



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE  
OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO TERMINADO DE UNA  
FÁBRICA DE ALIMENTOS PARA ANIMALES UBICADA EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

**José Andrés Herrera Morales**

Asesorado por Ing. Fernando Alberto Charles Agustín

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE  
OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO TERMINADO DE UNA  
FÁBRICA DE ALIMENTOS PARA ANIMALES UBICADA EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOSÉ ANDRÉS HERRERA MORALES**

ASESORADO ING. FERNANDO ALBERTO CHARLES AGUSTÍN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, ENERO 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Wendy Nora Miranda Lopez
EXAMINADOR	Ing. Brian Enrique Chicol Morales
EXAMINADOR	Ing. Jose Anibal Silva de los Ángeles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO TERMINADO DE UNA FÁBRICA DE ALIMENTOS PARA ANIMALES UBICADA EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de noviembre de 2022.

**Jose Andres Herrera Morales**



**EEPFI-PP-2006-2022**

Guatemala, 12 de noviembre de 2022

**Director**  
**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
**Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica**  
**Presente.**

**Estimado Ing. Rivera**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA FÁBRICA DE ALIMENTOS PARA ANIMALES UBICADA EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Área de Operaciones - Logística integral**, presentado por el estudiante **José Andrés Herrera Morales** carné número **201602526**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion Industrial.

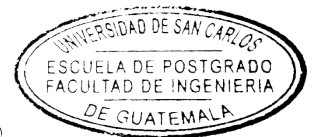
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

Mtro. Fernando Alberto Charles Agustin  
Asesor(a)

Mtro. Hugo Humberto Rivera Perez  
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-1651-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO TERMINADO EN UNA FÁBRICA DE ALIMENTOS PARA ANIMALES UBICADA EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **José Andrés Herrera Morales**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

The image shows a handwritten signature in black ink over a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica


Guatemala, noviembre de 2022

LNG.DECANATO.OI.039.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO TERMINADO DE UNA FÁBRICA DE ALIMENTOS PARA ANIMALES UBICADA EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por: **José Andrés Herrera Morales**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme guiado para cumplir mis objetivos.
- Mis padres** Quienes me han brindado su apoyo incondicional en todas mis decisiones, por darme todas las herramientas necesarias que me han permitido realizar este sueño.
- Mi hermano** Por su apoyo, sus consejos y enseñanzas durante toda mi vida.
- Familia y amigos** Quienes han estado conmigo durante todo este trayecto, que cada uno me ha aportado una pequeña parte que en conjunto me permitió llegar hasta acá.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme una educación superior que me permitió llenarme de conocimientos para realizar este trabajo de graduación.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme los conocimientos y los medios para poder convertirme en un profesional.
<b>Departamento de Física</b>	Por todas las enseñanzas y experiencias que me brindaron durante mis últimos años de carrera, en los que me apoyaron para lograr culminar este trayecto.
<b>Mis amigos</b>	Por haberme acompañado y brindado apoyo durante toda la carrera, quienes sin egoísmo me ayudaron y compartieron sus conocimientos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
3.1. Contexto general .....	7
3.2. Descripción del problema .....	8
3.3. Formulación del problema .....	8
3.3.1. Pregunta central .....	9
3.3.2. Preguntas auxiliares .....	9
3.4. Delimitación del problema .....	9
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. OBJETIVOS .....	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos .....	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15

7.	MARCO TEÓRICO .....	19
7.1.	Transporte de bienes por carretera .....	19
7.1.1.	Tipos de vehículos para el transporte por la carretera.....	20
7.2.	Infraestructura de transporte en Guatemala.....	21
7.2.1.	Optimización de rutas de transporte.....	22
7.3.	Problemas de rutas de vehículos (VRP) .....	23
7.4.	Métodos de solución para VRP .....	26
7.4.1.	Métodos exactos .....	26
7.4.1.1.	Algoritmo de exploración: <i>branch and bound</i> .....	27
7.4.1.2.	Programación lineal.....	28
7.4.1.3.	Programación dinámica.....	29
7.4.2.	Heurísticas .....	29
7.4.2.1.	Algoritmo de Clarke Wright.....	29
7.4.2.2.	Heurísticas de inserción .....	34
7.4.2.3.	Vecino más cercano.....	36
7.4.3.	Metaheurísticas .....	36
7.4.3.1.	Tabú <i>search</i> .....	36
7.4.3.2.	<i>Ant-Colony</i> .....	37
7.4.4.	<i>Machine learning</i> .....	38
7.4.4.1.	<i>Machine Learning</i> supervisado.....	38
8.	PROPUESTA DE CONTENIDOS .....	41
9.	METODOLOGÍA .....	45
9.1.	Características del estudio .....	45
9.2.	Unidades de análisis .....	46
9.3.	Variables .....	46

