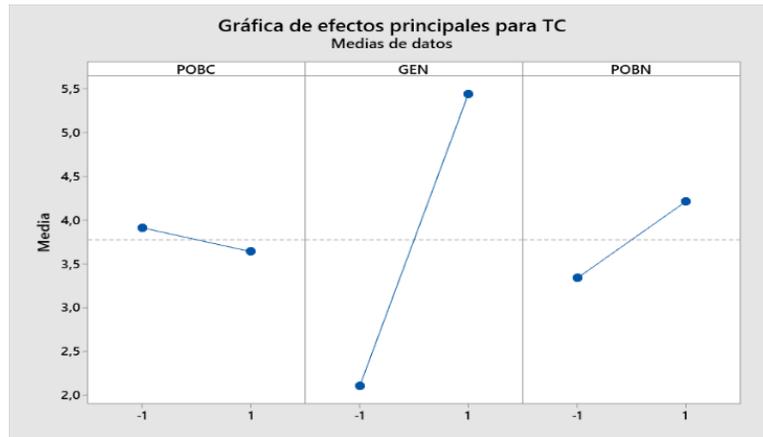
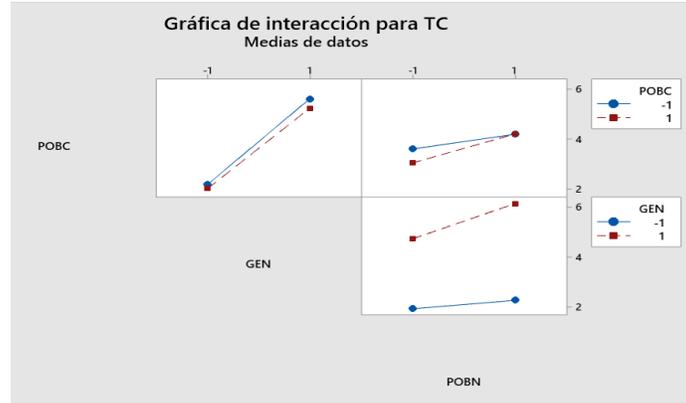


Figura 46

Interacción de factores para TC-II



La configuración óptima que para esta instancia es una población de clientes alta, generaciones bajas y población del algoritmo genético baja (Ver figura 45). Mientras que la gráfica de interacciones de los efectos principales evidencia una fuerza de interacción alta entre los factores PoblN-Gen, PoblN-PoblC y son significativas acorde al análisis de varianza (Ver figura 46).

8.2 Instancia 2 (I2)

A continuación, se plasman los resultados obtenidos para la segunda instancia.

Tabla 17

Los resultados de la segunda instancia

Escenario	Variables	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
E1	FO1 (\$)	403	376	396	492	389	435	454	341	404	423
	FO2	31,8	33,1	34,0	34,1	34,7	31,4	32,1	32,3	34,0	32,7
	TC (s)	2,3	2,5	2,4	2,5	2,4	2,3	2,5	2,4	2,5	2,4

Continuación Tabla 17

Los resultados de la segunda instancia

Escenario	Variables	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
E2	FO1 (\$)	769	813	739	710	740	757	740	837	785	785
	FO2	56,5	51,9	57,5	50,6	54,0	50,7	51,7	56,0	49,3	51,9
	TC (s)	1,3	2,6	1,7	2,6	1,8	2,9	1,8	1,8	1,8	2,6
E3	FO1 (\$)	369	384	385	427	391	334	394	382	412	425
	FO2	39,0	34,8	33,4	37,2	37,4	34,0	34,0	34,0	35,8	33,8
	TC (s)	6,6	6,6	4,8	5,2	5,1	5,3	5,1	5,5	5,4	5,1
E4	FO1 (\$)	669	719	722	678	751	693	782	725	706	739
	FO2	56,0	57,5	54,8	56,4	59,6	55,4	52,3	56,5	59,2	56,2
	TC (s)	11,2	10,7	7,2	5,9	5,5	6,7	5,6	5,4	5,5	5,6
E5	FO1 (\$)	419	313	499	491	404	387	467	445	380	455
	FO2	36,4	33,2	33,6	40,8	33,0	35,4	34,7	34,1	36,1	32,6
	TC (s)	2,0	2,3	2,2	2,2	2,1	2,0	2,1	2,2	2,1	2,2
E6	FO1 (\$)	699	780	678	678	717	749	775	601	658	755
	FO2	51,0	53,5	52,0	55,8	52,0	49,9	57,3	51,2	55,1	50,7
	TC (s)	2,7	2,4	1,9	2,0	2,6	1,9	2,0	2,9	2,9	2,0
E7	FO1 (\$)	434	424	451	422	417	361	390	371	394	414
	FO2	34,0	33,2	39,9	35,1	33,6	37,2	34,8	34,0	34,0	35,6
	TC (s)	4,8	8,1	6,0	8,2	8,4	6,3	7,6	7,7	6,1	7,7
E8	FO1 (\$)	715	788	745	684	696	749	617	749	716	655
	FO2	55,4	59,8	55,7	54,8	58,4	55,0	60,4	58,9	54,0	54,0
	TC (s)	5,9	5,5	5,5	6,9	6,7	6,8	5,5	6,6	5,7	5,5

Se realiza un análisis de varianza para cada una de las variables respuesta, detallado así:

8.2.1 Función minimización de costos.

Con un nivel de confianza del 95%, se muestra la ANOVA de la variable respuesta: costo de ruteo. Indicando que la población de clientes (PobC), el número de generaciones del algoritmo genético (Gen) y la interacción de PobC- PobN tienen un efecto significativo sobre el costo del ruteo.

Tabla 18

ANOVA en función del costo para la instancia 2

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	2018984	2018984	1072,35	0,000
GEN	1	9224	9224	4,90	0,030
POBN	1	1386	1386	0,74	0,394
POBC*GEN	1	70	70	0,04	0,847
POBC*POBN	1	11932	11932	6,34	0,014
GEN*POBN	1	3686	3686	1,96	0,166
POBC*GEN*POBN	1	2965	2965	1,57	0,214
Error	72	135559	1883		
Total	79	2183804			

Nota: Tomado de Minitab 19.

