

**PROPUESTA DE UN MODELO DE RUTEO PARA LA RECEPCIÓN DE LA POS-
COSECHA DE MAIZ DEL SISTEMA DE RIEGO RUT EN EL NORTE DEL VALLE
DEL CAUCA**

OSCAR FERNANDO RESTREPO BUENO - 201457106

SEBASTIAN RUIZ ROJAS - 20155802



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL, VALLE DEL CAUCA
2021**

**PROPUESTA DE UN MODELO DE RUTEO PARA LA RECEPCIÓN DE LA POS-
COSECHA DE MAIZ DEL SISTEMA DE RIEGO RUT EN EL NORTE DEL VALLE
DEL CAUCA**

OSCAR FERNANDO RESTREPO BUENO - 201457106

SEBASTIAN RUIZ ROJAS- 20155802

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero industrial

Director:

Msc. CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL, VALLE DEL CAUCA
2021**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a Dios por permitirme llegar hasta estas instancias y proveer lo necesario para cumplir mis proyectos.

En las siguientes líneas quisiera agradecer a una pequeña parte de las personas que han participado en mi vida y permitido alcanzar este logro:

A mis padres y hermana, Oscar Marino Restrepo Rivera, Lucero Bueno Gordillo y Claudia Milena Restrepo Bueno que han estado acompañándome en este proceso tan importante en mi vida inculcándome valores y principios fundamentales para cualquier persona de bien.

A mi amigo Milton Alexander Londoño Román, agradecer por sus consejos, paciencia y apoyo brindado en esta etapa, a mi compañero de grado Sebastián Ruiz Rojas por su ayuda.

Agradecer a la Universidad del Valle por brindarme una educación de calidad y apoyar al progreso de la población del norte del valle.

Agradecer a la empresa donde se desarrolló el trabajo de grado, ya que me brindaron los datos y el apoyo necesario para realizar este proyecto, ustedes fueron una pieza fundamental en la culminación de este proceso.

Agradecer a los profesores del pregrado de ingeniería industrial, por todos los conocimientos que me han compartido. En especial a mi asesor de tesis, MSC en Ingeniería industrial Carlos Alberto Rojas Trejos por el enorme apoyo, sus sabios consejos y paciencia, por brindar su granito de arena para que los futuros profesionales tengan una formación integral.

OSCAR FERNANDO RESTREPO BUENO

Agradecer a Dios que es mi camino para cumplir mis proyectos.

Agradecer a mis padres por el apoyo incondicional brindado para culminar mi carrera, teniendo siempre en mi corazón a mis abuelos que lastimosamente no me acompañan pero se cual orgulloso están, al resto de mi familia por su apoyo y consejos.

Mil gracias a la universidad del valle por formarme como persona con una educación de calidad, a mi compañero de trabajo de grado Oscar Fernando Restrepo por su paciencia y colaboración para terminar con esta etapa de formación.

Agradecer a la empresa ASORUT por suministrar la información necesaria para culminar con esta etapa de formación.

Mil gracias al MSC en Ingeniería industrial Carlos Alberto Rojas Trejos por su apoyo incondicional, consejos y asesoría en este proceso formativo.

SEBASTIAN RUIZ ROJAS

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
1 GENERALIDADES DEL PROBLEMA	13
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	15
3 JUSTIFICACIÓN	16
4 MARCO DE REFERENCIA.....	17
4.1 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS.	17
4.2 TIPOS DE VRP.	17
4.2.1 PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO (TSP).	17
4.2.2 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR DE EMPAQUETAMIENTO EN COMPARTIMENTOS (BPP). ..	18
4.2.3 PROBLEMA DE M AGENTES VIAJEROS, m-TSP.	18
4.2.4 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON CAPACIDAD LIMITADA (CVRP).	18
4.2.5 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON FLOTA HETEROGENEO (MULTIPLE TYPES OF VEHICLES).....	18
4.2.6 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON DESPACHO Y RECOLECCIÓN (VRPPD).....	19
4.2.7 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON ENTREGA DIVIDIDA (SDVRP).	19
4.2.8 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON FLOTA PROPIA Y SUB-CONTRATADA (VRPPC / MDVRPPC).	19
4.3 TÉCNICAS DE SOLUCIÓN.....	19
4.3.1 TÉCNICAS HEURÍSTICAS.....	19
4.3.2 TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS.	20
4.3.3 TÉCNICAS EXACTAS (PLE).	21
5 MARCO METODOLÓGICO	22
5.1 FASE 1: DIAGNOSTICO ASORUT.....	24
5.1.1 DISTRITO DE RIEGO RUT.	25
5.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RECOLECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE MAÍZ DE LOS USUARIOS DEL DISTRITO DE RIEGO RUT.....	25

5.1.3 CLASIFICACIÓN ABC DE LOS AGRICULTORES.....	27
5.1.4 OFERTA Y NEGOCIACIÓN DE LOS USUARIOS DEL DISTRITO DE RIEGO RUT.....	29
5.1.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS.....	30
5.1.6 COSTOS DE LOS VEHÍCULOS.....	30
5.2 FASE 2: FORMULACIÓN DEL MODELO.....	32
5.2.1 DEFINICIÓN DE CONJUNTOS.....	32
5.2.2 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE DECISIÓN.....	32
5.2.3 DEFINICIÓN DE PARAMETROS.....	32
5.2.4 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	33
5.2.5 RESTRICCIONES.....	33
5.2.6 VALIDACIÓN DEL MODELO.....	34
5.2.6.1 Prueba para validación del modelo.....	35
5.3 FASE 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS (método de los ahorros Clark & Wright).....	37
5.3.1 PRUEBA BASE.....	37
5.3.2 IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIOS.....	41
5.3.2.1 Primer escenario.....	41
5.3.2.2 Segundo escenario.....	46
5.3.3 COMPARACIÓN DE PRUEBAS.....	49
5.3.4 ANÁLISIS DE COSTOS.....	50
CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS.....	54
ANEXOS.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación ABC de los predios cultivados en maíz de la empresa ASORUT.	27
Tabla 2: Características de la vinculación de los cultivadores de maíz con la empresa ASORUT.	29
Tabla 3: Características y capacidad de carga de los camiones empleados en la recolección.	30
Tabla 4: Costos fijos de los vehículos.	31
Tabla 5: Costos variables de los vehículos.	31
Tabla 6: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, validación del modelo.	35
Tabla 7: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, prueba base.	37
Tabla 8: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, primer escenario.	42
Tabla 9: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, segundo escenario.	46
Tabla 10: Comparación de escenarios para validación del modelo.	50
Tabla 11: Análisis de costos de recorrido.	51

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Municipios dentro de la limitación y alcance del proyecto.	14
Ilustración 2: Demarcación y catalogación de los predios zona RUT.....	26
Ilustración 3: Predios categorizados en la zona A.	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Metodología propuesta para la evaluación sistémica del análisis de escenarios en el comportamiento de ruteo vehicular del distrito de riego RUT.	23
Figura 2: Proceso actual de recolección de maíz en el distrito RUT.	24
Figura 3: Clasificación ABC de la oferta de los predios cultivados en maíz de la empresa ASORUT.	28
Figura 4: Diagrama de rutas para 20 predios, validación modelo.	36
Figura 5: Diagrama de la ruta 1, vehículo 1, prueba base.	38
Figura 6: Diagrama de la ruta 2, vehículo 2, prueba base.	39
Figura 7: Diagrama de la ruta 3, vehículo 3, prueba base.	40
Figura 8: Diagrama de la ruta 4, vehículo 4, prueba base.	41
Figura 9: Diagrama de la ruta 1, vehículo 1, primer escenario.	43
Figura 10: Diagrama de la ruta 2, vehículo 2, primer escenario.	44
Figura 11: Diagrama de la ruta 3, vehículo 3, primer escenario.	45
Figura 12: Diagrama de la ruta 4, vehículo 4, primer escenario.	46
Figura 13: Diagrama de la ruta 1, vehículo 1, segundo escenario.	47
Figura 14: Diagrama de la ruta 2, vehículo 2, segundo escenario.	48
Figura 15: Diagrama de la ruta 3, vehículo 3, segundo escenario.	49

LISTA DE ANEXOS.

Anexo 1: Resultados de la clasificación ABC.	57
Anexo 2: Identificación de oferta para cada predio maicero.	57
Anexo 3: Matriz tiempo en minutos.	57
Anexo 4: Matriz distancia en kilómetros.	57
Anexo 5: Tabla de coordenadas geodésicas por predio.	57

RESUMEN

El problema de ruteo vehicular (VRP) es un tema de gran interés académico y práctico, permite reducir las distancias, tiempos o costos presentes en las actividades de la cadena logística que pueden generar un impacto significativo y afectar el buen desempeño organizacional. Este documento propone un modelo de ruteo clásico TSP con capacidad vehicular heterogénea, con el fin de minimizar la distancia total recorrida en el transporte de recolección de maíz para el distrito de riego RUT en el Valle del Cauca. Asignando un total de 95 predios maiceros a unas rutas específicas de recolección. En una primera fase se diagnostica la situación actual de recolección del distrito de riego RUT, se implementa una clasificación ABC para la priorización de predios. En la segunda fase se propone el modelo de Carlos Quintero (2020), para dar solución al problema actual de recolección de maíz. se utilizó un lenguaje de programación matemática AMPL empleando el solver GUROBI bajo el entorno de desarrollo académico AMPL IDE como método de validación, realizando corridas que contemplaban los 20 nodos, posteriormente en la tercera fase se implementa una heurísticas constructiva asociada al método de los ahorros o Clark & Wright para resolver el problema de los 95 predios, el algoritmo se replicó utilizando el desarrollador de software de código abierto ANACONDA y el entorno de desarrollo SPYDER utilizando el lenguaje de programación PYTHON implementando una prueba base y 2 escenarios. Evidenciándose una disminución de 14% del costo total. Este trabajo pretende demostrar como la optimización de rutas a través de la programación matemática puede reducir las distancias y costos de la logística de distribución de una empresa.

Palabras clave: Ruteo de Vehículos, Logística de Distribución, Problema del agente viajero, Programación matemática.

ABSTRACT

The Vehicle Routing Problem (VRP) is a topic of great academic and practical interest, it allows to reduce the distances, times or costs present in the activities of the logistic chain that can generate a significant impact and affect the good organizational performance. This document proposes a classic TSP routing model with heterogeneous vehicular capacity, in order to minimize the total distance travelled in the maize harvesting transport for the RUT irrigation district in the Cauca Valley. Assigning a total of 95 maiceros farms to specific collection routes. In a first phase is diagnosed the current situation of collection of the district of irrigation RUT, an ABC classification is implemented for the prioritization of land. The second phase proposes the model of Carlos Quintero (2020), to solve the current problem of corn collection. To solve the current corn harvest problem. an AMPL mathematical programming language was used using the GUROBI solver under the AMPL IDE academic development environment as a validation method, performing runs that contemplated the 20 nodes, later in the third phase a constructive heuristics associated with the savings method or Clark & Wright to solve the problem of the 95 farms is implemented, the algorithm was replicated using the open source software developer ANACONDA and the SPYDER development environment using the PYTHON programming language implementing a base test and 2 scenarios. There was a 14% decrease in the total cost. This paper aims to demonstrate how optimization route through mathematical programming can reduce the distances and costs of a company's distribution logistics.

Key words: Vehicle Routing, Distribution Logistics, Travelling Salesman Problem, Mathematical Programming.

INTRODUCCIÓN

La logística es uno de los eslabones más importantes dentro de una cadena de suministro, ya que es una actividad o proceso de control y coordinación que permite identificar, destacar e interactuar con criterios o particularidades de valor a lo largo de un proceso, producto o negocio, por lo tanto “el transporte es el responsable de trasladar los productos terminados, entre empresas y clientes que se encuentran dispersos geográficamente en un sector determinado, de agregar valor a los productos transportados cuando estos son entregados a tiempo y en buen estado, sin daños y en las cantidades requeridas. Igualmente, el transporte es uno de los puntos clave para la satisfacción del cliente.” (Barrera Núñez et al., 2018), así mismo el fortalecimiento en el mercado para una empresa o persona natural, ya sea manufacturera, de servicios o agrícola depende de diferentes factores, uno de los más significativos es la rentabilidad generada a través actividades productivas, esto, teniendo en cuenta la relación de costos en base a la distancias recorridas, este tipo de problema es analizado por la investigación de operaciones, donde se encuentran diversos métodos para hacer que variables como distancias, tiempos y costos se reduzcan conservando la calidad del producto o la prestación del servicio. “es por ello que los costos asociados con el transporte son altamente representativos, en la cadena de abastecimiento y están involucrados directamente con la relación que tienen con proveedores, clientes y competidores.” (Calderon Sotero, 2010).

Según Mediorreal (2014) se halló una variante al problema original de VRP, denominado TSP, problema de agentes viajeros por sus siglas en inglés, donde se encuentran los clientes ubicados en una zona geográfica; el TSP (traveling salesman problem) es formulado de la siguiente manera. Un agente viajero, partiendo de su ciudad origen debe visitar exactamente una vez cada ciudad de un conjunto de ellas y retornar al punto de partida. Un recorrido con estas características es llamado dentro de este contexto un tour. El problema consiste en encontrar el tour para el cual la distancia total recorrida sea mínima. Se asume que se conoce, para cada ciudad la distancia entre ellas.(Velarde & Mercado, 1999) .En este sentido, resulta importante que se analicen los sistemas de transportes de las organizaciones con el fin de minimizar las distancias, tiempos o costos, garantizando la entrega o recolección oportuna de los productos para cada cliente. Dada la complejidad para diseñar las rutas de transporte, Álvarez Hernández (2017) que retoma a autores como Clark & Wright; Olivera (2004) que se recoge en Fisher y Jaikumar; y la Unidad de Desarrollo Tecnológico en Inteligencia Artificial (s.f) abarcando a Gillet y Miller escriben sobre las propuestas que han realizado para este problema, denominado como Problema de ruteo de vehículos (VRP), que se basa en determinar las mejores rutas y/o asignaciones para la entrega de bienes a clientes que se encuentran distribuidos geográficamente.

De acuerdo a los planteamientos expuestos anteriormente y en vista de la situación que se ha venido presentado en la empresa ASORUT y los usuarios maiceros del distrito, en este trabajo se estableció una propuesta de asignación de rutas para realizar la recolección del maíz, minimizando la distancia total en el proceso de transporte del grano para su posterior almacenamiento. Adicionalmente se introdujo algoritmos exactos y heurísticas constructivas para la determinación de la configuración de las rutas.

1 GENERALIDADES DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Un problema de ruteo de vehículos consiste en dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo, donde deben comenzar y terminar en los depósitos para que los vehículos visiten a los clientes. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema. (Ballou, 2004).

El caso de estudio del Distrito RUT cuenta con una superficie total equivalente a (10.256.23 ha), está ubicado en la zona plana en el norte del departamento del Valle del cauca entre la margen izquierda del Rio cauca y las estribaciones de la cordillera occidental, seccionada de una manera singular en el campo productivo agropecuario, en el 100% del área del distrito, actualmente se tiene sembrado caña de azúcar en un 52.73% (5.407,88 ha); maíz en un 21,26% (2.180,36 ha); uva en un 6.3% (643 ha), entre otros.

Como se aprecia en la ilustración 1, el distrito de riego del RUT, está comprendido por los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro, conformantes de ASORUT; se siembran aproximadamente cada semestre 3.500 hectáreas de maíz, con una producción promedio de 6.430.000 ton/semestre. Siendo los meses de abril – mayo, octubre – noviembre los periodos de mayor oferta de maíz.

Actualmente el distrito de riego del RUT contribuye con un promedio del 20% de la siembra de maíz en el Valle del Cauca gracias a los pequeños cultivadores que forman parte de la compañía, así mismo el sistema de transporte de las cosechas de maíz de cada predio del distrito es trasladada hasta el centro de acopio ubicado entre los municipios de La Unión y Roldanillo, esta operación representa actividades ineficientes para el transporte de grano afectando la cosecha del usuarios causando perdida de la calidad que se refleja en la disminución de un 15% y 20% del valor venta del cereal, lo cual se traduce en ingresos mínimos que repercute en la rentabilidad de cada agricultor y la empresa, al mismo tiempo debido a la alta oferta que se tiene del producto en los meses de cosecha (abril – mayo, octubre – noviembre) y los pocos compradores existentes en la región, dan como resultado una baja del precio en la venta del maíz, de tal modo se hace necesario la recolección de grano para su almacenaje; debido a que terminada la producción de maíz los precios en la zona de influencia del distrito aumentan más del 50% del valor pagado en cosecha. Esta situación hace que los beneficiarios zonales, al no tener unos ingresos sostenibles, arrienden sus tierras a los ingenios azucareros para sembrar caña, fortaleciendo la vocación de los monocultivos y deteriorando la incentivación del gobierno al cobijar los pequeños agricultores.(Polo Solano, 2017).