Figura 47

Efectos principales FO1-I2

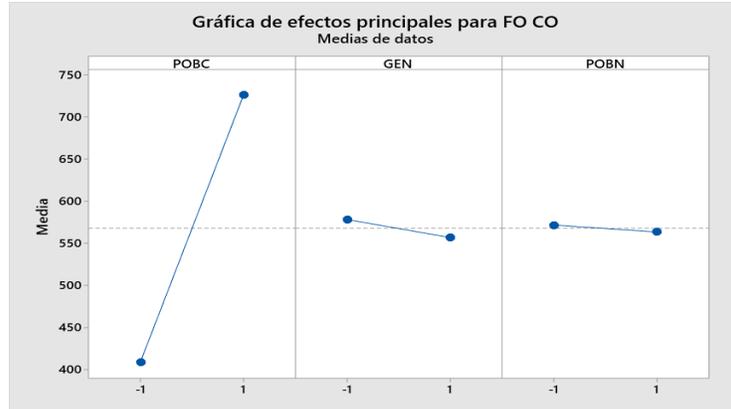
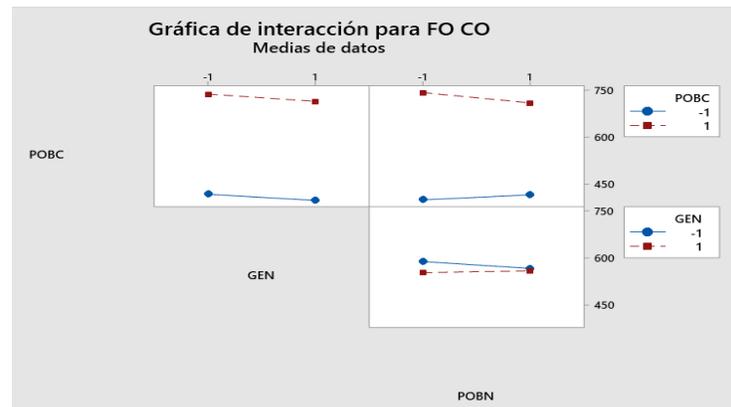


Figura 48

Interacción de factores FO1 I2



Una población de clientes baja y generaciones altas determinan la mejor configuración para obtener los mejores costos del modelo (Ver figura 47). En cuanto a las interacciones de los efectos principales (Ver figura 48) evidencia lo siguiente:

Tabla 19

Interacciones factores principales

Factores	Interacción	Significancia
PobC-Gen	No	No
Gen-PobN	Si	No
PobN-Pobc	Si	Si

Por lo tanto, la única interacción que tiene significancia en esta instancia es PobN-PobC.

8.2.2 Función maximización cumplimiento de pedidos

Con un nivel de confianza del 95% se evidencia en el siguiente análisis de varianza que los factores Población de los clientes y cantidad de generaciones, al igual que la interacción de Pobc-Gen son significativos para la variable respuesta en estudio.

Tabla 20

ANOVA en función del cumplimiento de pedidos para la instancia 2

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	8083,52	8083,52	1632,08	0,000
GEN	1	115,99	115,99	23,42	0,000
POBN	1	4,45	4,45	0,90	0,347
POBC*GEN	1	27,61	27,61	5,57	0,021
POBC*POBN	1	3,52	3,52	0,71	0,402
GEN*POBN	1	3,91	3,91	0,79	0,377
POBC*GEN*POBN	1	8,56	8,56	1,73	0,193
Error	72	356,61	4,95		
Total	79	8604,17			

Figura 49

Efectos principales para FO2-I2

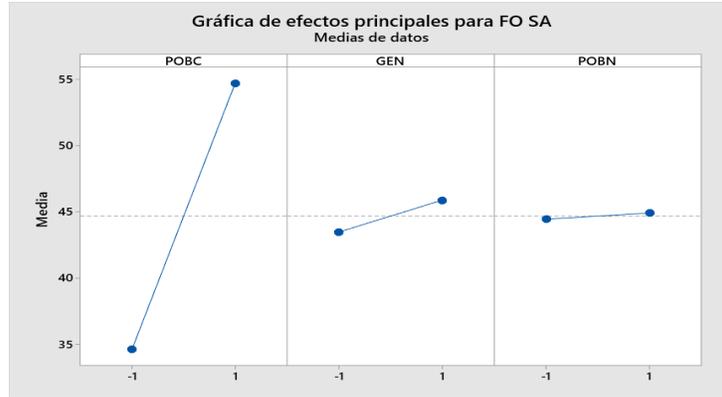
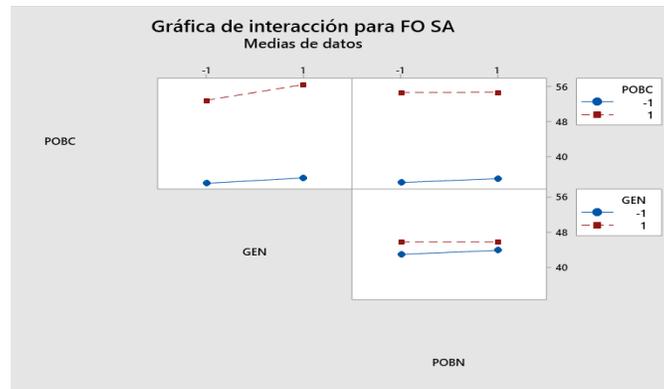


Figura 50

Interacción de factores para FO2-I2



Para esta instancia acorde a la Figura 49 se determina la mejor configuración como: Población de clientes y generaciones altas. Mientras que la interacción entre PobC-Gen es significativa para los resultados obtenidos en la variable respuesta: Cumplimiento de pedidos (Ver figura 50).

8.2.3 Tiempo computacional

Se evidencia la ANOVA de la variable respuesta: tiempo computacional. Con un nivel de confianza del 95%, indica que las generaciones y las interacciones de PobC-PobN y PobC-PobN-Gen son significativas para el esfuerzo computacional.

Tabla 21

ANOVA en función del tiempo computacional para la instancia 2

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	0,123	0,123	0,13	0,718
GEN	1	343,348	343,348	364,86	0,000
POBN	1	0,639	0,639	0,68	0,413
POBC*GEN	1	0,332	0,332	0,35	0,554
POBC*POBN	1	4,995	4,995	5,31	0,024
GEN*POBN	1	0,778	0,778	0,83	0,366
POBC*GEN*POBN	1	10,930	10,930	11,61	0,001
Error	72	67,754	0,941		
Total	79	428,900			

Figura 51

Efectos principales TC-I2

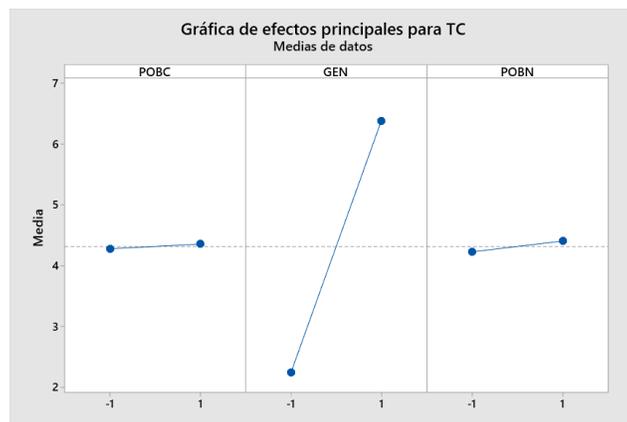
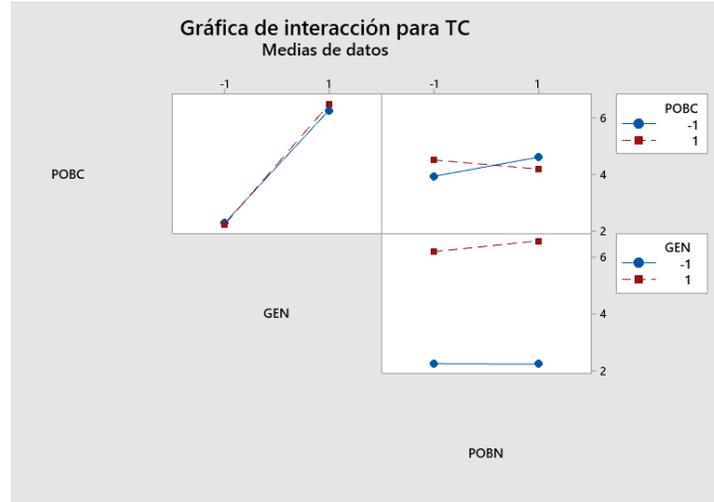


Figura 52

Interacción de factores TC-I2



Para esta instancia acorde a la Figura 51 se determina una cantidad de generaciones del algoritmo genético baja para garantizar el menor esfuerzo computacional. Mientras que la interacción de PobC-PobN tienen una significancia para el modelo.

8.3 Instancia 3 (I3)

Los resultados obtenidos de la tercera instancia se muestran a continuación.

Tabla 22

Los resultados de la tercera instancia

Escenario	Variables	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
E1	FO1 (\$)	484	460	605	599	477	577	554	531	535	581
	FO2	37,3	38,7	42,0	42,0	34,0	41,7	36,3	36,6	37,5	43,6
	TC (s)	3,0	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6

Continuación Tabla 22.

Los resultados de la tercera instancia

Escenario	Variables	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
E2	FO1 (\$)	850	954	901	782	683	931	878	789	964	1.031
	FO2	54,3	67,4	54,1	53,2	58,9	53,1	60,0	55,6	64,0	65,2
	TC (s)	3,1	2,7	2,8	2,8	2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
E3	FO1 (\$)	593	515	473	526	433	506	494	439	530	392
	FO2	50,0	42,0	38,0	38,0	43,2	41,0	40,1	42,0	36,4	41,0
	TC (s)	7,5	6,9	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
E4	FO1 (\$)	920	902	852	904	825	874	928	685	871	903
	FO2	60,0	59,0	57,1	58,2	61,6	56,3	61,2	61,7	64,0	62,2
	TC (s)	8,0	7,6	7,5	7,5	7,7	7,6	7,5	7,5	7,6	7,6
E5	FO1 (\$)	456	553	470	504	470	442	534	585	431	528
	FO2	39,7	36,6	41,1	43,7	37,0	37,8	39,4	38,7	38,2	35,9
	TC (s)	3,4	2,9	3,0	3,0	3,0	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1
E6	FO1 (\$)	919	902	815	817	913	877	880	912	942	914
	FO2	58,8	59,6	55,8	54,2	59,1	60,7	57,6	56,0	62,4	66,3
	TC (s)	3,6	3,3	3,2	3,2	3,3	3,2	3,3	3,3	3,2	3,2
E7	FO1 (\$)	408	401	419	443	525	486	530	464	480	511
	FO2	42,9	46,0	43,0	41,1	43,0	42,0	42,7	40,8	42,0	45,0
	TC (s)	9,2	9,0	9,2	9,2	9,1	9,4	9,2	9,4	9,2	9,0
E8	FO1 (\$)	872	848	859	864	868	809	910	826	805	980
	FO2	65,7	70,2	61,3	62,3	63,0	65,3	68,0	63,5	58,4	64,0
	TC (s)	10,5	10,3	9,9	10,0	10,5	10,4	9,9	9,8	10,3	9,8

8.3.1 Función minimización de costos.

A continuación, se muestra la ANOVA de la variable respuesta: costo de ruteo. Con un nivel de confianza del 95%, indica que la población de clientes (PobC), el número de generaciones del algoritmo genético (Gen) y la interacción de PobC- PobN tienen un efecto significativo sobre el costo del ruteo.

Tabla 23

ANOVA en función del costo para la instancia 3

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	2018984	2018984	1072,35	0,000
GEN	1	9224	9224	4,90	0,030
POBN	1	1386	1386	0,74	0,394
POBC*GEN	1	70	70	0,04	0,847
POBC*POBN	1	11932	11932	6,34	0,014
GEN*POBN	1	3686	3686	1,96	0,166
POBC*GEN*POBN	1	2965	2965	1,57	0,214
Error	72	135559	1883		
Total	79	2183804			

Figura 53

Efectos principales FO1-I3

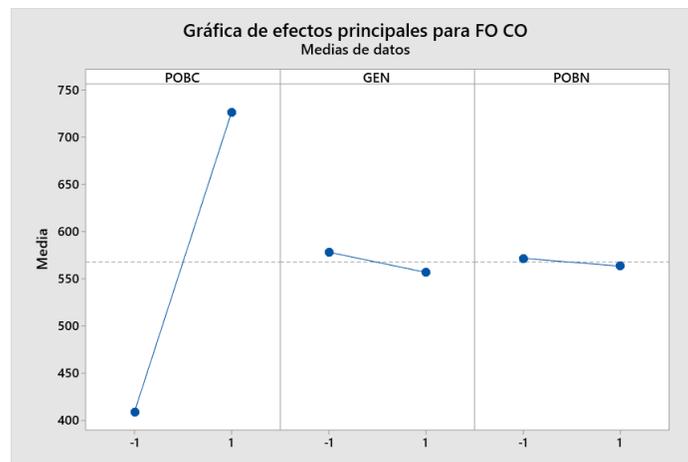
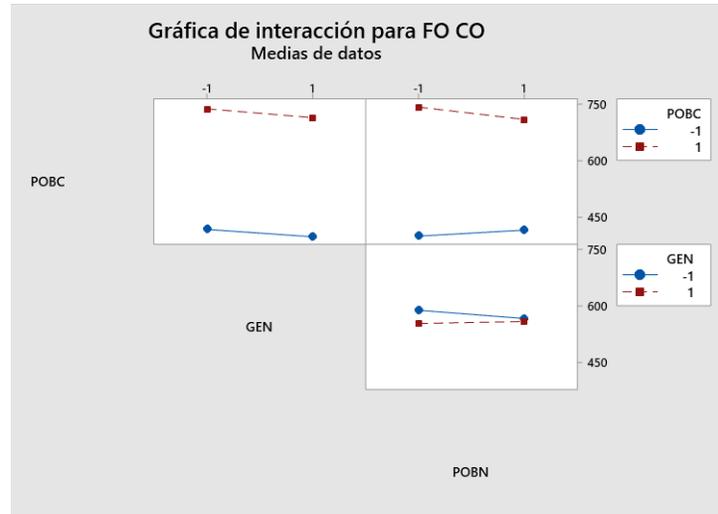


Figura 54

Interacción de factores FO1-I2



Con el fin de establecer la mejor configuración del modelo, se propone para esta instancia una cantidad de clientes bajos y altas generaciones (Ver figura 53), mientras que en la gráfica de interacciones (Ver gráfico 54) se observa que Gen-PobN son significativos en el costo final del ruteo.