Toth & Vigo (2004) afirman que “el problema de distribuir productos desde ciertos depósitos a sus usuarios finales juega un papel central en la gestión de algunos sistemas logísticos, y su adecuada planificación puede significar considerables ahorros. Esos potenciales ahorros justifican en gran medida la utilización de técnicas de investigación

operativa como facilitadoras de la planificación, dado que se estima que los costos del transporte representan entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes”.

De este modo, la distribución reviste para la actividad comercial y la competitividad de las empresas un elemento esencial, ya que garantiza que los productos lleguen al lugar preciso, en el momento oportuno y al menor costo posible, aportando por lo tanto ventajas competitivas relevantes. Además; el objetivo esencial de la distribución es garantizar el nivel de servicio deseado por los clientes, con un nivel de gastos que permita alcanzar las utilidades esperadas, por esto los costos de distribución suelen representar un componente significativo del costo total de producción de un bien de consumo, variando en función de su naturaleza (Estrada Romeu, 2007).

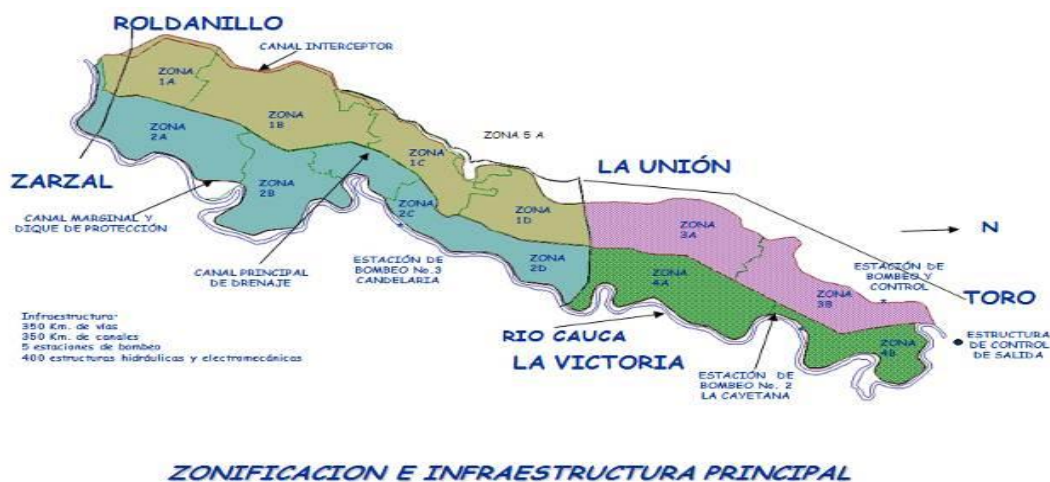
Se identificó que la empresa ASORUT no aplica un método estructurado siguiendo unos pasos específicos para la organización de las rutas de los vehículos para llevar a cabo la recolección del maíz de los cultivadores. Esta situación trae como consecuencia que en ocasiones se incurra en actividades que no aportan valor a la operación identificando tiempos muertos y retrocesos (sub-tour) que afectan directamente la rentabilidad del transporte para la recolección del maíz.

En estos momentos ASORUT cuenta con un número importante de cultivadores de maíz, tanto la empresa como los usuarios se ven en la necesidad de acrecentar sus ingresos y fortalecer la vocación de la siembra del producto, ya que muchas familias campesinas están abandonando el campo por los altos costos y la baja rentabilidad han estado teniendo los usuarios del distrito de riego RUT.

Así mismo, este trabajo pretende dar respuesta a la siguiente pregunta en relación con los objetivos específicos trazados:

¿Cómo realizar la asignación de rutas que contribuya a reducir la distancia total de recolección del maíz en el distrito de riego ASORUT?

Ilustración 1: Municipios dentro de la limitación y alcance del proyecto.



Fuente: Tomado y editado de Polo Solano (2017)

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

- ✓ Realizar una propuesta de asignación de rutas que contribuya a minimizar la distancia total recorrida en el transporte de recolección de maíz para el distrito de riego RUT en el Valle del Cauca.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ✓ Diagnosticar la situación actual de la red de recolección y transporte del sistema de riego RUT.
- ✓ Formular un modelo matemático de la recolección de maíz en el distrito de riego RUT.
- ✓ Realizar un análisis de escenarios del modelo a partir de la variación de parámetros de interés y su impacto en la función de desempeño.

3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la logística de transporte dentro de una empresa tiene un fuerte impacto dentro de su economía, ya que éste representa entre uno a dos tercios de los costos logísticos de la empresa, convirtiéndose en un factor muy importante a la hora de determinar el precio de los diferentes productos que se comercializan (Ballou, 2004).

Este proyecto busca realizar una asignación de rutas a una flota de vehículos que realizan la recolección del maíz en la empresa ASORUT, de forma que contribuya a minimizar la distancia total de transporte asociados con la operación y así aumentar los ingresos de la empresa y los agricultores que la conforman.

Teniendo en cuenta la cadena de abastecimiento, como aquella red y estructura donde se desarrollan todas las prácticas comerciales, entre los agentes proveedores, productores, distribuidores y consumidores, se debe buscar la creación de valor en cada uno de los procesos que se llevan a cabo a lo largo de la cadena, mediante la integración de todos los eslabones interrelacionados, de tal forma que se genere una reducción significativa de costos, a partir de la correcta administración y gestión de la cadena de abastecimiento. (Carrillo Mediorreal, 2014).

Por esta razón, una planificación de rutas para la recolección de maíz sería un valor agregado que se daría al proceso de transporte, dentro de la cadena de abastecimiento. Además, se realiza una integración con los agricultores, teniendo en cuenta la capacidad de producción de los predios, los vehículos implementados en la operación, la localización de cada lote de maíz, con el fin de disminuir la distancia total en la recolección del grano.

4 MARCO DE REFERENCIA.

4.1 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS.

Según Rocha Medina et al. (2011): “el problema de VRP (Vehicle Routing Problem) es uno de los más comunes en la optimización de operaciones logísticas y uno de los más estudiados; plantea la búsqueda de la solución óptima con diferentes restricciones tales como: número de vehículos, su capacidad, lugares de destino (clientes) y demanda de los clientes, entre otras. Una formulación de este tipo puede incluir un amplio número de variables y diversos parámetros”.

Asimismo, Guasmayan (2014) afirma que “en la literatura especializada se encuentran evidencias de artículos relacionados con el problema de ruteo desde los años 1975 hasta la actualidad. A partir del año 1989 hubo un aumento importante de publicaciones. A medida que pasa el tiempo, la investigación sobre ruteo de vehículos avanza y la cantidad de artículos publicados aumenta”.

4.2 TIPOS DE VRP.

El primer problema planteado tipo VRP fue el del agente viajero o TSP (Travelling Salesman Problem) introducido por Flood en 1956, según, Rocha Medina et al.(2011), describen el modelo como:

“Un agente vendedor debe visitar cierta cantidad de ciudades en un solo viaje, de tal manera que inicie y termine su recorrido en la ciudad “origen”; el agente debe determinar la ruta que debe seguir para visitar cada ciudad una sola vez y regresar de tal manera que la distancia total recorrida sea mínima.”

De la formulación propuesta por Flood, nacen variaciones como el TPS generalizado en (1959) con Dantzig, G. B., and Ramser; trabajo en el cual se modela el despacho de combustible a través de una flota de camiones a diferentes estaciones de servicio, desde una terminal.

Según Carrillo Mediorreal (2014):

“Dentro de la literatura se pueden encontrar diferentes modelos del VRP, adicionalmente existen diferentes tipos de problemas que se encuentran determinados por los valores que pueden tomar los parámetros o variables que componen el problema”

4.2.1 PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO (TSP).

El TSP es uno de los problemas clásicos de optimización, se formula de la siguiente manera. Un agente viajero, partiendo de su ciudad de origen, debe visitar exactamente una vez cada ciudad de un conjunto de ellas (previamente especificado) y retornar al punto de partida. Un recorrido con estas características es llamado dentro de este contexto un *tour*. El problema consiste en encontrar el tour para el cual la distancia total recorrida sea mínima. Se asume que se conoce, para cada par de ciudades, la distancia entre ellas.(Velarde & Mercado, 1999).

4.2.2 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR DE EMPAQUETAMIENTO EN COMPARTIMENTOS (BPP).

El problema consiste en embalar un conjunto de objetos en varias cajas o contenedores tal que el peso o el volumen total no exceda un valor máximo de las cajas. De una manera precisa, definimos un problema de empaquetamiento en compartimentos (BPP, bin packing problem) como sigue. Tenemos un conjunto finito de artículos en cada uno de los cuales tienen un peso w y una restricción de precedencia entre estos, incurriendo en un costo c_{ij} (tal vez infinito). Posteriormente definimos un grupo ordenado para ser un subconjunto de artículos de modo que el peso total del grupo pedido no exceda la capacidad de la caja y ningún costo entre los artículos adyacentes en el grupo sea infinito. (Daza et al., 2009).

4.2.3 PROBLEMA DE M AGENTES VIAJEROS, m-TSP.

El problema de los m agentes viajeros o m-TSP es una generalización del TSP en la cual se tienen un depósito y m vehículos o agentes. El objetivo es construir exactamente m rutas, una para cada vehículo o agente, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos o agentes. Cada ruta debe comenzar y terminar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes, esto se determina mediante la solución de BPP. (Daza et al., 2009)

4.2.4 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON CAPACIDAD LIMITADA (CVRP).

El problema tradicional CVRP (por sus siglas en inglés Capacitated Vehicle Routing Problem o Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada) puede ser descrito en su forma más sencilla como una flota de vehículos con capacidades uniformes que tiene que satisfacer la demanda de un grupo de clientes a través de un conjunto de rutas que empiezan y terminan en un almacén común y que representan el menor costo posible, así como la identificación del orden de visita a los mismos. (Orrego Cardozo et al., 2016).

4.2.5 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON FLOTA HETEROGENEO (MULTIPLE TYPES OF VEHICLES).

Esta variación consiste que los diferentes vehículos que conforman la flota difieren en equipamiento, capacidad, antigüedad, estructura de costos y nivel de emisiones, deben establecer un conjunto de rutas cada uno iniciando y terminando en el centro de distribución visitando una sola vez a cada cliente, haciendo que la demanda total de la ruta no sobrepase la capacidad del vehículo y se minimice los costos asociados a la distribución. (Gendreau et al., 1999)

El HVRP es una variante del VRP que puede ser definido mediante un grafo $G = (V, A)$ un grafo dirigido donde $V = \{V_0, V_1, \dots, V_n\}$ es el conjunto de vértices y $A = \{(V_i, V_j) : V_i, V_j \in V, i \neq j\}$ es el conjunto de arcos. El vértice V_0 representa un depósito en el cual se encuentra una flota de vehículos mientras los otros vértices representan los clientes.

Cada cliente V_i tiene asociada una demanda q_i . Con cada arco (V_i, V_j) viene asociada una matriz de distancia.

4.2.6 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON DESPACHO Y RECOLECCIÓN (VRPPD).

El problema de ruteo de vehículos con despacho y recolección es un VRP en el cual existe la posibilidad de que los clientes devuelvan productos. Es usual considerar algunas restricciones del problema, como son, todos los productos que se despachan vienen de la bodega, y todos los productos que se devuelven deben ser enviados a la bodega, es decir, no se permite el intercambio de productos entre los clientes. Otra alternativa es relajar la restricción que hace alusión a que todos los clientes deben ser visitados exactamente una vez. (Carrillo Mediorreal, 2014).

4.2.7 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON ENTREGA DIVIDIDA (SDVRP).

SDVRP es una relajación del VRP donde está permitido que el mismo cliente pueda ser servido por diferentes vehículos, si esto reduce el costo total. Esta relajación es muy importante si los tamaños de las órdenes de los clientes son muy grandes en comparación con la capacidad de los vehículos. (Carrillo Mediorreal, 2014).

4.2.8 PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON FLOTA PROPIA Y SUB-CONTRATADA (VRPPC / MDVRPPC).

Según Toro Ocampo (2016):

“Tanto la entrega de mercancías y/o servicios; la recolección de productos para los centros de acopio se constituyen en un problema práctico dentro de la gestión logística. Cuando se presentan fluctuaciones de la demanda relacionada con aumentos inesperados de la misma o reparaciones y mantenimiento de la flota disponible, hacen que la flota propia de vehículos sea incapaz de atender los requerimientos de sus clientes, entonces surge la necesidad de disponer de una flota subcontratada. Con base en ello han aparecido en la literatura del VRP variantes como VRPPC y MDVRPPC.”

Asimismo Klinecicz et al., (1990) plantean la decisión del tamaño y composición de la flota de vehículos que debe atender los clientes como una decisión estratégica que se debe tomar de forma periódica, donde se determina si se mantiene la flota propia o se emplea una empresa externa de entrega de mercancías. También se considera el uso de una combinación de ambas opciones, para determinar el tamaño de la flota propia y la asignación específica a cada sector. El modelo considera un área geográfica dividida por sectores con demandas diarias aleatorias y atendidas por un único depósito.

4.3 TÉCNICAS DE SOLUCIÓN.

4.3.1 TÉCNICAS HEURÍSTICAS.

Según Carrillo Mediorreal, (2014):

Los métodos heurísticos realizan una exploración relativamente limitada del espacio de búsqueda y por lo general producen soluciones de buena calidad dentro de los tiempos de computación modestos.

Asimismo, Orrego Cardozo (2016) definen lo siguiente:

- **Heurísticas constructivas.**
Entre estas se encuentran frecuentemente el método del ahorro o Clark & Wright, el vecino más cercano (aleatorio o no), inserción menos costosa, inserción del más lejano, algoritmo goloso, entre otras.
- **Heurísticas de dos fases.**
Estas técnicas, parten de un problema y una solución “vacía” para que a partir de ella se pueda construir una solución factible, pero que casi nunca resulta óptima. Para la obtención de la solución, las heurísticas de dos fases dividen al problema de VRP en dos etapas: una de asignación de clientes a vehículos y otra para la determinación del orden de visita a dichos clientes. Existen luego dos grandes grupos de solución, y a los cuales pertenecen diversos métodos específicos; dichos grupos son los de agrupar primero y rutear después, o los de rutear primero y asignar después.
- **Heurísticas de mejora iterativa.**
Una vez que se tiene una solución para un problema VRP, se puede intentar mejorar mediante algún procedimiento de búsqueda local. Para cada solución O se define un conjunto de soluciones vecinas $P \& O \pm$. Un procedimiento de búsqueda local parte de una solución O la reemplaza por una solución $O' \in P \& O \pm$ de menor costo y repite el procedimiento hasta que la solución no pueda ser mejorada. Al terminar, se obtiene una solución localmente óptima respecto a la definición de la vecindad. Entre ellas se encuentran:
R-intercambio, el operador or-opt, operadores string exchange y string relocation, GENI y GENIUS, transferencias cíclicas, intercambios r-opt, mecanismos unstringing y stringing (US).

4.3.2 TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS.

De la misma forma Carrillo Mediorreal (2014) define:

Una metaheurística es un conjunto de conceptos que se pueden utilizar para definir los métodos heurísticos que se pueden aplicar a una amplia serie de diferentes problemas. En otras palabras, una metaheurística puede ser vista como un marco algorítmico general que se puede aplicar a diferentes problemas de optimización con relativamente pocas modificaciones para que sean adaptados a un problema específico.

- **Métodos de exploración poblacional.**
Entre los principales métodos basados en manejo de poblaciones se encuentran: algoritmos genéticos (variación Chu-Beasley), algoritmos meméticos, optimización mediante cúmulo de partículas (Swarm), optimización por colonia de hormigas. (Orrego Cardozo et al., 2016)
- **Métodos de búsqueda local.**

Su principio de funcionamiento de base parte del hecho que hay una solución inicial realizable y a esta se le aplican una serie de modificaciones locales a la solución. Entre tanto, dichas modificaciones mejoren el objetivo del problema en estudio. Entre los principales métodos de búsqueda local se encuentran: búsqueda local simple, búsqueda local múltiple, recocido simulado, Búsqueda de Vecindario Variable (VNS), Búsqueda de Vecindario Variable Descendente (VND), métodos de búsqueda con tabúes (simples y probabilísticos). (Orrego Cardozo et al., 2016).

4.3.3 TÉCNICAS EXACTAS (PLE).

Los algoritmos exactos son aquellos que siempre producen una solución óptima. Dichas técnicas no son adecuadas en aplicaciones que requieren soluciones rápidas o que tratan de resolver instancias de problemas muy grandes. Debido a la naturaleza NP del problema VRP, la búsqueda exhaustiva de estas técnicas no resulta eficiente computacionalmente. Entre las que se encuentran: Branch & Bound, Branch & Cut, Branch & Cut & Price y la programación dinámica.(Orrego Cardozo et al., 2016).

5 MARCO METODOLÓGICO

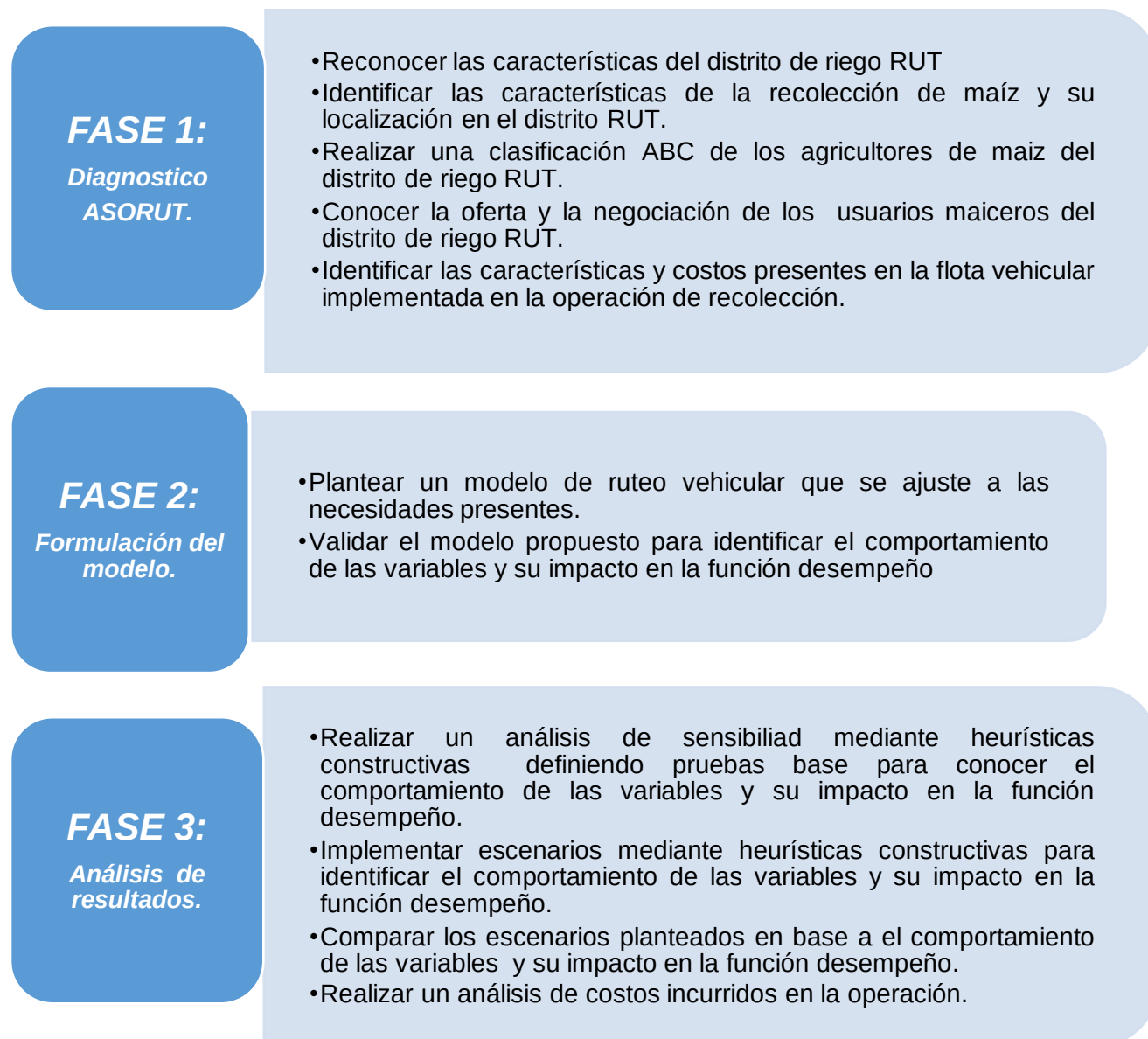
En el desarrollo del trabajo de investigación se indagaron las bases teóricas del problema de ruteo de vehículos, se realizó una revisión y análisis de la literatura para obtener una perspectiva sobre el estado en que se encuentra la problemática del caso de estudio. Al realizar una búsqueda correlacionada con trabajos de autores que realizaron aportes significativos enfocados en el problema de ruteo vehicular se pudo identificar contribuciones y asistencias orientadas al modelo del problema de ruteo vehicular clásico TSP con capacidades vehiculares heterogéneas.

Como inicio para la primera fase se realizó un diagnóstico del sistema actual de la empresa con respecto a problemática de recolección del maíz dentro del distrito. Se evidenció la ausencia de un protocolo de recolección por parte de la empresa para los usuarios; se obtuvo información acerca de los procesos y actividades de transporte, recolección, siembra y cosecha, dicha técnica se realiza de manera particular. Se compilaron datos significativos dentro de la entidad, de los cuales podemos destacar información como la identificación de todos los predios con sus respectivos propietarios o cultivadores pertenecientes a la zona, el área sembrada de cada predio de maíz, los vehículos utilizados para el transporte del maíz, el proceso de siembra, ciclo vegetativo, características del maíz y las particularidades dentro de las zonas cultivadas. La recolección de estos datos se obtuvo gracias a la colaboración directa de la empresa para el caso de estudio, mediante esta información se procedió a trabajar para obtener un análisis pertinente; en el proceso de geolocalización y estructuración cartográfica se utiliza un software con un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto llamado QGIS versión 3.10 el cual tiene como objetivo funcional, dar una concepción gráfica del distrito RUT, donde se identifican y se incorporan sus particularidades como: dimensiones, divisiones, canales hídricos, zanjas y drenajes intercomunicadores, vías principales, subalternas y rurales, a través de capas permitiendo adaptar de manera completa el planisferio de la zona.

Para la segunda fase se plantea el modelo matemático partiendo de las características del problema con el fin de identificar que herramientas se deben utilizar, seguidamente se adaptó el modelo matemático empleando un algoritmo exacto en lenguaje de programación matemática AMPL y el solucionador AMPL IDE utilizando el solver Gurobi, esta herramienta permitió validar el modelo y observar escenarios con determinado número de predios y distintas capacidades vehiculares, el simulador arrojó datos como la función objetivo, las rutas para cada uno de los vehículos, las distancias y tiempos de recorrido para cada ruta y la cantidad de maíz a recolectar.

Para la tercera y última fase se opta por implementar el algoritmo de los ahorros o Clark & Wright debido a la complejidad que presenta el problema; la Heurísticas constructiva proporciona resultados óptimos, para esto se utilizó el desarrollador de software de código abierto Anaconda y el solucionador Spyder (Python3.8); seguidamente se realiza un análisis económico teniendo en cuenta los costos utilizados en la operación de transporte. A continuación se presenta la figura 1 donde describe la metodología que contiene las actividades a realizar para la evaluación sistémica del análisis de escenarios en el comportamiento de ruteo vehicular del distrito de riego RUT.

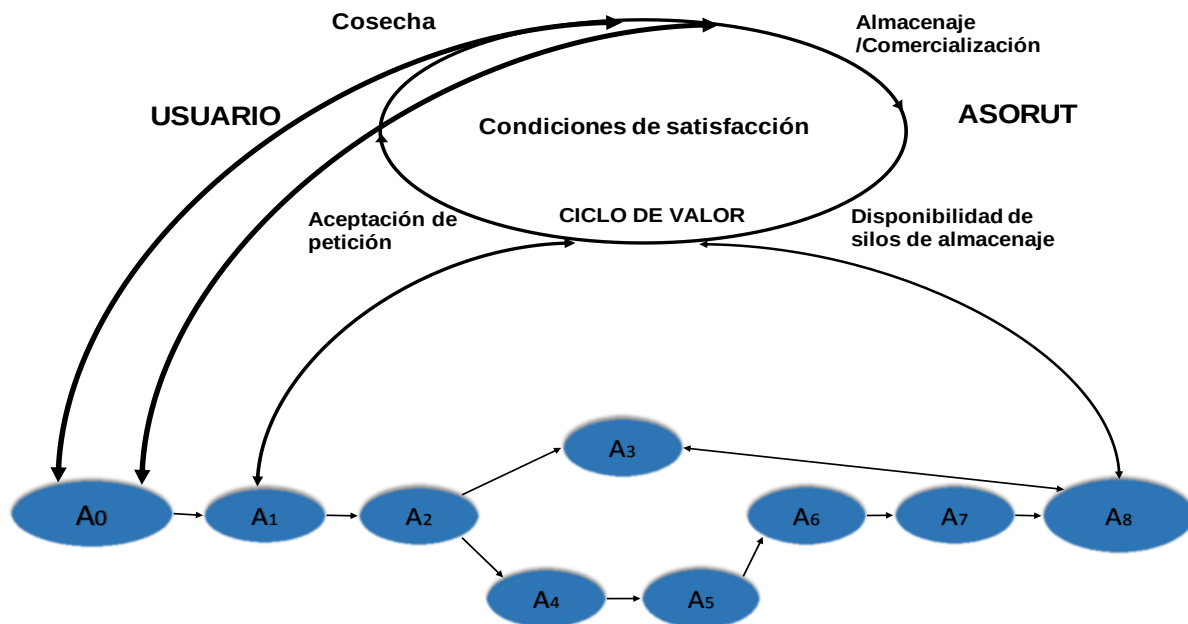
Figura 1: Metodología propuesta para la evaluación sistémica del análisis de escenarios en el comportamiento de ruteo vehicular del distrito de riego RUT.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1 FASE 1: DIAGNOSTICO ASORUT.

Figura 2: Proceso actual de recolección de maíz en el distrito RUT.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

A continuación, se describen las etapas del proceso actual de recolección de maíz en el distrito RUT

- ✓ **A0:** En esta etapa inicia la siembra del maíz de los usuarios del distrito de riego RUT
- ✓ **A1:** Los usuarios asociados realizan la cosecha del maíz y proporcionan las condiciones para el transporte empacando el maíz en bultos de 50 kilos
- ✓ **A2:** Durante esta etapa los usuarios analizan las condiciones del mercado y establecen si almacenan el maíz o es comercializado a intermediarios y empresas.
- ✓ **A3:** La implicación de esta fase, es de convenio informal ya que el usuario vende el maíz a intermediarios o empresas.
- ✓ **A4:** Durante esta etapa si las condiciones no favorecen la rentabilidad de la cosecha del usuario se realiza la petición de recolección del maíz, para ubicar el producto en los silos del almacenaje.
- ✓ **A5:** La empresa ASORUT analiza la petición del usuario y conforme a la cantidad de maíz a recoger se preparan los vehículos disponibles para la recolección.
- ✓ **A6:** El propósito de esta fase es garantizar la disponibilidad de los silos de almacenaje.
- ✓ **A7:** En esta fase se realiza la recolección del maíz de los usuarios de manera empírica en base a criterios propios.
- ✓ **A8:** Finaliza la recolección de maíz del distrito de riego RUT.

5.1.1 DISTRITO DE RIEGO RUT.

ASORUT es como sus siglas lo indican, una asociación de usuarios del distrito de adecuación de tierras de los municipios Roldanillo, La Unión y Toro, cabildos pertenecientes al norte del departamento del Valle del Cauca. Es una empresa sin ánimo de lucro, auspiciada por el gobierno nacional de la república colombiana, su funcionalidad principal consiste en el suministro de aguas para riego, drenaje y control de inundaciones a lo largo del distrito RUT, tuvo origen a finales del año 1966, como medida de solución a la recuperación de la zona plana de los municipios anteriormente mencionados, zona que estaba sujeta a frecuentes inundaciones y derrumbamientos hidrográficos causados por el caudal del río Cauca, el cual demarcaba la región.

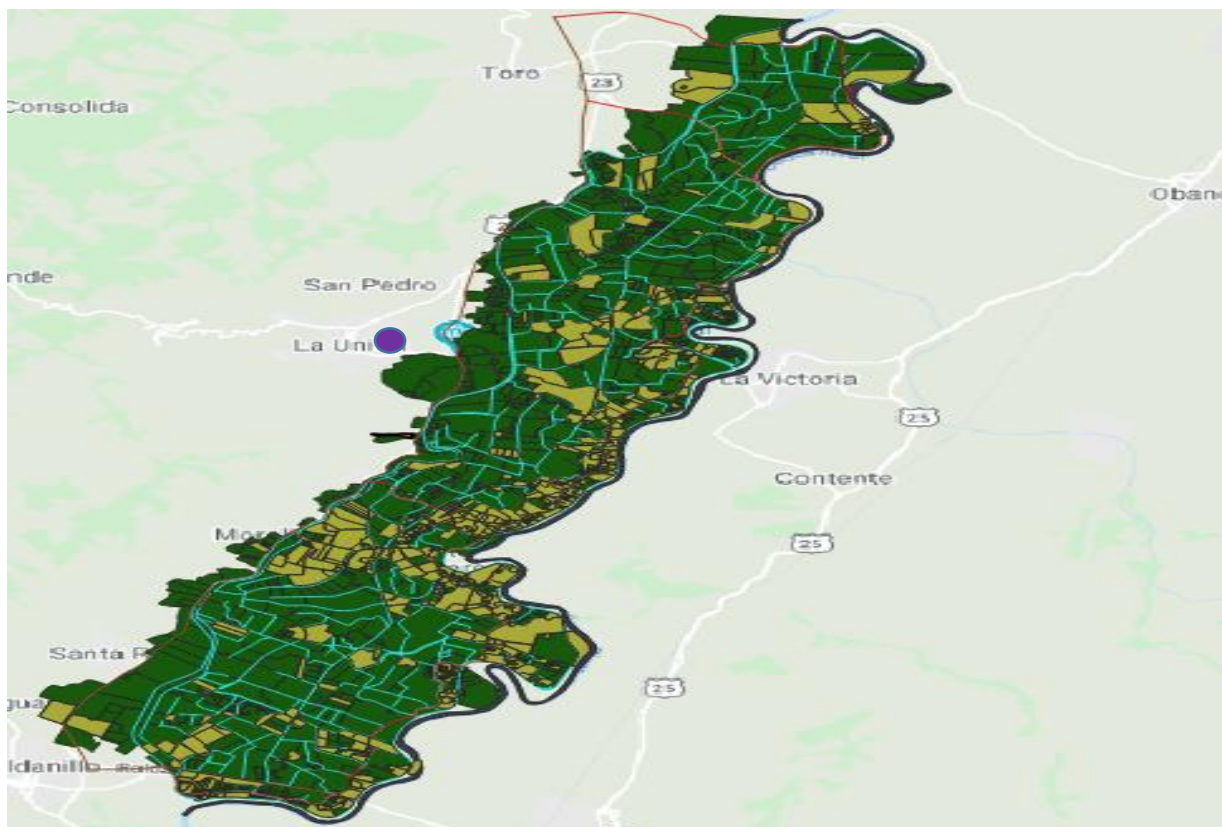
En la actualidad el Distrito de riego RUT está al servicio de todos los campesinos erradicados en la zona plana del departamento del valle del cauca entre los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro, cuenta con alrededor de 151 familias que se dedican a la producción de maíz en 534 predios; las características de los suelos, el entorno y un protocolo de manejo adecuado proporcionan todas las condiciones viables para la siembra de frutas, cereales y hortalizas, de igual modo también cumple con los requerimientos para una buena producción pecuaria, siendo así una zona diversificada en cuestión a su utilidad. El distrito cuenta con un perímetro denotado en 10.256,23 hectáreas, el 21,23% de esta área está constituida por cultivos de maíz, lo que corresponde a un total de 2.180,36 hectáreas que anualmente disminuyen por los monocultivos de la caña de los ingenios azucareros.