8.3.2 Función maximización de cumplimiento de pedidos.

A continuación, se muestra el análisis de varianza de la variable respuesta: cumplimiento de pedidos. Con un nivel de confianza del 95%, indica que la población de clientes (PobC), el número de generaciones del algoritmo genético (Gen) y la interacción de PobC- Gen tienen un efecto significativo sobre el valor total del cumplimiento de pedidos.

Tabla 24

ANOVA en función del cumplimiento de pedidos para la instancia 3.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	8083,52	8083,52	1632,08	0,000
GEN	1	115,99	115,99	23,42	0,000
POBN	1	4,45	4,45	0,90	0,347
POBC*GEN	1	27,61	27,61	5,57	0,021
POBC*POBN	1	3,52	3,52	0,71	0,402
GEN*POBN	1	3,91	3,91	0,79	0,377
POBC*GEN*POBN	1	8,56	8,56	1,73	0,193
Error	72	356,61	4,95		
Total	79	8604,17			

Figura 55

Efectos principales FO2-I3

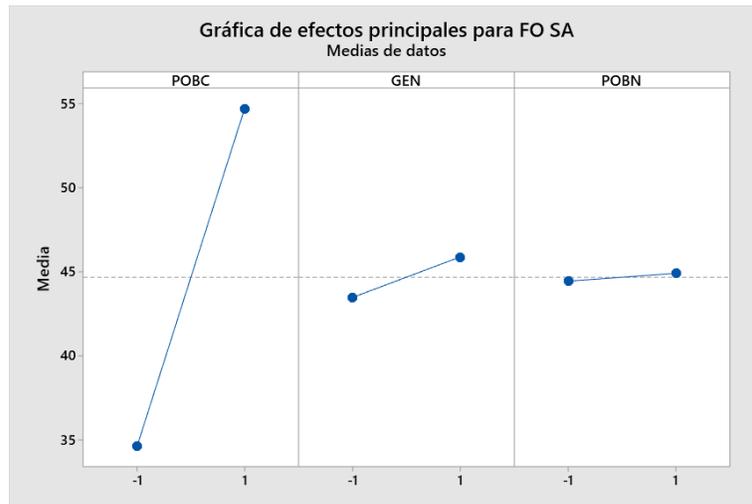
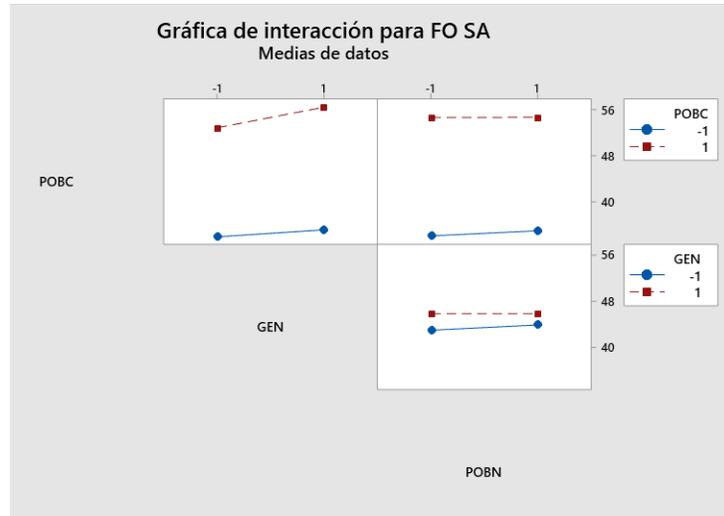


Figura 56

Interacción de factores FO2-I3



La mejor configuración de los factores en esta instancia es una población de clientes y generaciones altas (Ver figura 55). Se observa que en la Figura 56 para la interacción PobC-Gen hay una significancia para la maximización del cumplimiento de pedidos.

8.3.3 Tiempo computacional

Para esta variable respuesta con un nivel de confianza del 95% se muestra el análisis de varianza, el cual indica que la cantidad de generaciones del algoritmo genético, la interacción de PobC- PobN y PobC-PobN-Gen tienen un efecto significativo sobre el esfuerzo computacional

Tabla 25

ANOVA en función del tiempo computacional para la instancia 3.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
POBC	1	0,123	0,123	0,13	0,718
GEN	1	343,348	343,348	364,86	0,000
POBN	1	0,639	0,639	0,68	0,413
POBC*GEN	1	0,332	0,332	0,35	0,554
POBC*POBN	1	4,995	4,995	5,31	0,024
GEN*POBN	1	0,778	0,778	0,83	0,366
POBC*GEN*POBN	1	10,930	10,930	11,61	0,001
Error	72	67,754	0,941		
Total	79	428,900			

Figura 57

Efectos principales TC-I3

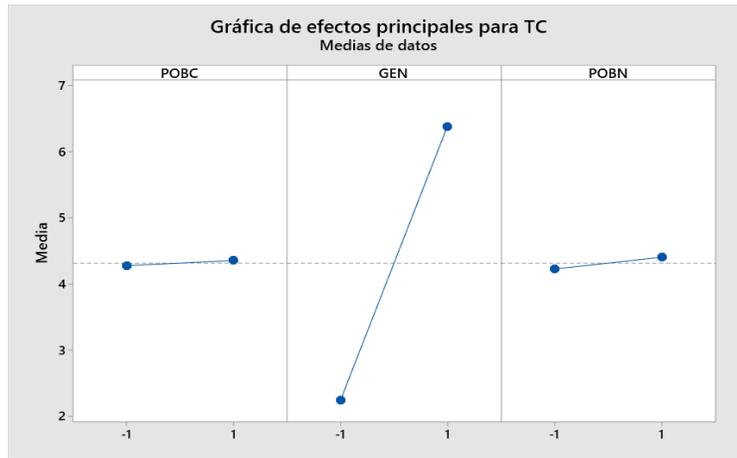
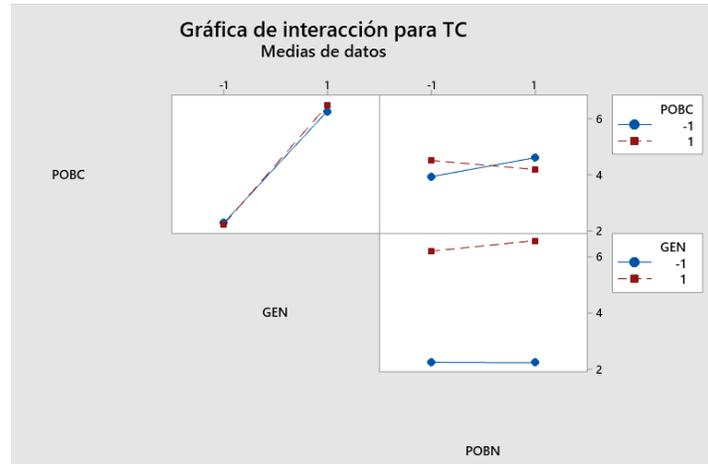