5.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RECOLECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE MAÍZ DE LOS USUARIOS DEL DISTRITO DE RIEGO RUT

La recolección del maíz de los usuarios del distrito de riego se realiza conforme a la petición del propietario de la cosecha, en base a la decisión que toma el dueño si comercializa el producto o lo almacena; si acuerdan la petición de recolección con la empresa; se analiza la cantidad a recolectar y observa la disponibilidad de su flota vehicular y centro de acopio (silos) para satisfacer la necesidad.

Para la localización de los predios dentro del distrito, se utilizó el software de información geográfica QGIS, generando un mapeo general de toda el área, proyectando las características cartográficas de la zona y clasificando los cultivos que se utilizaron en el proyecto. Allí se pudieron constatar diferentes capas para unificar un mapa generalizado, donde se pueden distinguir los diferentes componentes en el distrito como se evidencia en la ilustración 2. El software de georreferenciación nos permite calcular los centroides de cada predio con el fin extraer las coordenadas geodésicas más ajustadas a la realidad y así determinar las distancias y tiempos entre predios (nodos).

Ilustración 2: Demarcación y catalogación de los predios zona RUT.



Fuente: Elaboración propia (QGIS 3.14.) 2021.

La ilustración 2 muestra la visualización gráfica de la totalidad de los predios que conforman el distrito de riego RUT, equivalentes a 10,256.23 hectáreas. Las áreas de color verde delimitan los predios pertenecientes al distrito con una explotación diferente a la del cultivo de maíz, allí se encuentra una variedad de cultivos como frutas, hortalizas, verduras y algunos con fines pecuarios. El color marrón hace referencia a los predios cultivados únicamente y específicamente en maíz, los cuales fueron tomados en cuenta para la investigación del trabajo, estos predios corresponden a 2180,36 hectáreas aproximadamente; de igual manera, con una figura circular y de color morado al costado izquierdo, lado centro de los lotes, se indica el predio perteneciente a la empresa, que tiene como fin ser el punto de localización para el centro de acopio y almacenamiento de las materias primas. También, se observa un enlace de líneas a lo largo del área total, que interceptan todos los predios y están de diferentes colores, las líneas azules pertenecen al dren principal del distrito, las líneas rojas representan las vías panamericanas que atraviesan la zona, la línea violeta que bordea los predios hace referencia al río Cauca y algunas líneas de color negro delimitan las vías rurales del distrito.

5.1.3 CLASIFICACIÓN ABC DE LOS AGRICULTORES.

Luego de realizar un análisis a los datos obtenidos para el desarrollo del estudio, se determinaron las ofertas de cada predio acorde al promedio por hectárea. Con el fin de acotar el alcance del estudio, se procedió a realizar una clasificación ABC, dependiendo de la cantidad ofertada por lote.

En la Tabla 1, se observa una parte de los resultados obtenidos en dicha clasificación, cuyo análisis detallado se encuentra en el Anexo 1, el cual presenta la clasificación completa, con sus respectivos porcentajes de participación para cada categoría y el número de predios clasificados para cada zona. Los predios registrados en la zona A corresponden a los que tienen un impacto relevante en la empresa puesto que son los que presentan una oferta mayor en maíz y que además la frecuencia de cultivos renovados es más constante.

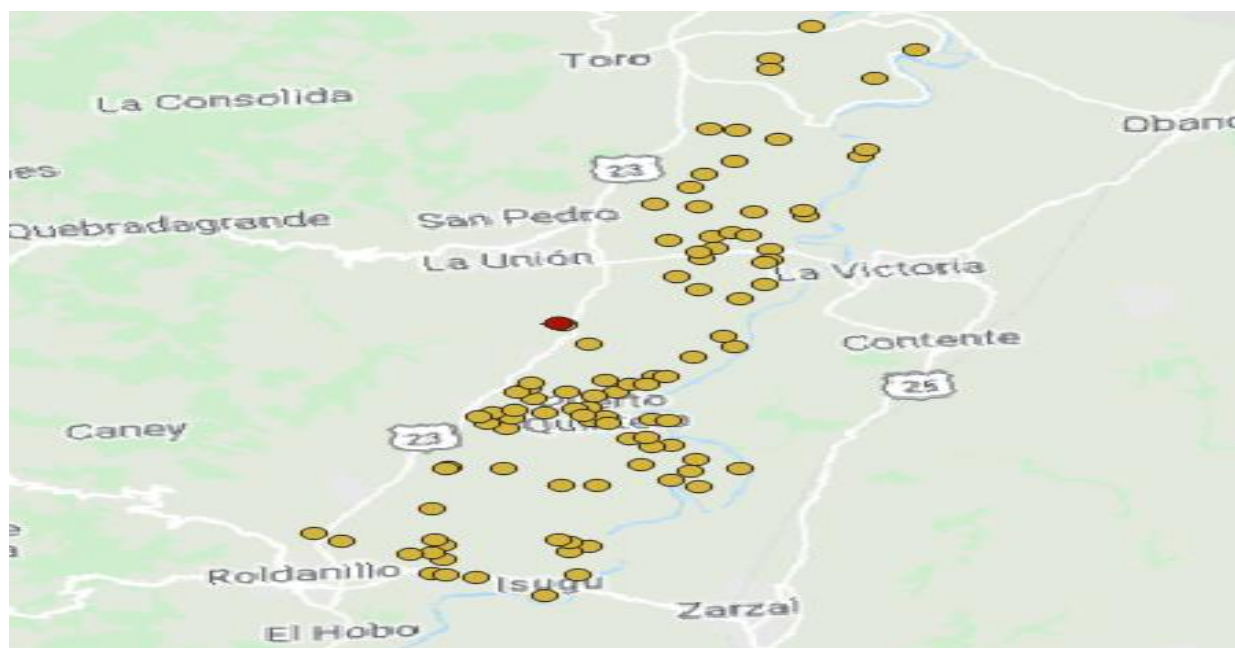
Tabla 1: Clasificación ABC de los predios cultivados en maíz de la empresa ASORUT.

<i>Zona</i>	<i>Cantidad de Predios</i>	<i>% Predios</i>	<i>% Participación de predios acumulada</i>	<i>% de Oferta</i>	<i>participación de oferta acumulada</i>
A	95	18%	18%	64,92%	64,92%
B	171	32%	50%	25,02%	89,94%
C	268	50%	100%	10,06%	100,00%
	534	100%		100%	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

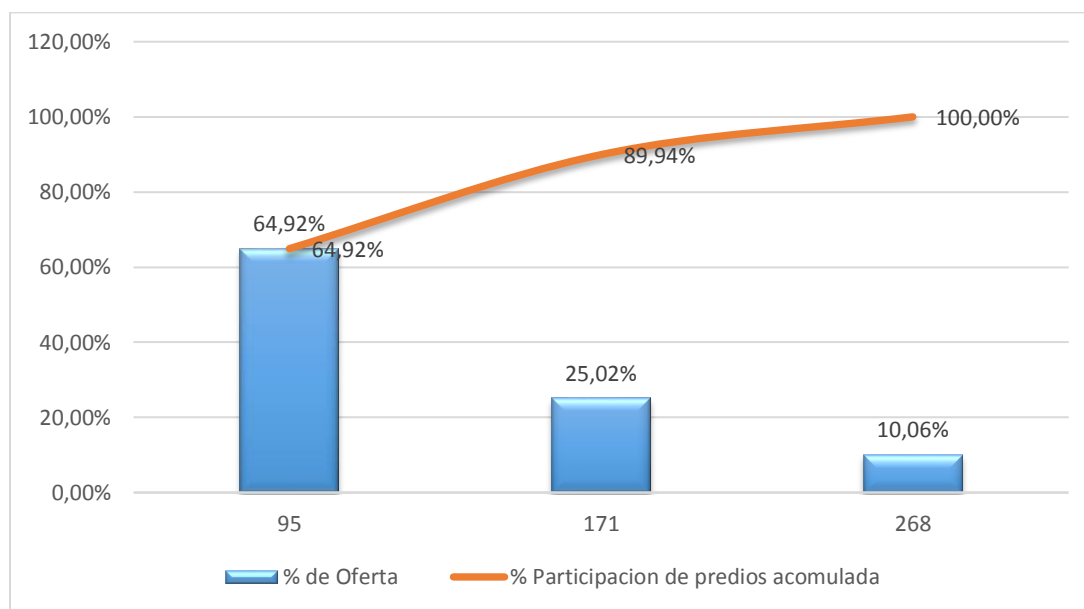
En la ilustración 3, se aprecian los 95 clientes clasificados en la zona A, aquellos con los que se desarrolló el estudio para el proyecto, cabe resaltar que el canal tradicional comprenden los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro para la recolección del maíz en la empresa ASORUT, además cuenta con 439 predios, que representa un 82% de los predios totales cultivados en maíz en el distrito de riego RUT.

Ilustración 3: Predios categorizados en la zona A.



Fuente: Elaboración propia, (QGIS 3.14.) 2021.

Figura 3: Clasificación ABC de la oferta de los predios cultivados en maíz de la empresa ASORUT.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.4 OFERTA Y NEGOCIACIÓN DE LOS USUARIOS DEL DISTRITO DE RIEGO RUT.

La producción de maíz dentro del distrito de riego RUT se genera de manera escalonada cada mes del año, con una producción promedio entre 4 y 5 toneladas por hectárea presentando una variación por diversas condiciones tanto ambientales como por plagas, aun así sigue siendo considerado el mejor maíz dentro de una escala a nivel nacional y ocupando primeros lugares a nivel mundial. En el anexo 2 se define la oferta diaria de cada mes para los predios categorizados en la zona A de la clasificación anteriormente descrita.

De igual modo la recolección del maíz de los usuarios de la empresa ASORUT se realizan por medio de una vinculación entre la empresa y el agricultor como se muestra en la tabla 2, una vez se confirma la recolección del maíz, teniendo en cuenta la oferta del propietario. Se ingresan los datos a un computador para generar el recibo de alistamientos del centro de acopio (silos), el cual es generado por el sistema que maneja la empresa; estos pedidos ingresan al sistema de información los días Martes, Jueves y Sábados de cada semana hasta las 17:00 horas, etapa en la cual empieza la asignación de rutas empíricamente por parte de los encargados de recolectar el maíz; al mismo tiempo se observa la disponibilidad de vehículos necesarios para la operación, realizando la recolección en los días lunes, miércoles y viernes.

Tabla 2: Características de la vinculación de los cultivadores de maíz con la empresa ASORUT.

CONVENIO	CARACTERÍSTICA
Contratos preestablecidos.	En esta dinámica se maneja un contrato con pautas establecidas donde el comprador y el proveedor del maíz concuerdan un precio y pautan un preacuerdo con el fin de satisfacer la necesidad continua del comprador y fijar un precio sin importar las alzas o bajas en el mercado, lo que le da al vendedor una fiabilidad de venta.
Compra informal o ligadas a la oferta y la demanda.	Este tipo de acuerdo se genera a partir de la oferta y la demanda dentro del mercado, lo que significa que en medio de los precios bajos el vendedor optara por retener su producto en el centro de acopio y almacenarlo hasta conseguir un alza en los precios. Caso contrario si los precios son altos el vendedor optara por vender el maíz a intermediarios o empresas.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS.

El Distrito de riego RUT utiliza una flota heterogénea con características particulares dentro de las cuales se encuentran 5 tipos de vehículos con carrocerías cerradas con el fin de almacenar el maíz de los usuarios de la empresa, los vehículos pueden transportar distintas capacidades, teniendo en cuenta unas especificaciones que garanticen las condiciones del grano como se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3: Características y capacidad de carga de los camiones empleados en la recolección.

TIPO DE VEHÍCULO	CAPACIDAD DE PESO	LARGO CARROZABLE	CAPACIDAD DE CARGA MÁX.
NPR 175	5.350 Kg	3.815mm	106 bultos = 5.000 kg
FTR Forward Euro	10.210 Kg	7000mm	206 bultos = 10.000kg
FVR 1826	15.398 kg	7.530 mm	306 bultos = 15.000kg
WOKER 24 220	19.420 Kg	12.870 mm	388 bultos = 20.000kg
KENDWORD	25.780 Kg	17.540mm	515 bultos = 25.000kg

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.6 COSTOS DE LOS VEHÍCULOS.

La operación de transportar una carga está asociada a unos costos específicos, que se derivan del consumo de unos insumos y recursos indispensables para poder operar. De igual forma, existen recursos que no son indispensables, pero que son necesarios para brindar un servicio de alta calidad. (Páez Castillo, 2012)

Los costos relacionados con una flota de vehículos se clasifican en dos tipos:

Costos directos: son gastos en los que se incurre por la adquisición/propiedad o utilización de cualquier vehículo y se clasifican en:

1. Costos fijos.

Según Páez Castillo (2012): “Son costos asociados a la operación de transporte de carga que no se derivan de los recursos indispensables para llevarla a cabo. Estos se miden en unidad de tiempo, normalmente un año natural y se calculan Indispensablemente si el vehículo es utilizado o no”.

2. Costos variables.

Según Páez Castillo (2012): “son variables que afectan directamente a los recursos indispensables para transportar una carga. Son aquellos gastos en los que se incurren por la utilización del vehículo y se miden por los kilómetros recorridos u horas de uso.

Costos indirectos: “son los gastos que no se pueden imputar a un vehículo por su posesión y explotación, pero que se producen en la gestión de la flota de vehículos, como son el software de gestión de la flota de vehículos, el hardware, el personal involucrado en la gestión de la flota de vehículos o la infraestructura necesaria (oficinas, parking o depósitos de combustible)”. (Rueda López & Castillo Castañeda, 2019).

Tabla 4: Costos fijos de los vehículos.

Criterio	Medida	NPR 175	FTR Forward Euro	FVR 1826	WOKER 24 220	KENDWORD
Chasis+ furgón	Compra \$	\$80.000.000	\$99.000.000	\$115.000.000	\$135.000.000	\$150.000.000
Chasis	(Vida útil 18 años) anual	\$12.000.000	\$15.000.000	\$19.000.000	\$25.000.000	\$35.000.000
Sueldo chofer	900.000 anual	\$10.800.000	\$10.800.000	\$10.800.000	\$10.800.000	\$10.800.000
Matricula	Más de 3000 c.c	\$550.000	\$610.000	\$720.000	\$800.000	\$800.000
Seguro	Más 3000 c.c	\$100.000	\$1.200.000	\$1.400.000	\$1.500.000	\$1.500.000
Baterías	\$ adquisición	\$182.500	\$182.500	\$182.500	\$200.000	\$200.000
lavado	24 lavados x año	\$434.000	\$434.000	\$434.000	\$434.000	\$434.000
Costo total anual	\$	\$104.066.500	\$127.226.500	\$147.536.500	\$173.734.000	\$198.734.000
Costo total diario	\$	\$285.114	\$348.566	\$404.210	\$475.984	\$544.477

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 5: Costos variables de los vehículos.

Criterio	Medida	NPR 175	FTR Forward Euro	FVR 1826	WOKER 24 220	KENDWORD
Llantas	Precio \$ c/u	\$400.000	\$650.000	\$650.000	\$900.000	\$900.000
Utilidad	Km / Llanta	\$25.000	\$30.000	\$30.000	\$40.000	\$40.000
Valor llantas	\$ / Llanta	\$16	\$22	\$22	\$23	\$23
Cambio de aceite	\$ / cambio	\$45.000	\$60.000	\$60.000	\$80.000	\$80.000
Utilidad	Km / cambio	\$8.000	\$9.000	\$9.000	\$10.500	\$10.500
Valor cambio de aceite	\$ / Km	\$6	\$7	\$7	\$8	\$8
Gasolina	\$ / Galón	\$8.747	\$8.747	\$8.747	\$8.747	\$8.747
utilidad	Km / Galón	\$35	\$29	\$25	\$22	\$22
Valor combustible	\$ / Km	\$250	\$302	\$350	\$398	\$398
Costo total diario	\$ / Km	\$272	\$330	\$378	\$428	\$428

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.2 FASE 2: FORMULACIÓN DEL MODELO.

Como se observó en los capítulos anteriores la red de distribución contiene bastantes elementos que deben ser definidos para la escritura del modelo Vehicle Routing Problem clásico TSP con flota heterogénea. Para la escritura del modelo se debe partir de las siguientes premisas:

Para la formulación del modelo se contemplan los siguientes supuestos:

- No se considera los tiempos de demoras por tráfico.
- Los tiempos de recorrido, demanda y capacidad se consideran determinísticos.
- Cada predio debe ser atendido por un único vehículo.
- Las medidas desempeño tiene características asimétricas.
- La recolección se realiza para los días críticos.
- Se cuenta con múltiples vehículos disponibles para la recolección.

5.2.1 DEFINICIÓN DE CONJUNTOS.

- **Predios Atendidos (I)** asociadas a los índices i y j , estos predios (cultivos) serán los nodos del sistema de recolección. Se define también el centro de acopio representado en silos como el nodo inicial o nodo cero.
- **Vehículos Disponibles (V)** asociado al índice v , estos vehículos son de diferentes capacidades.

5.2.2 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE DECISIÓN.

- ✓ $X_{ij}^v = \begin{cases} 1 & \text{si el predio } i \text{ es visitado antes que el predio } j \text{ con el vehículo } v \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$
- ✓ $Y_j^v = \text{Oferta acumulada en el predio } j \text{ atendida con el vehículo } v$
- ✓ $Z_i^v = \text{Tiempo de inicio del recorrido en el predio } i \text{ con el vehículo } v$

5.2.3 DEFINICIÓN DE PARAMETROS.

Se definen los parámetros que están asociados a cada conjunto que se caracterizó en el literal anterior.

- ✓ $t_{ie_{ij}}$ tiempo que se demora un vehículo en viajar desde el predio i al predio j . (Minutos).
- ✓ dis_{ij} : distancia que recorre un vehículo en viajar desde el predio i al predio j . (km).
- ✓ oft_i oferta del predio i . (kilos).
- ✓ Ser_i tiempo de cargue en el predio i (Minutos).
- ✓ Cap capacidad de los vehículos. (kilos).

5.2.4 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.

Sea Z las distancias de recolección de los predios maiceros, se desea minimizar Z mejorando el recorrido en función a la distancia para la recolección de maíz de cada usuario.

$$\text{Min } Z = \sum_{v \in V} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} (X_{ij}^v * \text{dis}_{ij})$$

Esta expresión representa la función objetivo que busca minimizar la distancia de recorrido para la recolección de maíz de cada usuario o predio perteneciente a distrito de riego RUT

5.2.5 RESTRICCIONES.

La función objetivo se encuentra sujeta a las siguientes restricciones:

La restricción (1) garantiza que para todo predio i debe existir un arco de salida.

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in I} X_{ij}^v = 1 \quad i \neq j \quad \forall i > 0 \in I \quad (1)$$

La restricción (2) garantiza que para todo predio i debe existir un arco de llegada.

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in I} X_{ij}^v = 1 \quad i \neq j \quad \forall j > 0 \in I \quad (2)$$

La restricción (3) corresponde a los arcos de entrada de un predio o nodo, deben ser igual al número de arcos de salida, balances de flujo.

$$\sum_{j \in I} X_{ij}^v = \sum_{j \in I} X_{ji}^v \quad \forall i \in I; \forall v \in V \quad (3)$$

La restricción (4) asegura que del nodo de origen solo debe salir un arco.

$$\sum_{v \in V} X_{0j}^v = 1 \quad \forall v \in V \quad (4)$$

La restricción (5) asegura que al nodo de origen solo debe llegar un arco.

$$\sum_{v \in V} X_{j0}^v = 1 \quad \forall v \in V \quad (5)$$

La restricción (6) calculan el tiempo de inicio de cargue del vehículo v en el predio i.

$$Z_i^v + Ser_i + tie_{ij} \leq M * (1 - X_{ij}^v) + Z_j^v ; i \neq j ; i > 0 ; \forall v \in V ; \forall i \in I ; \forall j \in J \quad (6)$$

La restricción (7) calcula el tiempo de llegada al nodo origen.

$$0 + tie_{0j} \leq M * (1 - X_{0j}^v) + Z_j^v ; \forall v \in V ; \forall j \in J \quad (7)$$

La restricción (8) calcula la oferta acumulada que debe ser cargada a cada vehículo v antes de iniciar la ruta.

$$Y_i^v + oft_i \leq M * (1 - X_{ij}^v) + Y_j^v \quad i \neq j ; i > 0 ; \forall v \in V ; \forall i \in I ; \forall j \in I \quad (8)$$

La restricción (9) garantiza que la oferta acumulada debe ser mayor a la oferta del Predio i asignado al vehículo v.

$$Y_i^v \geq oft_i * \sum_{j \in I} X_{ji}^v \quad i \neq j ; i > 0 ; \forall v \in V ; \forall i \in I \quad (9)$$

La restricción (10) garantiza que la oferta acumulada no sobrepase la capacidad del vehículo v asignado a la ruta.

$$Y_i^v \leq Cap * \sum_{j \in I} X_{ji}^v \quad i \neq j ; i > 0 ; \forall v \in V ; \forall i \in I \quad (10)$$

El conjunto de restricciones (11) define el dominio de las variables de decisión X_{ij}^v , Y_j^v y Z_i^v .

$$X_{ij}^v \in \{1,0\} ; Y_j^v > 0 \in Z ; Z_i^v > 0 \quad (11)$$

5.2.6 VALIDACIÓN DEL MODELO.

Una vez definido el modelo se procede a realizar la validación para una instancia menor a la del problema original, con el fin de verificar que el problema se pueda resolver con la formulación del código del capítulo anterior y así analizar la complejidad del mismo ajustándose a las necesidades presentes y proporcionando rutas óptimas para la recolección del maíz de los usuarios del distrito de riego RUT, dicha evaluación se realizó en un equipo con procesador Intel Core i5, con 8 GB de Memoria RAM, disco duro de 1 TB y sistema operativo Windows 10 Pro de 64 Bits.

5.2.6.1 Prueba para validación del modelo.

Para dar solución al modelo matemático planteado, se programó el modelo, utilizando el entorno de desarrollo académico AMPL IDE para dar un resultado óptimo; inicialmente se programó la corrida con una instancia de los primeros 20 predios categorizados en la zona A y las ofertas de los días críticos para el mes de enero; se utiliza con 2 vehículos de distintas capacidades correspondiente a 25.000 y 15.000 kilos, suministrando los datos que se observan en la tabla 6.

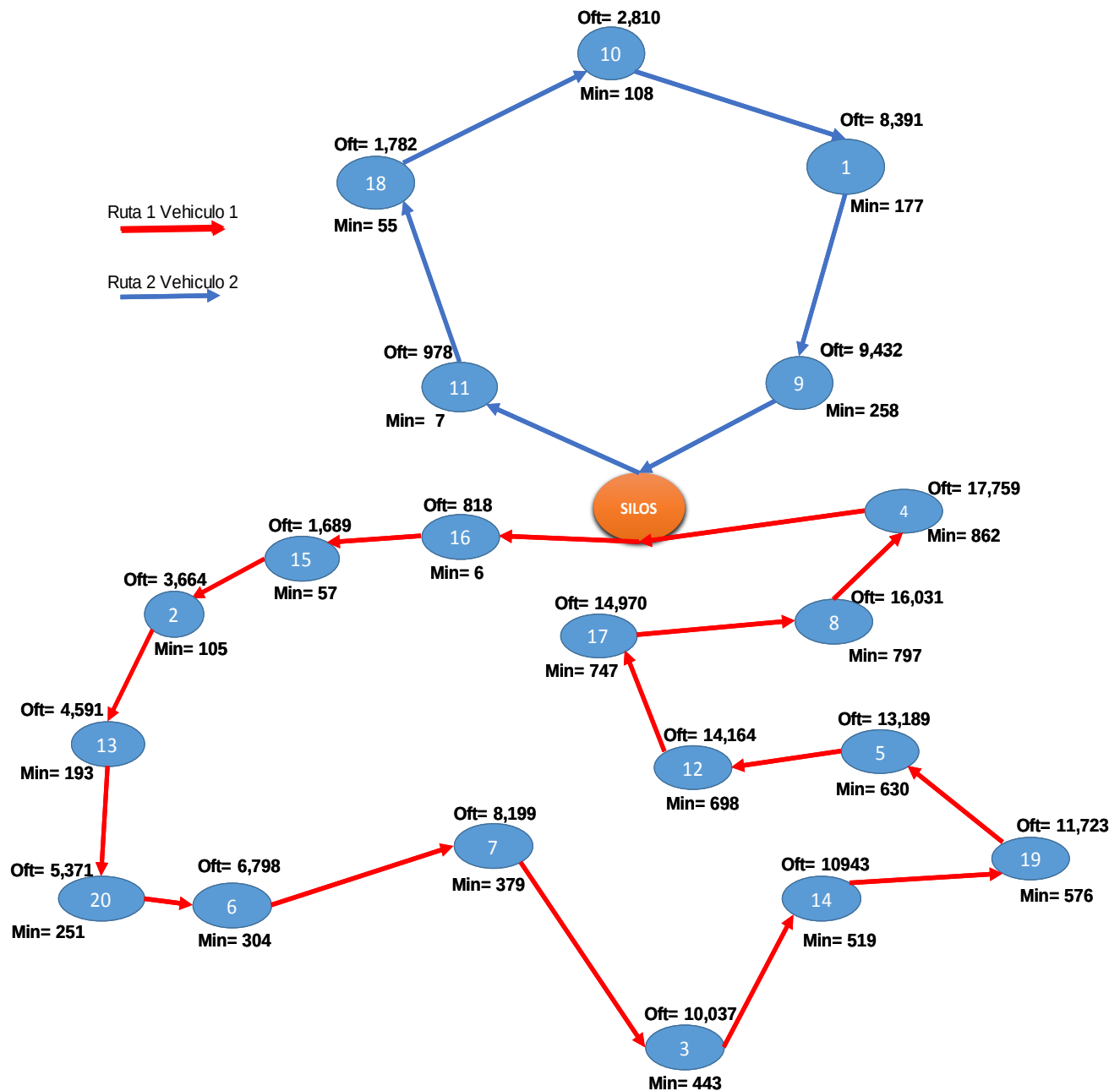
Tabla 6: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, validación del modelo.

	F.O	CAPACIDAD .VEH	SECUENCIA DE RUTAS PARA PREDIOS		MIN/ RECORRIDO	KILOS/RUTA
<u>20</u>	84	VEH.1 25 ton	RUTA 1/ VEH.1	0-16-4-15-2-13-20-6-7-3-14-19-5-12-17-8-4-0	862	17.759
		VEH.2 15 ton	RUTA 2/ VEH 2	0-11-18-10-1-9-0	258	9.432

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Luego de programar el modelo en AMPL y utilizar el entorno de desarrollo académico AMPL IDE empleando el solver GUROBI para dar solución a la asignación de rutas, después de 31.086.870 iteraciones simplex la función objetivo para la validación tiene un valor de 84 kilómetros de recorrido. Con un tiempo total de transporte de 862 y 258 minutos para los vehículos. Incluyendo el tiempo de servicio para cada nodo, se utilizaron 2 vehículos con una capacidad heterogénea de 515 y 306 unidades, los tiempos de recorrido y la oferta a recolectar desde que sale del centro de acopio, hasta atender a cada predio y regresar nuevamente para cada uno de los vehículos es diferente, como se puede evidenciar en la figura 4.

Figura 4: Diagrama de rutas para 20 predios, validación modelo.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se intentó realizar una validación con una instancia de 50 predios y 5 vehículos disponibles para la recolección, pero después de dejar correr el modelo por más de 24 horas no se encontró solución factible y el proceso debió ser finalizado de manera abrupta. Por lo tanto se implementa una Heurísticas constructiva el método del ahorro o Clark & Wright para dar una solución al problema de recolección de maíz para los 95 predios catalogados en la zona A y así analizar escenarios y observar su comportamiento en la función de desempeño.

5.3 FASE 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS (método de los ahorros Clark & Wright)

Debido a la complejidad del problema para brindar una solución óptima para la ruta de recolección de los 95 predios, se programó el algoritmo implementando el solucionador Spyder (Python 3,8) Anaconda. Utilizando las coordenadas geodésicas que se encuentra en el anexo 5, los resultados proporcionados ayudaron a identificar la secuencia de rutas para cada predio y la oferta correspondiente a recolectar.

5.3.1 PRUEBA BASE.

Para demostrar que el modelo solventa el problema inicialmente planteado y proporciona una solución óptima para la ruta de recolección de los 95 predios, se realiza una prueba base para los predios categorizados en la zona A de la clasificación ABC anteriormente definida; con 4 vehículos de distintas capacidades, los datos suministrados se observan en la tabla 7:

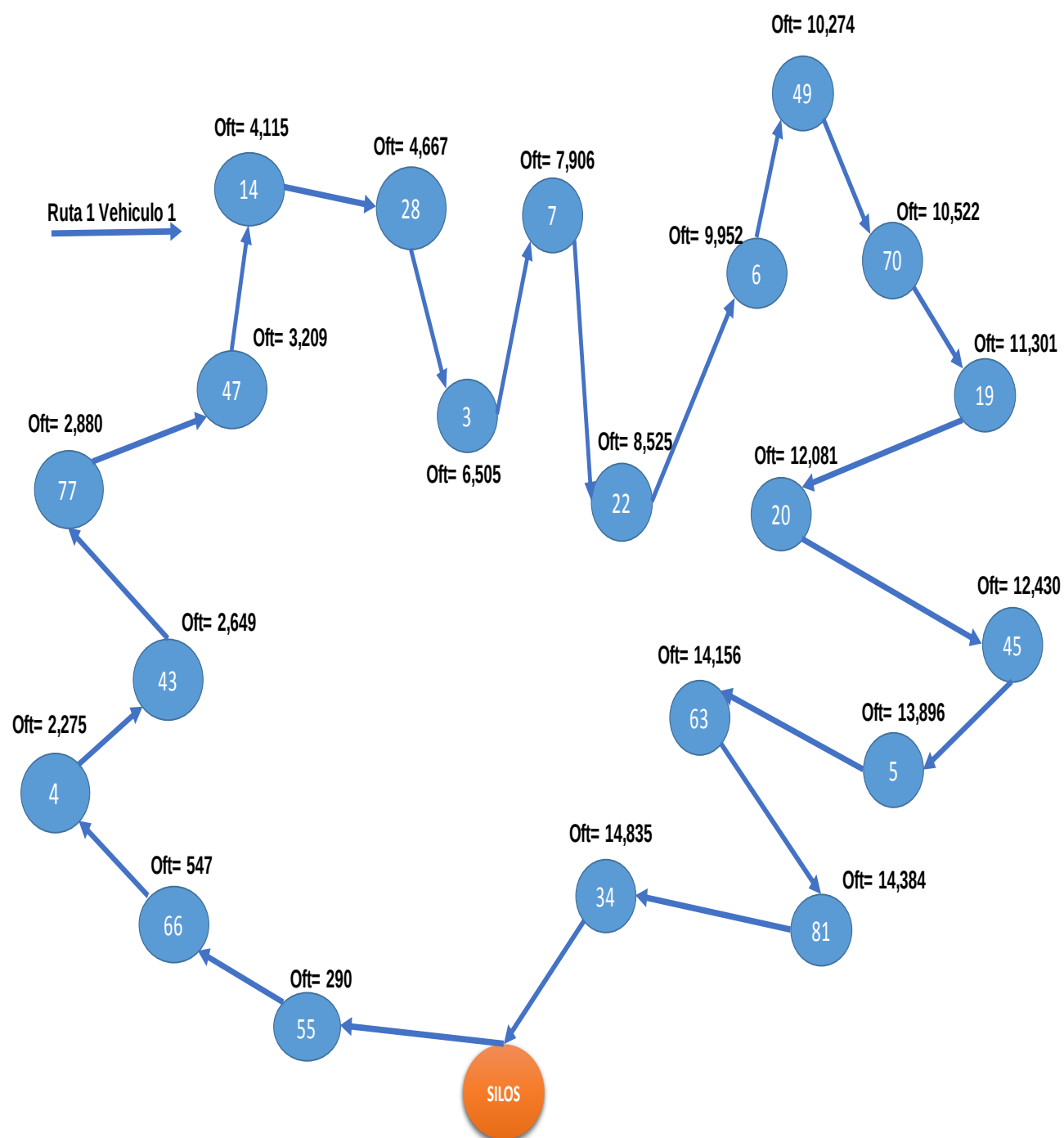
Tabla 7: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, prueba base.

	F.O	CAP VEH.	SECUENCIA DE RUTAS PARA PREDIOS		KILOS/RUTA
<u>95</u>	154,09	VEH.1 15 ton	RUTA 1 / VEH.1	0-55-66-4-43-77-47-14-28-3-7-22-6-49-70-19-20-45-5-63-81-34-0	14.835
		VEH.2 15 ton	RUTA 2 / VEH.2	0-80 -61-56-67-89-23-38-74-93-35-95-32- 50-40-33-1-9-71-53-31-84-41-73-92-75-10-0	14.943
		VEH.3 15 ton	RUTA 3 / VEH.3	0-65-79-83-86-94-58-51-85 -60-39- 36-27-11- 89-29-30- 24- 16-18-76 -26-72- 2-25-54- 59- 15-37-69- 48-90-46-91-78-0	14.979
		VEH.4 10 ton	RUTA 4 / VEH.4	0-13-87-68-17-52-12- 42-21-44-82-8-62-64-57-0	7.067

Fuente: Elaboración propia, 2021.