Figura 58

Interacción de factores TC-I3



Para tener el menor esfuerzo computacional posible se deben manejar una cantidad baja de generaciones del algoritmo genético (Ver figura 57). En cuanto a las interacciones de los factores se obtiene que PobN-PobC tienen una significancia que afecta el tiempo computacional (Ver figura 58)

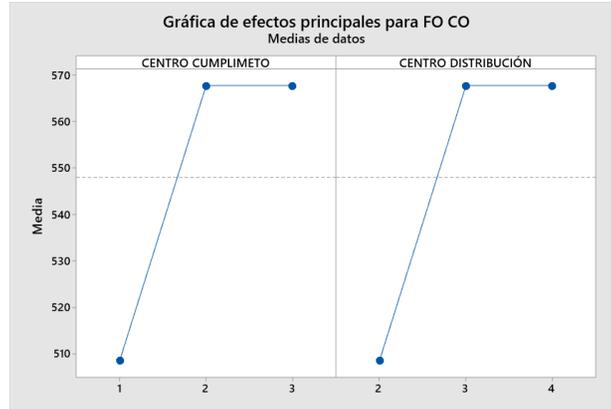
8.4 Conjunto de instancias

Considerando las tres instancias y la configuración de la cadena logística, se realiza un diseño experimental consolidado con la finalidad de determinar la mejor conformación de los parámetros: cantidad de centro de cumplimiento y centros de distribución.

- **Minimización de costos logísticos asociados al ruteo:** La mejor conformación del algoritmo construido consiste en manejar pocos centros de cumplimiento y distribución (Ver figura 59).

Figura 59

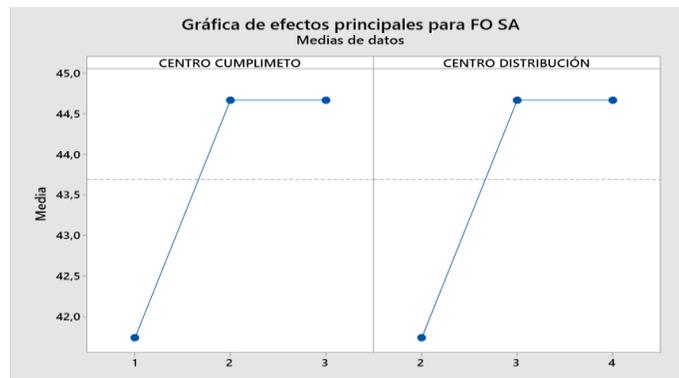
Efectos principales FO1- Conjunto de soluciones



- Maximización del cumplimiento de pedidos:** La configuración óptima para conseguir el mejor cumplimiento de los pedidos se compone de 2 centros de cumplimiento y 3 centros de distribución, ya que cuando son muy pocos se ve disminuido el rendimiento de esta variable, mientras que sí son más de las cantidad optima no tendrán una mejora significativa (Ver figura 60).

Figura 60

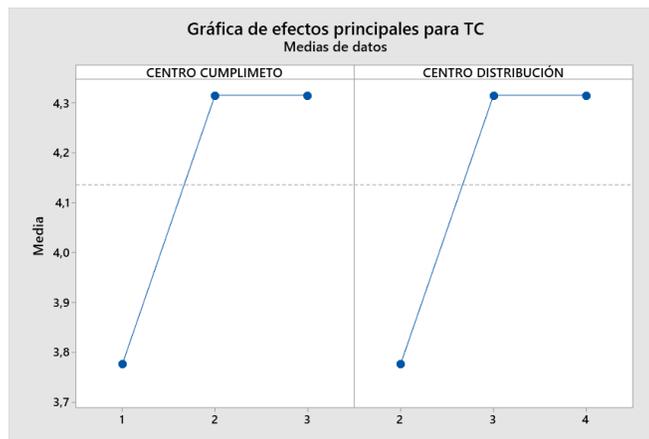
Efectos principales FO2 Conjunto de soluciones



- **Esfuerzo computacional:** Sí se busca manejar un tiempo computacional de procesamiento bajo, se recomienda considerar la menor cantidad posible de centros de cumplimiento y distribución.

Figura 61

Efectos principales TC Conjunto de soluciones



9. Conclusiones

Conforme a la revisión de literatura, se evidencia que el 2E-VRPSTW es un área de estudio novedosa y desarrollada principalmente en países como China. No obstante, con la consolidación del comercio electrónico producto de la pandemia COVID-19 se ha hecho imprescindible ahondar en estos enfoques. En Latinoamérica no hay precedentes de estudios relacionados, por lo que se puede concluir que no despierta el suficiente interés o que se carece de los recursos necesarios para desarrollar esta área de la logística, por lo tanto, existe un amplio margen de trabajo y desarrollo desde áreas como las ciencias computacionales y la ingeniería para poder acortar la brecha existente.

De acuerdo a las características del comercio minorista electrónico se determina que el costo y la experiencia de compra son variables igualmente importantes para decretar el éxito de una empresa, es por ello que en la investigación se plantea simultáneamente optimizar estas variables con el fin de tener un acercamiento a la realidad industrial. Para construir el modelo se debe partir de los fundamentos básicos del ruteo de vehículos y acotar el problema acorde a las características del ejercicio a investigar. Para tener resultados concluyentes de forma eficiente el investigador debe acotar el modelo de acuerdo a las características más significativas, ya que a mayor detalle se obtienen mejores resultados.

En la construcción del algoritmo genético NSGA-II se identificaron dos fases críticas debido a la importancia que presentan para la optimización del modelo matemático, la primera de ellas es la generación de la población inicial ya que es la entrada al desarrollo del algoritmo y establece en líneas generales el cumplimiento de las restricciones del modelo. La segunda fase es la selección ya que permite normalizar las dos funciones objetivo y evaluarlas acorde a la distancia de apilamiento seleccionando el mejor conjunto de soluciones. De acuerdo a la literatura y a los resultados obtenidos por la metaheurística NSGA-II se evidencia una solvencia en problemáticas multiobjetivo como el problema planteado (2E-VRPSTW).