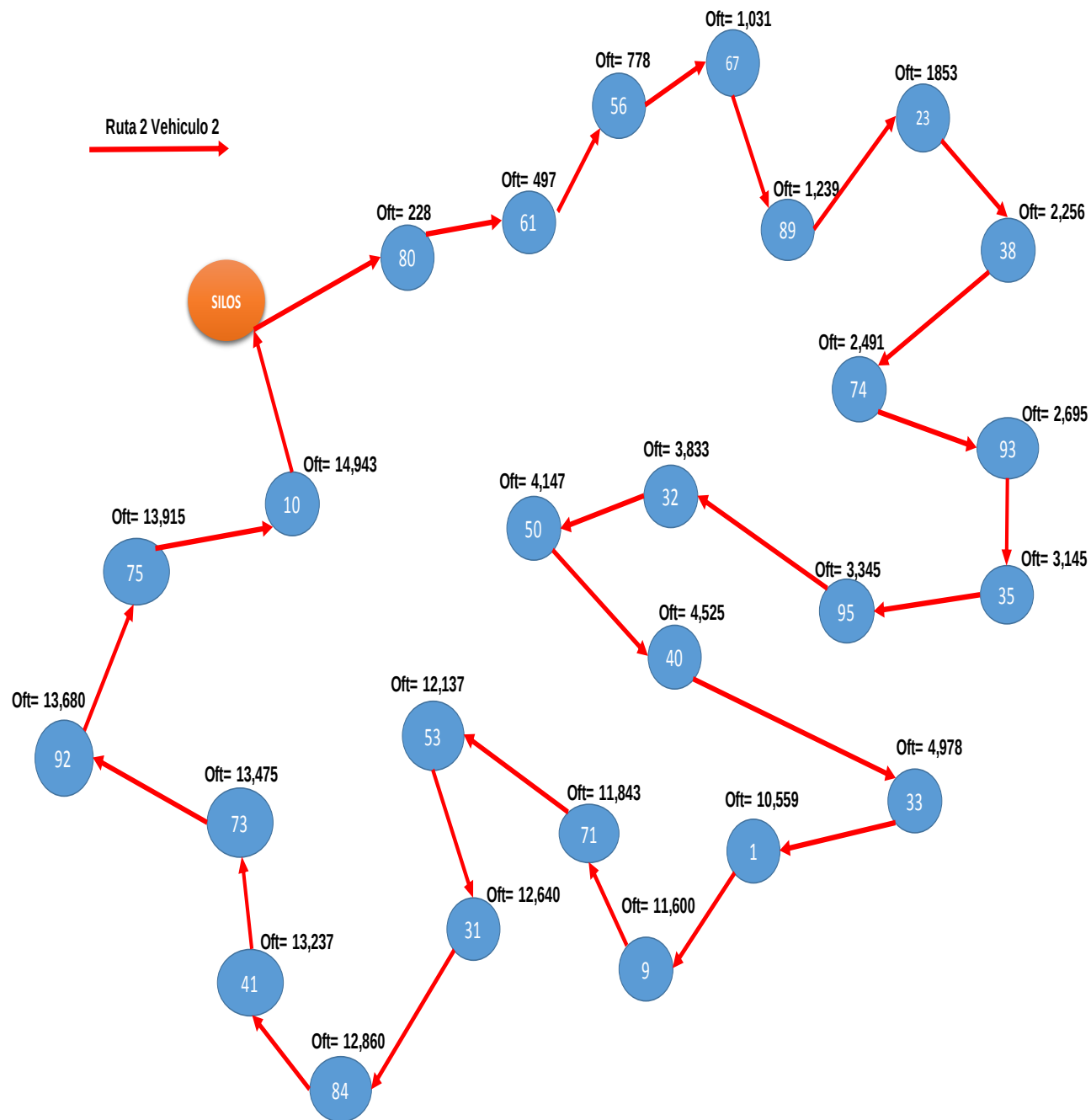
Como se puede evidenciar en la tabla 7, los resultados proporcionados muestran la secuencia de rutas y la oferta a recolectar para 4 vehículos con flota heterogénea; los vehículos visitan en su totalidad los 95 predios, partiendo del centro de acopio para atender a cada usuario y regresar nuevamente, la oferta acumulada para cada uno de los vehículos es diferente y su función objetivo tiene un valor de 154.09 km de recorrido, en las figuras 5, 6, 7, 8 se puede evidenciar las características de cada ruta.

Figura 5: Diagrama de la ruta 1, vehículo 1, prueba base.



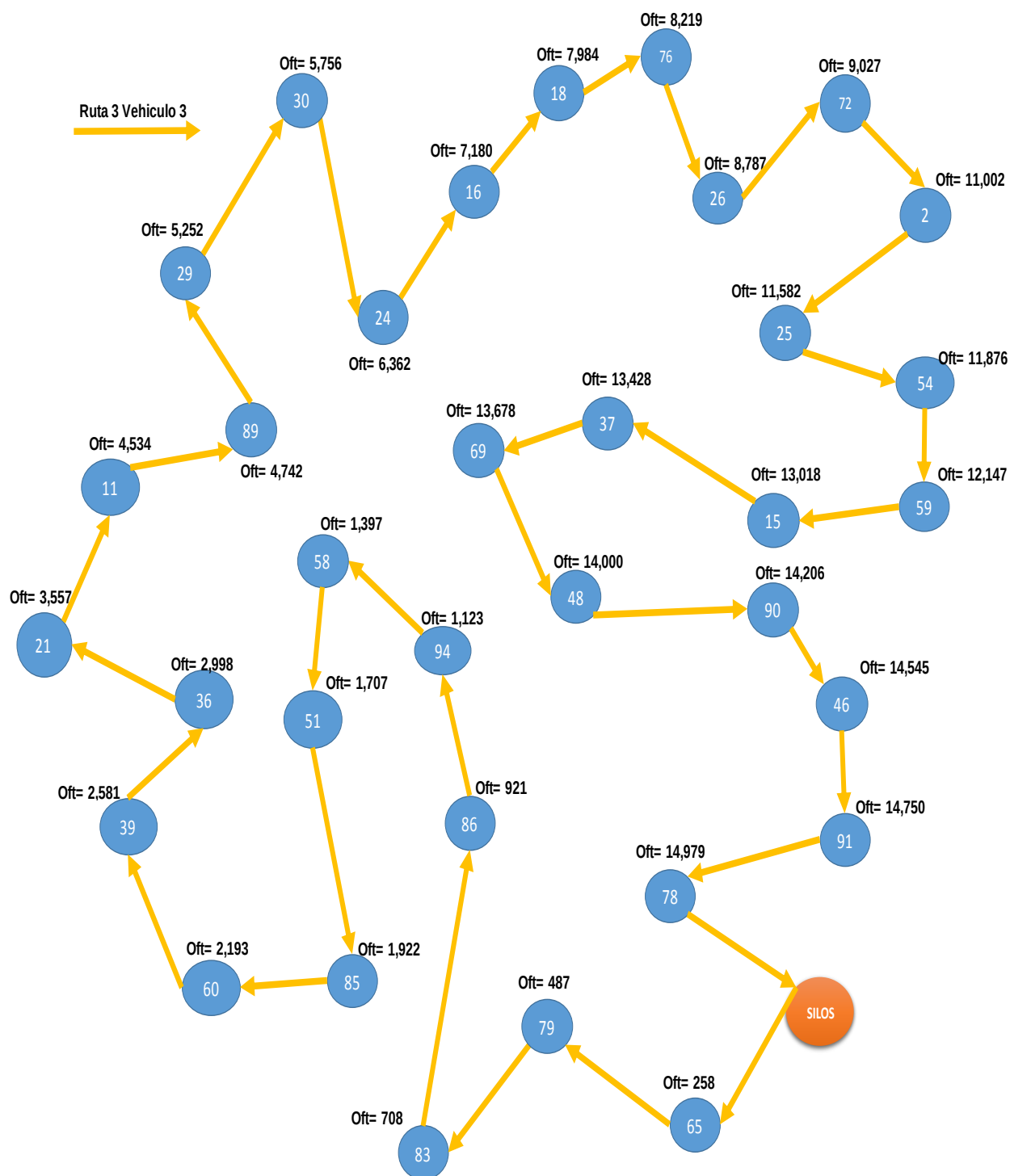
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 6: Diagrama de la ruta 2, vehículo 2, prueba base.



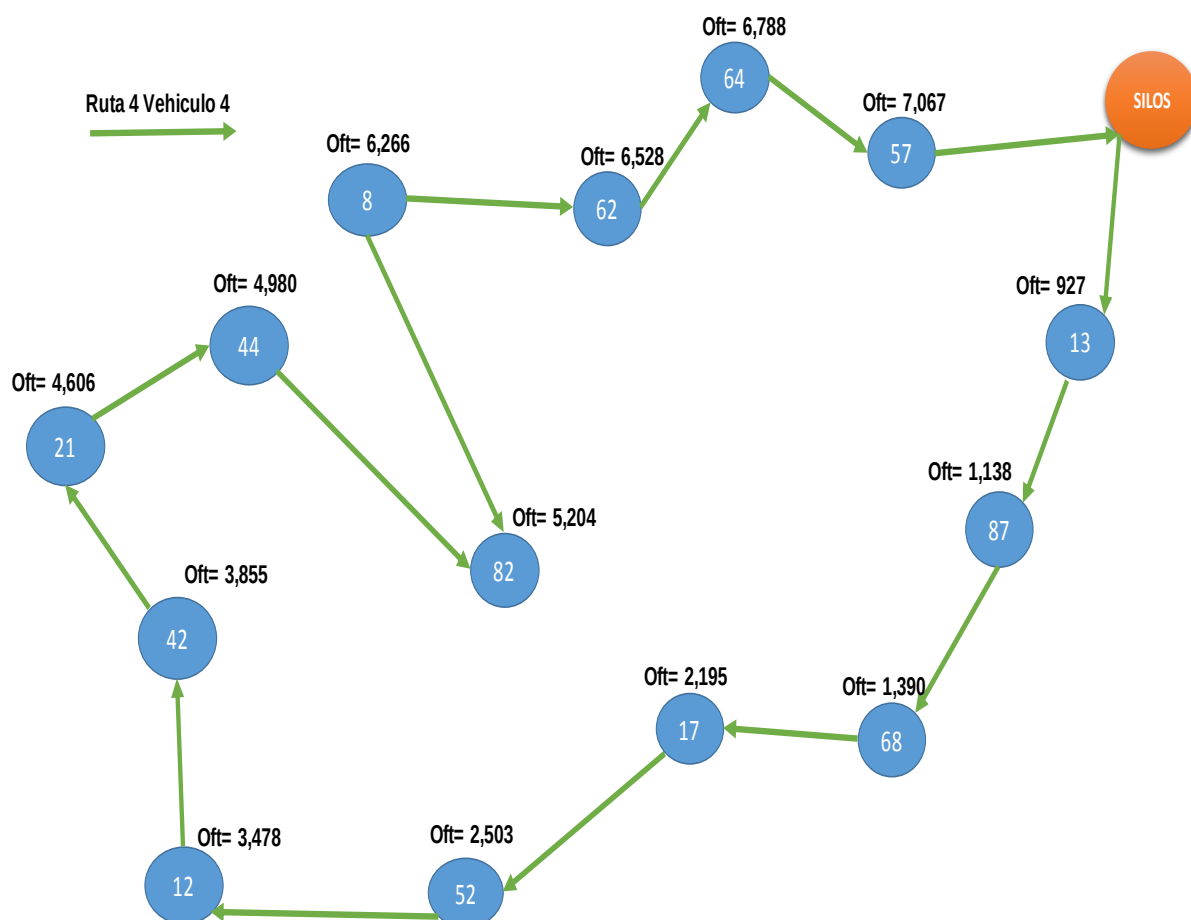
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 7: Diagrama de la ruta 3, vehículo 3, prueba base.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 8: Diagrama de la ruta 4, vehículo 4, prueba base.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los resultados obtenidos nos proporcionan una secuencia de rutas eficiente para suplir las necesidades de los usuarios del distrito de riego RUT para la recolección de maíz en los días críticos, teniendo en cuenta la cantidad de maíz por predio a recolectar y la secuencia de predios a visitar.

5.3.2 IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIOS.

5.3.2.1 Primer escenario.

Como primer escenario se realiza una prueba para los 95 predios categorizados en la zona A de la clasificación ABC; igualmente se establecen 4 vehículos de distintas capacidades, proporcionando la secuencia de rutas y la oferta a recolectar como se observan en la tabla 8.

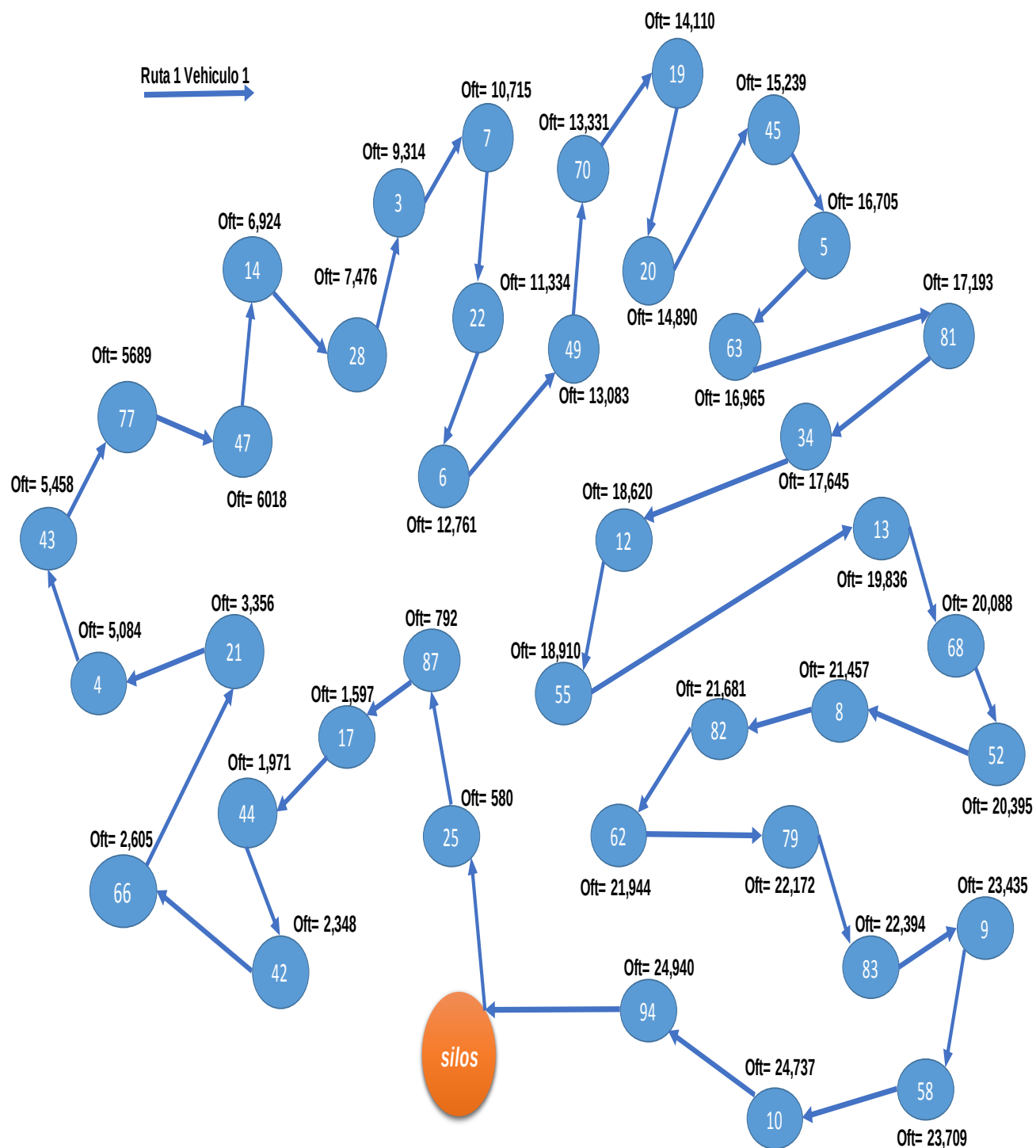
Tabla 8: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, primer escenario.

	F.O	CAP VEH	SECUENCIA DE RUTAS PARA PREDIOS		KILOS/ RUTA
<u>95</u>	180,24	VEH.1 25 ton	RUTA 1 / VEH.1	0-25-87-17-44-42-66-21-4-43-77-47-14-28-3-7-22-6-49-70-19-20-45-5-63-81-34-12-55-13-68-52-8-82-62-79-83-9-58-10-94-0	24.940
		VEH.2 10 ton	RUTA 2 / VEH 2	0-73-1-84-71-31-35-32-33-53-41-40-50-74-93-0	9.977
		VEH.3 15 ton	RUTA 3 / VEH 3	0-85-89-39-27-24-48-92-30-91-16-90-11-75-15-80-54-72-2-56-67-38-95-23-88-59-61-37-26-76-69-18-64-29-46-0	14.932
		VEH.4 5 ton	RUTA 4 / VEH 4	0-36-60-51-78-86-65-57-0	1.975

Fuente: Elaboración propia, 2021.

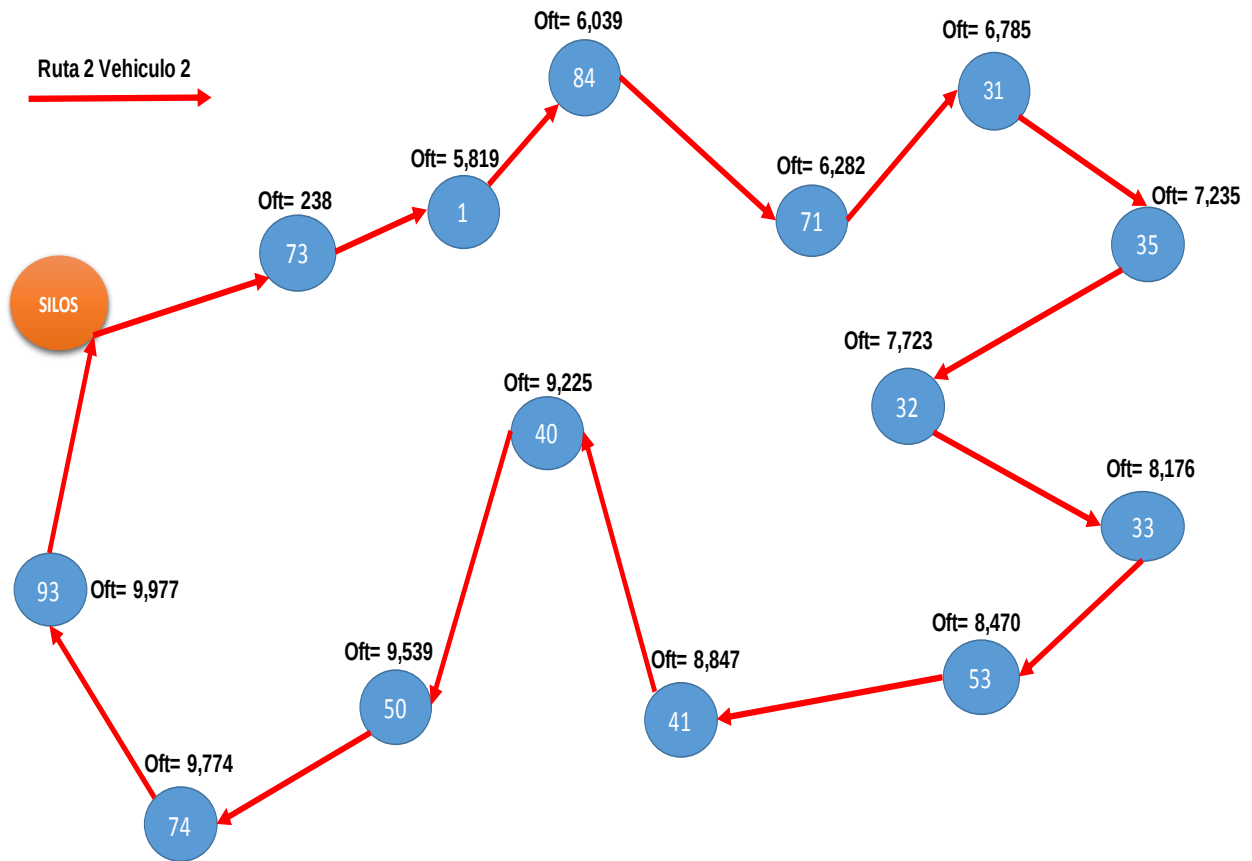
Los resultados proporcionados muestran la cantidad de oferta a recolectar para las rutas de los 4 vehículos con capacidad heterogénea; los vehículos visitan en su totalidad los 95 predios, partiendo del centro de acopio y regresando nuevamente, la función objetivo obtiene un valor de 180.24 km de recorrido, en las figuras 9, 10, 11, 12 se evidencia las características de cada ruta.

Figura 9: Diagrama de la ruta 1, vehículo 1, primer escenario.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 10: Diagrama de la ruta 2, vehículo 2, primer escenario.

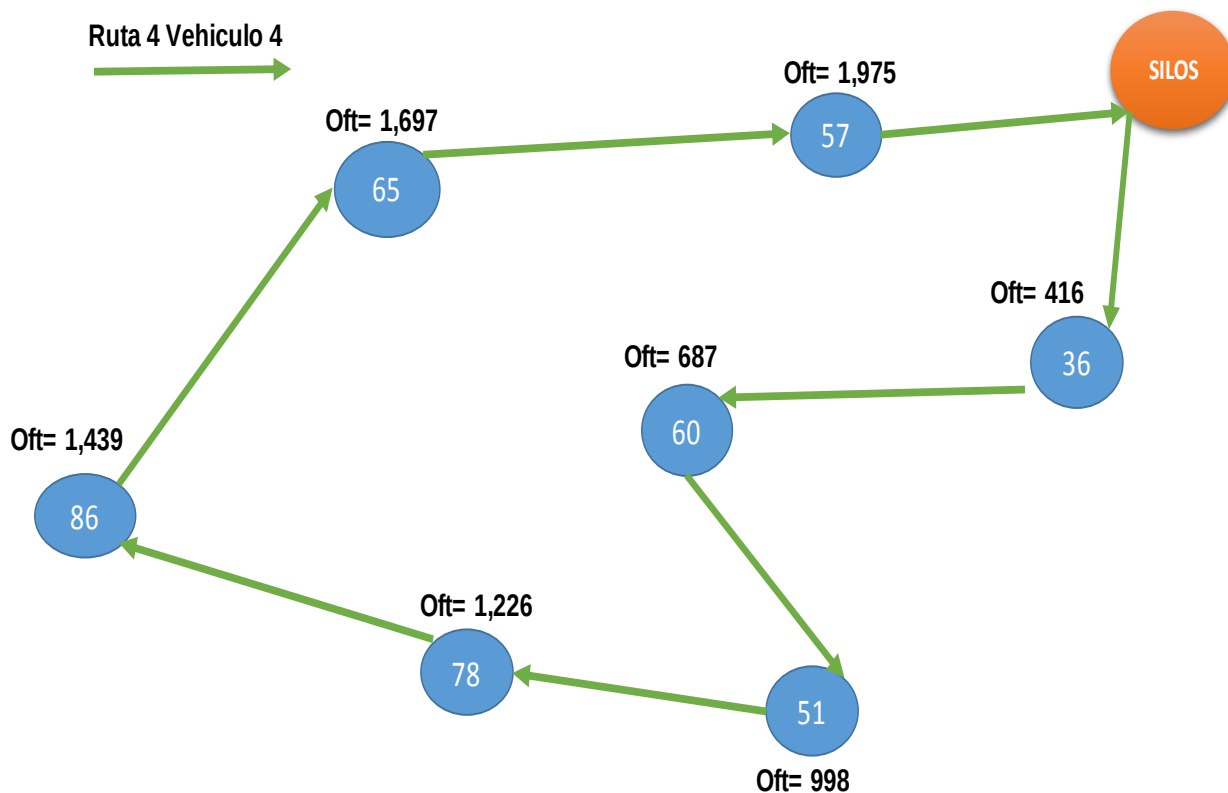


Fuente: Elaboración propia, 2021.

Fuente: Elaboración propia, 2021.



Figura 12: Diagrama de la ruta 4, vehículo 4, primer escenario.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.3.2.2 Segundo escenario.

En el segundo escenario se realiza la misma prueba para los 95 predios categorizados en la zona A de la clasificación ABC; se cambia los parámetros de capacidad y se establecen 3 vehículos de distintas dimensiones, proporcionando la secuencia de rutas y la oferta a recolectar como se observan en la tabla 9.

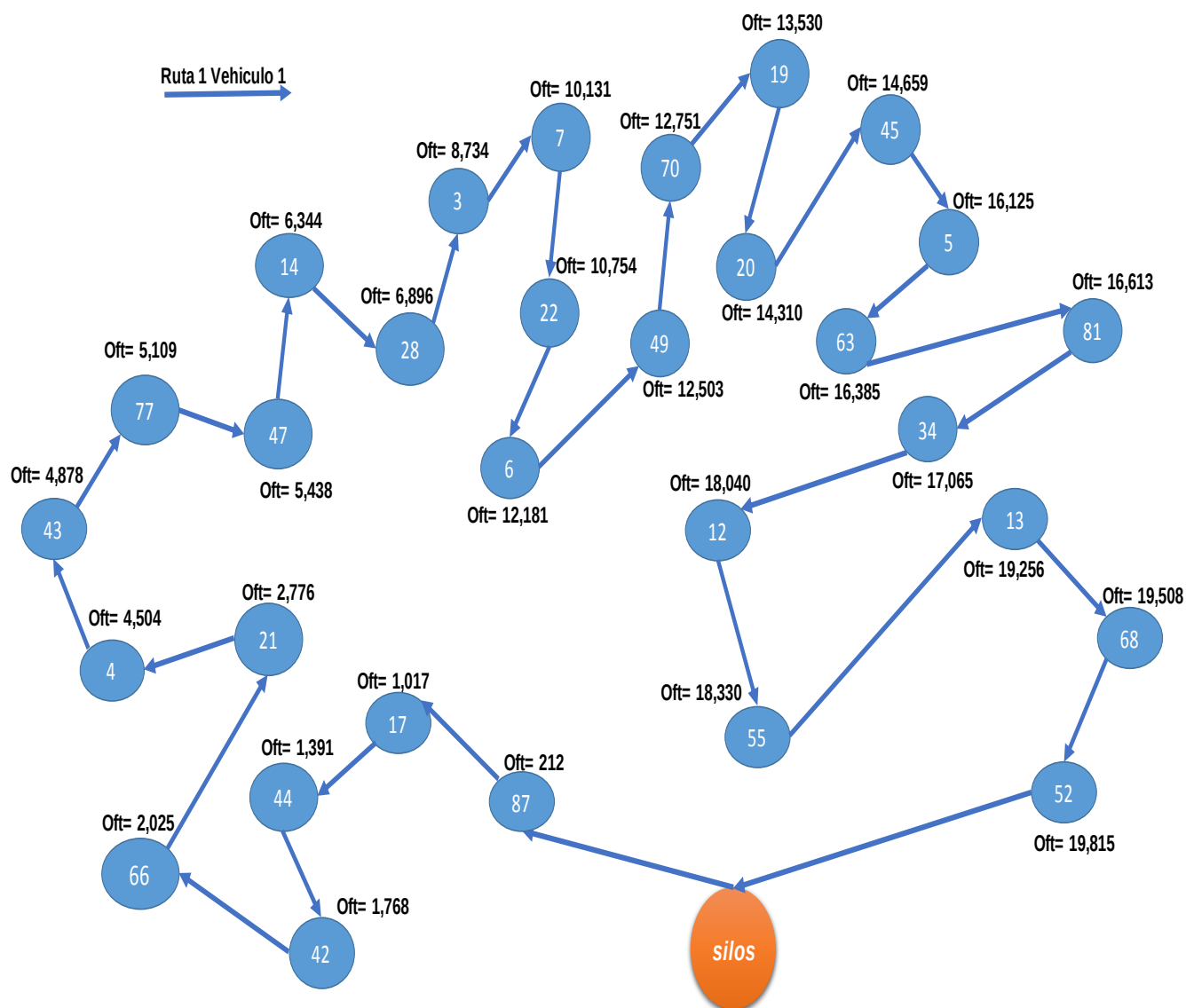
Tabla 9: Secuencia de rutas para de recolección de maíz, segundo escenario.

	F.O	CAP VEH	SECUENCIA DE RUTAS PARA PREDIOS		KILOS/RUTA
<u>95</u>	152,66	VEH.1 20 ton	RUTA 1/ VEH.1	0-87-17-44-42-66-21-4-43-77-47-14-28-3-7-22-6-49-70-19-20-45-5-63-81-34-12-55-13-68-52-0	19.815
		VEH.2 20 ton	RUTA 2/ VEH 2	0-61-37-54-80-72-2-56-67-88-23-38-74-93-35-95-32-50-40-33-1-9-71-53-31-84-41-73-92-75-10-18-24-0	19.851
		VEH.3 15 ton	RUTA 3/ VEH 3	0-79-82-94-78-85-60-36-36-16-30-27-29-48-76-15-59-26-69-89-64-91-46-51-90-86-62-8-65-58-57-83-11-0	12.158

Fuente: Elaboración propia, 2021.

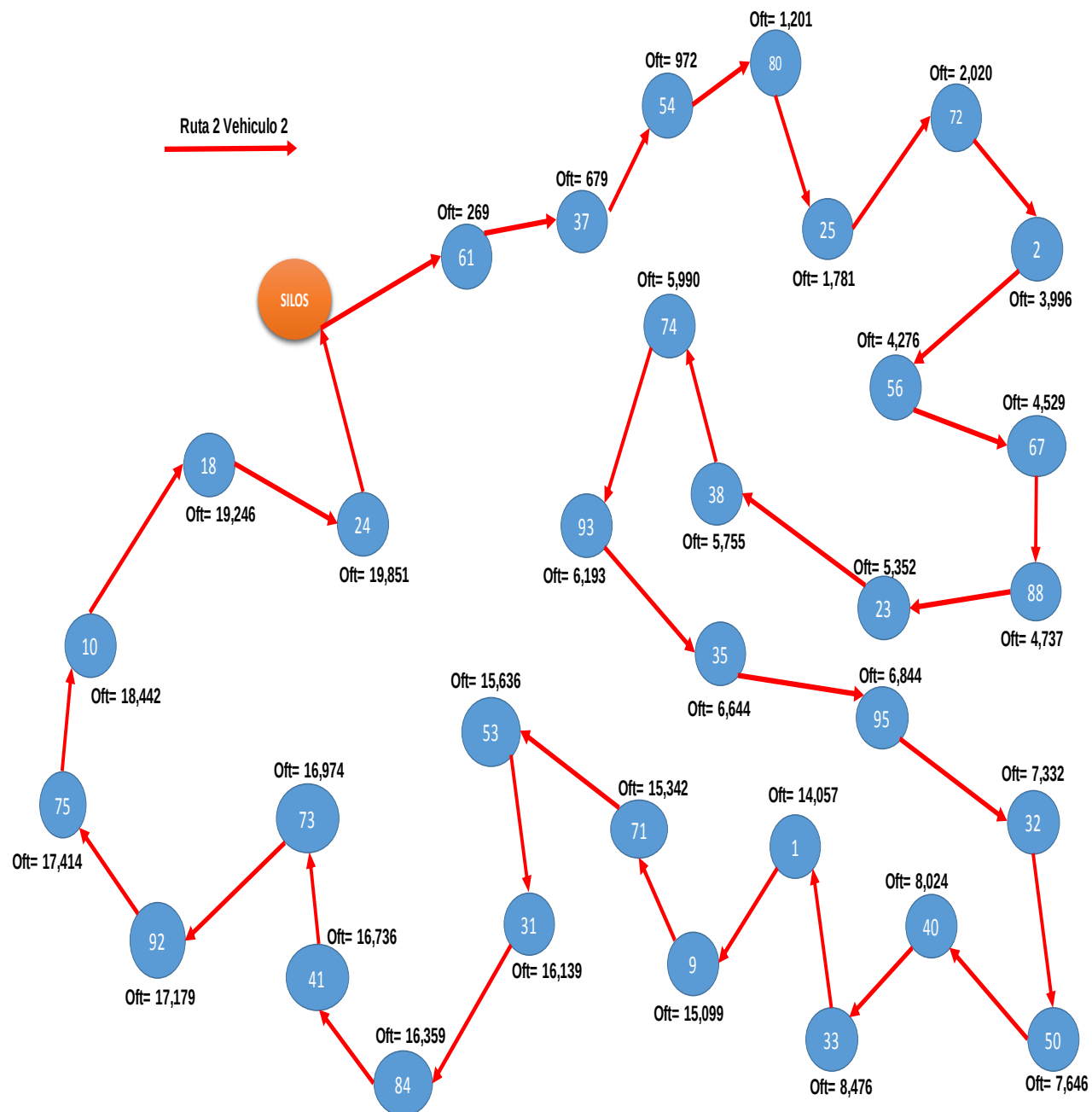
Los resultados proporcionados muestran la cantidad de oferta a recolectar para las rutas de los 3 vehículos con capacidad heterogénea; los vehículos visitan en su totalidad los 95 predios, partiendo del centro de acopio y regresando nuevamente, la función objetivo obtiene un valor de 152.66 km de recorrido, en las figuras 13, 14, 15 se evidencia las características de cada ruta.