Con los resultados obtenidos en la experimentación se identifica que el tomador de la decisión debe priorizar una de las tres variables respuesta del diseño de experimentos con el fin de establecer la mejor configuración del modelo, en cuanto a rendimiento computacional lógicamente el algoritmo funciona mejor en pequeñas instancias, no obstante, su funcionamiento en instancias de mayor tamaño no se ve gravemente afectado.

En cuanto a cumplimiento de pedidos, se concluye que se obtienen mejores resultados cuando el algoritmo genético tiene una cantidad alta de generaciones. De igual forma se identifica que la

cantidad (N) de individuos de la población inicial no tiene un efecto significativo sobre los resultados obtenidos. Finalmente, se determina que la configuración de la cadena logística en la que se obtienen los mejores valores es con dos centros de cumplimiento y tres centros de distribución, en añadidura se vislumbra que, a mayor cantidad de clientes, se obtiene mayor satisfacción total del sistema.

Respecto a los costos logísticos se concluye que únicamente se obtienen mejores resultados cuando hay una mayor cantidad de generaciones del algoritmo genético, funcionando mejor en pequeñas instancias.

10. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda para futuras investigaciones los siguientes aspectos a tener en cuenta.

En lo respectivo a las ventanas de tiempo se aconseja considerar el tiempo de servicio para la atención de cada cliente, a su vez considerar otras alternativas para cuantificar el cumplimiento de los pedidos que permitan un acercamiento más profundo a la realidad industrial.

Se plantea robustecer la función objetivo: Maximización del cumplimiento de pedidos, permitiendo abarcar una satisfacción del cliente de forma integral. Considerando la calidad de la entrega de los pedidos como una variable fundamental para la experiencia de compra del usuario.

En cuanto a la capacidad se plantea considerar los inventarios de mercancía en los centros de distribución como una restricción importante del modelo, a su vez se pueden contemplar una flota de vehículos urbanos (segundo escalón) con una capacidad heterogénea por lo que se asociarían a cada uno de ellos costos acordes al tamaño y al consumo de energía.

Para la construcción del algoritmo se propone comparar el rendimiento obtenido usando una heurística para la generación de la población inicial con los resultados que se consiguen usando la generación aleatoria.

Referencias Bibliográficas

- (4 de Mayo de 2020). Obtenido de La Republica: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/e-commerce-ha-crecido-mas-de-300-en-latinoamerica-en-medio-de-la-pandemia-3000424>
- Alvarado, C., Herazo, I., Ardila, C., & Donoso, Y. (Junio de 2005). Aplicación de NSGA-II y SPEA-II para la optimización multiobjetivo de redes multicast. *Ingeniería y Desarrollo*(17), 28-53. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/852/85201702.pdf>
- Barón, Y. A., Barrios, D., Ávila, M. G., & Álvaro, B. V. (s.f.). *Manual de Gestión Logística del Transporte y Distribución de Mercancías*. Obtenido de Universidad Nacional Abierta y a Distancia:
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/19210/60446830.pdf%3Bjsessionid=AD8C5F264C2F6A1FD089BBDCDB09AC98.jvm1?sequence=2>
- Biblioteca virtual UIS. (s.f.). *Biblioteca virtual*. Obtenido de Universidad Industrial de Santander:
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/menu>
- Calle, P. (24 de Octubre de 2014). *Analytics @ OU*. Recuperado el 02 de Septiembre de 2021, de analytics lab at the University of Oklahoma: <http://oklahoanalytics.com/data-science-techniques/nsga-ii-explained/>
- Campbell, A. M., & Savelsbergh, M. W. (2005). Decision Support for Consumer Direct Grocery Initiatives. *Transportation Science*, 39(3), 313-327. doi:10.1287/trsc.1040.0105
- Cao, Y., & Zhao, H. (2004). Evaluations of E-Tailers' Delivery Fulfillment: Implications of Firm Characteristics and Buyer Heterogeneity. *Journal of Service Research*, 6(4), 347-360. doi:10.1177/1094670503262948

- Catalán, A., & Fisher, M. (2012). Assortment Allocation to Distribution Centers to Minimize Split Customer Orders. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.2166687.
- Chen, A., Gu, X., & Gao, Z. (2020). Two-Phase Algorithm to Multiple Depots Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *IOP conference series*, 587(1), 1-10. doi:10.1088/1755-1315/587/1/012033
- Chen, S., & Leteney, F. (2000). Get Real! Managing the Next Stage of Internet. *European Management Journal*, 18(5), 519-528. doi:10.1016/S0263-2373(00)00041-4
- Clarke, G., & Wright, J. (1964). Scheduling of Vehicle Routing Problem from a Central Depot to a number of delivery Points. *Operation research*, 568-581.
- Cleophas, C., & Ehmke, J. (2014). When Are Deliveries Profitable? *Business & Information Systems Engineering*, 6, 11. doi: 10.1007/s12599-014-0321-9
- Coello, C. A., Lamont, G., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer.
- Cordero, M. G. (2019). *El comercio electrónico e-commerce, análisis actual desde la perspectiva del consumidor (Tesis de Posgrado)*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- Correa, C., Bolaños, R., & Molina, A. (Septiembre de 2008). ALGORITMO MULTIOBJETIVO NSGA-II APLICADO AL PROBLEMA DE LA MOCHILA. (U. T. Pereira, Ed.) *Scientia et Technica Año XIV, 39, 206-211*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4745489.pdf>
- Crainic, T., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2008). Clustering based heuristics for the two echelon vehicle routing problem. *Technical Report Cirrelt*.

- Crainic, T., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2012). impact of generalized travel cost on satellite location in two echelon vehicle routing problem . *Procedia - Social and Behavioral Sciences* , 198-204.
- Crainic, T., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2013). Grasp with path relinking for the two echelon capacited vehicle routing problem: Advances in metaheuristics. *Operations research/computer science interfaces series*, 113 -125.
- Crainic, T., Perboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2011). The two echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math based heuristics. *Transportation Science*, 364-380.
- Crainic, T., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for evaluating and Planning City logistics systems . *Transportation Science*, 432-354.
- Dallaert, N., Saridarq, F., Woensel, T., & Crainic, T. (2018). Branch and Price Based Algorithms for the Two Echelon Vehicle Routing Problem With Time Windows . *Transportation Science*.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (October de 1959). The Truck Dispatching Problem. *Management science*, 6, 80-91.
- Dantzing, G. (1963). *LINEAR PROGRAMMING AND EXTENSIONS*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Das, I., & Dennis, J. (1997). A closer look at drawbacks of minimizing weighted sums of objectives for Pareto set generation in multicriteria optimization problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 15. doi:10.1007/BF01197559
- Dellaert, N., Woensel, T., Crainic, T., & Saridarq, D. (2020). A multi commodity two Echelon capacitated vehicle routing oriblem with time windows: Model formulations and solution approach. *ScienzeDirect*.