Figura 13: Diagrama de la ruta 1, vehículo 1, segundo escenario.



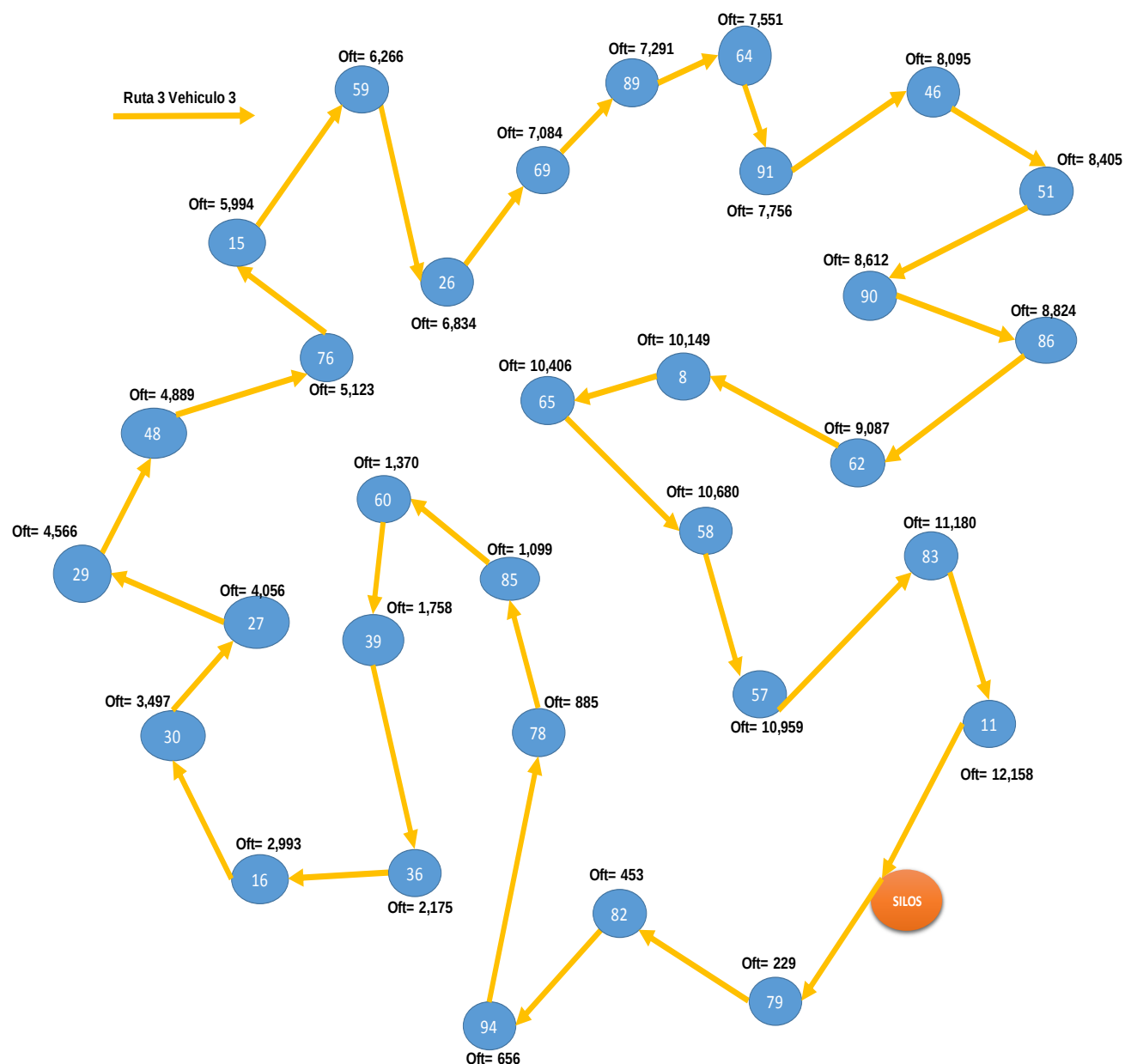
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 14: Diagrama de la ruta 2, vehículo 2, segundo escenario.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 15: Diagrama de la ruta 3, vehículo 3, segundo escenario.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.3.3 COMPARACIÓN DE PRUEBAS.

Después de construir el modelo de optimización en el algoritmo de Clark & Wright y ejecutar la prueba base y dos escenarios propuestos, se hace la comparación respecto las soluciones obtenidas en cada prueba, en las soluciones encontradas se utilizaron vehículos de capacidades heterogéneas, donde se recolecto el 100% de la oferta de los 95 predios correspondiente para el mes de enero, teniendo en cuenta las pruebas realizadas para ver el comportamiento, el parámetro variable fue el número de predios a

visitar para cada vehículo y su secuencia, presentando cambios mínimos en la función objetivo y la oferta a recolectar. Como se muestra en la tabla 10, al cambiar la cantidad de la flota vehicular afecta directamente la variación de la función objetivo ya que cada vehículo tendrá que hacer más recorridos y para atender a cada predio.

Tabla 10: Comparación de escenarios para validación del modelo.

Predios		Vehículos utilizados	Capacidad vehículos (Ton)				Variable desempeño Z
95	Prueba base	4	15	15	15	10	154,09
	Primer Escenario	4	25	10	15	5	180,24
	Segundo Escenario	3	20	20	15		152,66

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se observa que al disminuir la cantidad de los vehículos mejora la función objetivo, al tener que viajar menos distancia para la recolección. En caso contrario; al aumentar la cantidad de vehículos aumenta la distancia para cada ruta. Además al tener una flota vehicular más ajustada a la oferta de maíz a recolectar; se vuelve más eficiente la utilización de los vehículos en base a su capacidad.

5.3.4 ANÁLISIS DE COSTOS.

Después de analizar los escenarios propuestos y observar el comportamiento en la variable de desempeño, se toma la decisión de analizar los costos de recolección incurridos en la operación para cada escenario, con el fin de establecer un criterio de decisión financiero, por lo tanto se implementa la siguiente formula.

$$\text{kilómetros Recorridos} * \text{costos variables vehiculares} + \text{costos fijos vehiculares}$$

Tabla 11: Análisis de costos de recorrido.

	Kilómetros recorridos	Costo Variable de vehículos	Costo fijo de vehículos	Costo total de recorrido
Prueba base	154,09	\$1.465	\$1.561.195	\$1.786.873
Primer Escenario	180,24	\$1.408	\$1.582.366	\$1.836.147
Segundo Escenario	152,66	\$1.233	\$1.356.177	\$1.544.467

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Después de construir el modelo de optimización en el algoritmo de Clark & Wright y ejecutar escenarios, en la tabla 11 se observan los costos vehiculares variables y fijos mencionados anteriormente, además de los kilómetros recorridos para cada prueba; esto con el fin de realizar un análisis económico incurrido en la recolección de maíz, la comparación de las soluciones obtenidas en cada escenario ratifica que al utilizar menos vehículos o implementar una flota vehicular más ajustada a la oferta de cada predio, disminuye tanto la función objetivo y los costos de transporte. No obstante, en temporada de oferta alta es necesario tener más vehículos disponibles para atender los mismos predios, esto conllevaría al aumento de los costos variables y fijos de transporte.

CONCLUSIONES

El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) es uno de los principales temas de la Investigación de Operaciones y es catalogado como un problema complejo de optimización combinatoria. Por esto, en el presente trabajo de grado se abarcó el problema de ruteo de vehículos clásico TSP con capacidad vehicular heterogénea para la recolección del maíz cultivado en el distrito de riego RUT, con fin de dar una solución de cómo recolectar el maíz de los usuarios hasta el centro de acopio representado en silos.

Para dar solución al problema de asignación de rutas de la empresa caso de estudio, en primera instancia se realizó el diagnóstico del sistema actual de recolección, caracterizando la ubicación de los predios con los que cuenta la empresa, la distancia y tiempos entre predios, los tipos de vehículos con los que realiza recolección, las ofertas asociadas a cada predio y los costos totales de recorrido, esto con el fin de comprender la problemática a la cual se está enfrentando el distrito de riego RUT.

Una vez comprendido el funcionamiento del sistema de recolección de la empresa caso de estudio, se formuló un modelo matemático que contribuyó a minimizar la distancia total de recolección para las rutas, garantizando las necesidades de cada usuario. Con el fin de resolver la asignación de rutas para los vehículos que recolectan el maíz de cada predio inscrito en el distrito de riego RUT en el norte de valle

Durante la solución del modelo propuesto, se utilizó un lenguaje de programación matemática AMPL como método de validación, realizando corridas que contemplaban los 20 nodos y distintas capacidades vehiculares obteniendo tiempos desde 7.653,07 y 13.791 segundos proporcionando soluciones óptimas; sin embargo por la complejidad evidente de la situación que consta de 95 nodos se implementa una heurística constructiva asociada al método de los ahorros o Clark & Wright para resolver el problema.

El algoritmo se replicó utilizando el desarrollador de software de código abierto Anaconda y el entorno de desarrollo Spyder utilizando el lenguaje de programación Python implementando una prueba base y 2 escenarios, con el fin de realizar una comparación de las pruebas y así observar el comportamiento de las variables críticas del proceso de transporte para la recolección, modificando parámetros como la cantidad y capacidad de los vehículos; luego de analizar los resultados obtenidos por el modelo se ejecuta una comparación de los costos de recolección de la empresa evidenciándose una disminución de \$ 242.406 aproximadamente el 14% del costo total de la ruta de la prueba base con respecto al segundo escenario, resultado que ratifica el buen desempeño del modelo a la hora de aportar una solución al problema de recolección del maíz.

Se recomienda para investigaciones futuras, la implementación de una función de costo de recorrido que dependa tanto de la distancia, como del tiempo de recorrido según el tráfico de las vías, ya que el combustible que se consume cuando hay un tráfico denso es mucho mayor. Además implementar y comparar otras estrategias de solución alternativas como heurísticas y metaheurísticas, para los predios categorizados en la zona A y B y así integrar a los usuarios que conforman el distrito de riego RUT, no

obstante las estrategias de solución alternativas aunque no garantizan una solución óptima, ayudan a mejorar el desempeño del modelo en términos de eficiencia en el tiempo computacional, cuando se enfrenten problemáticas de mayor dimensión.

REFERENCIAS

- Álvarez Hernández, R. J. (2017). *Propuesta de solución al problema de ruteo de vehículos en el operador logístico OPPERAR S.A. para el transporte de distribución de productos alimenticios secos del grupo NUTRESA S.A.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Amariles Zambrano, J. M. (2019). *Aplicación de la Búsqueda Local Iterada a la solución del problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos y flota propia y subcontratada MDVRPPC*.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística administración de la cadena de suministro*.
- Barán, B., & Hermosilla, A. (2001). *Comparación de un Sistema de Colonias de Hormigas y una Estrategia Evolutiva para el Problema del Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo en un Contexto Multiobjetivo*. <http://www.cnc.una.py>
- Barrera Núñez, H. M., Daza Niño, D. F., Deluque, Y. J., Pulido Calderon, J. I., & Acero, W. (2018). *Gestión de Transportes Y Distribución*. 5.
- Calderon Sotero, J. H. (2010). *La importancia del transporte en la logística y en la cadena de suministros (SC)*. Septiembre 30. <https://logistweb.wordpress.com/2010/09/30/la-importancia-del-transporte-en-la-logistica-y-en-la-cadena-de-abastecimiento-scm/>.
- Carlos Quintero, M. L. (2020). *Determinación de rutas para la entrega de motocicletas*.
- Carrillo Mediorreal, F. A. (2014). *Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou París*. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16579/MediorrealCarrilloAndresFelipe2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Christofides, N. (1976). *Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem*.
- Dantzig, G. B., and Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. In *Management Science* (pp. 80–91.).
- Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución de problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Eia*, 1(12), 23–38.
- Estrada Romeu, M. À. (2007). *Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería*.
- Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., & Taillard, É. D. (1999). A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 26(12), 1153–1173. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(98\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(98)00100-2)
- Guasmayan, F. A. (2014). *Solución del problema de ruteo de vehiculos dependientes*

del tiempo utilizando un algoritmo genetico modificado.

- Klincewicz, J. G., Luss, H., & Pilcher, M. G. (1990). Fleet size planning when outside carrier services are available. *Transportation Science*, 24(3), 169–182.
<https://doi.org/10.1287/trsc.24.3.169>
- López Cardona, C. E., & Diaz Camacho, D. F. (2017). *Propuesta de un modelo de ruteo de vehículos considerando ventana de tiempo y flota homogénea para una distribuidora de frutas del norte del valle*. 135.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mueckay Chong, B. J., & Caiminagua Velepucha, K. J. (2018). *“Propuesta para mejora de distribución y elección de transporte en una empresa importadora de productos químicos ubicada en Guayaquí.*
- Orrego Cardozo, J. P., Ospina Toro, D., & Toro Ocampo, E. M. (2016). Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística. *Scientia et Technica*, 21(3), 225.
<https://doi.org/10.22517/23447214.9013>
- Páez Castillo, C. M. (2012). *Diseño de un sistema para calcular los costos directos operacionales de transporte de carga de prakxon logística en bogotá, medellín y cali y desde y hacia los municipios aledaños a estas ciudades, que sirva de base para tomar mejores decisiones en el pro.*
- Polo Solano, J. M. (2017). *Fortalecimiento de la cadena productivo del maíz en el distrito de riego del RUT mediante la instalación de una planta de secado y almacenamiento en silos que beneficia a familias de ASORUT en los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro del departamento.*
- Rocha Medina, L. B., González La Rota, E. C., & Orjuela Castro, J. A. (2011). Una revisión al estado del arte del proble- ma de ruteo de vehículos : Evolución histórica y métodos de solución State of the art review of the vehicle routing problem : A historic account with solving methods Resumen. *Ingeniería. Universidad Francisco José de Caldas*, 16(2), 35–55. <https://www.redalyc.org/pdf/4988/498850173004.pdf>
- Rueda López, J. S., & Castillo Castañeda, N. J. (2019). *Propuesta de un modelo de asignación de rutas para la distribución de productos perecederos en una empresa en el municipio de pradera valle.*
- Soto-de la Vega, D. A., Vidal-Vieira, J. G., & Vitor-Toso, E. A. (2014). Methodology for distribution centers location through multicriteria analysis and optimization. *Dyna*, 81(184), 28. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.39654>
- Toro Ocampo, E. M. (2016). *Solución del problema de localización y ruteo usando un modelo matemático flexible y considerando efectos ambientales.*
<http://hdl.handle.net/11059/7588>
- Toth, P., & Vigo, D. (2004). The vehicle routing problem. In *Matrix* (Issue November).
- Velarde, J., & Mercado, R. (1999). *Investigación de operaciones en acción: Aplicación*

del TSP en problemas de manufactura y logística. *Ingenierías*, 2(4), 18–23.
http://ingenierias.uanl.mx/4/pdf/4_Jose_L_Gonzalez_investigacion_de_operaciones.pdf

Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2013). A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows. *Computers and Operations Research*, 40(1), 475–489.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.07.018>

ANEXOS

Los anexos de este trabajo se presentan de forma digital, y se pueden acceder a ellos en los siguientes links

Anexo 1: [Resultados de la clasificación ABC.](#)

Anexo 2: [Identificación de oferta para cada predio maicero.](#)

Anexo 3: [Matriz tiempo en minutos.](#)

Anexo 4: [Matriz distancia en kilómetros.](#)

Anexo 5: [Tabla de coordenadas geodésicas por predio.](#)