- Farham, S., Iyigun, C., & Haldun, S. (2020). The Two echelon location routing problem with time: Formulation, branch and price, and clustering. *Eprints for the optimization community*.
- Fetecua, A. (04 de 02 de 2021). *LA IMPORTANCIA DE UNA ORDEN DE COMPRA EN LOS PROCESOS DE TU EMPRESA*. Obtenido de DESIGNPLUS: [https://designplus.co/blog/designplus/la-importancia-de-compra/#:~:text=J.%20R.%20Zaratiegui-%20es%20una%20orden%20de%20compra%3F,adquirir%20un%20producto%20o%20servicio](https://designplus.co/blog/designplus/la-importancia-de-una-orden-de-compra/#:~:text=J.%20R.%20Zaratiegui-%20es%20una%20orden%20de%20compra%3F,adquirir%20un%20producto%20o%20servicio)
- Florez, C., Bolaños, R., & Molina, A. (Septiembre de 2008). ALGORITMO MULTIOBJETIVO NSGA-II APLICADO AL PROBLEMA DE LA MOCHILA. *Scientia et Technica Año XIV, 39*, 206 - 211. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4745489.pdf>.
- Gonzales, J., Perboli, G., Tadei, R., & vigo, D. (2007). *The Two Echelon Capacitated Vehicule Routing*. Bolonia.
- Grangier, P., Gendreau, M., Lehuédé, F., & Rousseau, L. (2016). An adaptative large neighborhood search for the two echelon multiple - trip vehicle routing problem with satellite synchronization. *European Journal of Operation Researsh*, 80-91.
- Hemmerlmayr, V., Cordeau, J., & Crainic, T. (2012). An adaptative large neighborhood search heuristic for rwo echelon vehicle routing problems arisng in city . *Computers and Operations Research*, 3215-3228.
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES* (Novena ed.). Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Hossein, A. (25 de 02 de 1994). *Modelos Deterministas: Optimización Lineal*. Obtenido de University of Baltimore: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/business->

stat/opre/spanishd.htm#:~:text=Un%20modelo%20de%20Optimizaci%C3%B3n%20Matem%C3%A1tica,sistema%20de%20ecuaciones%20o%20inecuaciones

Huizhen Zhang, Q. Z. (2019). Un algoritmo de optimización de colonias de hormigas híbridas para un problema de enrutamiento de vehículos de objetivos múltiples con ventanas de tiempo flexible. *ELSEVIER*, 166-190.

Jasin, S., & Sinha, A. (2015). An LP-Based Correlated Rounding Scheme for Multi-Item Ecommerce Order Fulfillment. *Operations research*, 63(6), 1336-1351. doi:10.1287/opre.2015.1441

Jiang, D., & Li, X. (2020). Order fulfilment problem with time windows and synchronisation arising in the online retailing. *International Journal of Production Research*, 1-29. doi:10.1080/00207543.2020.1721589

Jiang, H. (2014). An hybrid heuristic algorithm for the two echelon vehicle routing problem . *Information Science and Control Engineering*, 185-199.

Kalyanmoy, D. (2002). *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II* (Vol. 6). IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION. Obtenido de https://scholar.google.ch/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=paTAXiIAAAAJ&citation_for_view=paTAXiIAAAAJ:cK4Rx0J3m0C

Kang, H.-Y., & Lee, A. (2018). An Enhanced Approach for the Multiple Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles and a Soft Time Window. *Symmetry (Basel)*, 10(11), 650. doi:10.3390/sym10110650

Leung, K., Choy, K., Siu, P. K., Ho, G., Lam, H., & Lee, C. K. (2018). A B2C e-commerce intelligent system for re-engineering the e-order fulfilment process. *Expert systems with applications*, 91, 386-401. doi:10.1016/j.eswa.2017.09.026

- Li, X., Li, J., Aneja, Y., Guo, Z., & Tian, P. (2019). Integrated order allocation and order routing problem for e-order fulfillment. *IIE transactions*, 51(10), 1128-1150. doi:10.1080/24725854.2018.1552820
- Lin, I. I., & Mahmassani, H. S. (2002). Can Online Grocers Deliver?: Some Logistics Considerations. *Transportation Research Record*, 1817(1), 17-24. doi:10.3141/1817-03
- Lopez, E. (20 de 07 de 2020). *Transformación digital y comercio electrónico*. Obtenido de asesoftware: <https://asesoftware.com/transformacion-digital-y-comercio-electronico/#:~:text=En%20el%20marco%20de%20la,y%20servicios%20por%20medios%20electr%C3%B3nicos%E2%80%9D>
- López, J. (2013). *Optimización Multi-objetivo. Aplicaciones a problemas del mundo real*. La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad de la plata.
- López, L., Hincapié, R. A., & Gallego, R. A. (2011). PLANEAMIENTO MULTIOBJETIVO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN USANDO UN ALGORITMO EVOLUTIVO NSGA-II. *Revista EIA*, 15, 141-151. Recuperado el 18 de Septiembre de 2021, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372011000100012
- Macini, S. (2012). The two echelon vehicle routing problem . *4or: A Quartely Journal of Operations Research* , 391-392.
- Mokhtarian, P. L. (2004). A conceptual analysis of the transportation impacts of B2C e-commerce. *Transportation*, 31(3), 257-284. doi:10.1023/B:PORT.0000025428.64128.d3
- Mora, L. (2008). *Indicadores de la gestión logística*. Obtenido de Fundación de estudios superiores: https://www.fesc.edu.co/portal/archivos/e_libros/logistica/ind_logistica.pdf
- Nasiri, M. M., Rahbari, A., Werner, F., & Karimi, R. (2018). Incorporating supplier selection and order allocation into the vehicle routing and multi-cross-dock scheduling problem.

- International journal of production research*, 56(19), 6527-6552.
doi:10.1080/00207543.2018.1471241
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. Ciudad de México, México: Mc Graw-Hill Interamericana. Recuperado el 02 de Octubre de 2021
- Niño, A., & Arias, J. (14 de 06 de 2017). *Un algoritmo Hybrid GRASP para el 2ecvrp*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/496/49655539002/html/#B17>
- OCDE. (2019). *Panorama del comercio electrónico POLÍTICAS, TENDENCIAS Y MODELOS DE NEGOCIO*. Obtenido de OCDE: <https://www.oecd.org/sti/Panorama-del-comercio-electro%CC%81nico.pdf>
- Oropeza, D. K. (2018). *La competencia económica en el comercio electrónico y su protección en el sistema jurídico mexicano*. Ciudad de México: UNAM Instituciones de Investigaciones Jurídicas.
- Ortiz, C., Varas, S., & Jorge, V. (2000). *Optimización y modelos para la gestión*. JC Saéz.
- Paredes, F. (07 de 09 de 2020). *Los verdaderos problemas de eCommerce y cómo solucionarlos*. Obtenido de Grupo Formax: <https://grupoforamax.com/problemas-ecommerce-como-solucionarlos/>
- Paredes, S. (2012). *Departamento de Matemática Aplicada y Estadística*. Obtenido de Universidad Politecnica de Cartagena: https://www.dmae.upct.es/~paredes/am_ti/apuntes/guia_foe.pdf
- Perboli, G., Rosano, M., Saint-Guillain, M., & Rizzo, P. (2018). Simulation–optimisation framework for City Logistics: an application on multimodal last-mile delivery. *IET intelligent transport systems*, 12(4), 262-269. doi:10.1049/iet-its.2017.0357
- Puentes, J. (14 de 08 de 2015). *Costos logísticos representan el 15% de las ventas de productos de empresas nacionales*. Obtenido de La republica:

[https://www.larepublica.co/empresas/costos-logisticos-representan-el-15-de-las-ventas-de-productos-de-empresas-nacionales-](https://www.larepublica.co/empresas/costos-logisticos-representan-el-15-de-las-ventas-de-productos-de-empresas-nacionales-2288826#:~:text=Costos%20log%C3%ADsticos%20representan%20el%2015,de%20productos%20de%20empresas%20nacionales)

[2288826#:~:text=Costos%20log%C3%ADsticos%20representan%20el%2015,de%20productos%20de%20empresas%20nacionales](https://www.larepublica.co/empresas/costos-logisticos-representan-el-15-de-las-ventas-de-productos-de-empresas-nacionales-2288826#:~:text=Costos%20log%C3%ADsticos%20representan%20el%2015,de%20productos%20de%20empresas%20nacionales)

Ramírez, I., & Domínguez, J. (2004). Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 1801-1809. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1350817>

Ramos, A., Sanchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., & Linares, P. (10 de 2010). *Modelos Matemáticos de optimización*. Obtenido de Universidad Pontificia Comillas: https://www.gams.com/docs/contributed/modelado_en_gams.pdf

Robusté Antón, F. (2005). *Logística de transporte*. CENIT.

Rocha, L., González, C., & Orjuela, J. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, 16(2), 35-55. Recuperado el 13 de 04 de 2021, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498850173004>

Schrotenboer, A. H., Wruck, S., Roodbergen, K. J., Veenstra, M., & Dijkstra, A. S. (2017). Order picker routing with product returns and interaction delays. *International journal of production research*, 55(21), 6394-6406. doi:10.1080/00207543.2016.1206982

Scopus. (2021). Obtenido de Scopus: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/term/analyzer.uri?sid=e6bb28ccfeabb91b2a5a272277497b5d&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS->

KEY%28%28%22*echelon%22+OR+%22two*echelon%22+OR+%22E%22%29+AND+%28%22VRP%22+OR+%22vehicle+routing+problem%22+OR%22+Routing+

Scopus. (2021). *Scopus*. Obtenido de

<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/term/analyzer.uri?sid=6cfde0627f55bb1590748cbd69e5f5c6&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS->

KEY%28%28%22VRP%22+OR+%22vehicle+routing+problem%22+OR%22+Routing+problem%22+OR+%22+urban+distribution%22%29%29&sort=plf-

Scopus. (2021). *Scopus*. Obtenido de

<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/term/analyzer.uri?sid=1f7ff22d7afba07bc52cac6db2e0d37c&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS->

KEY%28%28%22*echelon%22+OR+%22two*echelon%22+OR+%22E%22%29+AND+%28%22VRP%22+OR+%22vehicle+routing+problem%22+OR%22+Routing+

ShipBob. (s.f.). *Ecommerce Fulfillment*. Obtenido de <https://www.shipbob.com/ecommerce-fulfillment/>

Shubham, J. (31 de Julio de 2017). *Analytics Vidhya*. Recuperado el 02 de Septiembre de 2021, de <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/07/introduction-to-genetic-algorithm/>

Taha, H. (2012). *Investigacion de operaciones* (Novena ed.). Pearson.

Torabi, S., Hassini, E., & Jaihoonian, M. (2015). Fulfillment source allocation, inventory transshipment, and customer order transfer in e-tailing. *Transportation Research Part E*, 79, 128-144. doi:10.1016/j.tre.2015.04.004

Velásquez, J., & Villota, J. (2019). APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO NO DOMINADO NSGA-II PARA LA ACELERACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN A TRAVÉS DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE

COMPENSACIÓN DISCRETA TIEMPO - COSTO (DTCTP) EN UNA OBRA CIVIL DEL VALLE DEL CAUCA. *Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial*. Universidad del Valle, Zarzal, Valle del Cauca, Colombia. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021, de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/18740/0602405.pdf?sequence=1>

- Velásquez, L. (2015). ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS. *ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA EN LOGÍSTICA INTEGRAL*. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA, Bogotá DC.
- Vélez Maya, T. (2014). *Logística empresarial: gestión eficiente del flujo de suministros*. Bogotá: Ediciones de la U.
- von Lucken, C., Hermosilla, A., & Barán, B. (2004). Algoritmos Evolutivos para Optimización Multiobjetivo: un Estudio Comparativo en un Ambiente Paralelo Asíncrono. *Universidad Nacional de Asunción*, 12.
- Wang, Y. M., & Yin, H. L. (2018). Cost-Optimization Problem with a Soft Time Window Based on an Improved Fuzzy Genetic Algorithm for Fresh Food Distribution. *Mathematical problems in engineering*, 2018, 1-16. doi:10.1155/2018/5743287
- Wang, Z., & Wen, P. (2020). Optimization of a Low-Carbon Two-Echelon Heterogeneous-Fleet Vehicle Routing for Cold Chain Logistics under Mixed Time Window. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 12(5), 1967. doi:10.3390/su12051967
- Xu, P. J. (2005). Order Fulfillment in Online Retailing: What Goes Where. *Ph.D. Thesis*. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Massachusetts.

Yepes, V. (05 de 06 de 2014). *Optimización y programación matemática*. Obtenido de UPV:

<https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/06/05/optimizacion-programacion-matematica/>

Zeng, Z., Xu, w., & Xu, Z. (2013). A Two phase hybrid heuristic for the two echelon vehicle routing problem. *Chinise Automation Congress*, 625-630.

Zhang, H., Zhang, Q., Ma, L., Zhang, Z., & Liu, Y. (2019). A hybrid ant colony optimization algorithm for a multi-objective vehicle routing problem with flexible time windows. *Information sciences*, 490, 166-190. doi:10.1016/j.ins.2019.03.070