9.4.	Fases.....	47
9.4.1.	Fase 1: recolección de datos e información .....	47
9.4.2.	Fase 2: análisis de los datos.....	48
9.4.3.	Fase 3: diseño del modelo.....	49
9.4.4.	Fase 4: validación e informe final. ....	50
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS .....	51
10.1.	Técnicas de análisis de información.....	51
10.2.	Técnicas cualitativas .....	52
10.3.	Técnicas de Recopilación de datos .....	52
11.	CRONOGRAMA.....	55
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	57
12.1.	Recursos necesarios.....	57
13.	REFERENCIAS.....	59
14.	APÉNDICES.....	65



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Camión tipo T3-S2.....	20
2.	Camión tipo T2-S3.....	21
3.	Diferencias entre una solución CVRP y una solución de OVRP .....	24
4.	Método utilizado por el algoritmo de <i>branch and bound</i> .....	28
5.	Diagrama de flujo algoritmo de Clarke Wright.....	33
6.	Ejemplo del algoritmo Clarke y Wright .....	34
7.	Diagrama de flujo de algoritmo de inserción. ....	35
8.	Implementación de un grupo de datos para un algoritmo de aprendizaje.....	39

### TABLAS

I.	Fase 1: recolección de datos e información .....	16
II.	Fase 2: análisis de la información .....	16
III.	Fase 3: diseño del modelo. ....	17
IV.	Solución inicial utilizando Clarke Wright.....	32
V.	Variables en estudio... ..	46
VI.	Cronograma.....	55
VII.	Recursos necesarios para la investigación .....	58



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>\$</b>	Dólar estadounidense
<b>h</b>	Horas
<b>=</b>	Igual que
<b>M</b>	Metro
<b>Km</b>	Kilómetro
<b>Km/h</b>	Kilómetro por hora
<b>m</b>	Metro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q</b>	Quetzales
<b>qq</b>	Quintales
<b>T</b>	Tonelada





## GLOSARIO

<b>Algoritmo</b>	Es un conjunto de operaciones sistemáticas que permite realizar un cálculo y hallar la solución de un tipo de problemas.
<b>Cadena de suministros</b>	Conjunto de actividades, instalaciones y medios de distribución necesarios para llevar a cabo un proceso de venta de un producto.
<b>CEIE</b>	Centro de Estudios para la Integración Económica.
<b>CPP</b>	<i>Chinese Postman problem.</i>
<b>Estocástico</b>	Algo que está sometido al azar y es objeto de análisis estadístico.
<b>Flota</b>	Conjunto de vehículos destinados al transporte.
<b>FUNDESA</b>	Fundación para el Desarrollo de Guatemala.
<b>Heurística</b>	Conjunto de métodos o técnicas destinadas a resolver un problema.
<b>Logística</b>	Conjunto de técnicas que se encargan del movimiento de bienes, materiales y productos.

<b>Metaheurísticas</b>	Conjunto de heurísticas.
<b>MICIVI</b>	Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
<b>ML</b>	<i>Machine learning.</i>
<b>PIB</b>	Producto Interno Bruto.
<b>Programación</b>	Acción que implica ordenar, estructurar y realizar una serie de acciones cronológicas para cumplir un objetivo.
<b>SIECA</b>	Secretaría de Integración Económica Centroamericana.
<b>TSP</b>	<i>Traveling salesman problem.</i>
<b>VRP</b>	<i>Vehicle routing problem.</i>

## RESUMEN

Las rutas de transporte son un factor crucial para el desarrollo de un país, permitiendo el crecimiento de las compañías y que realicen se entregas eficientes. Alrededor del mundo se han desarrollado muchos algoritmos y sistemas de optimización para mejorar el desempeño de las entregas de productos, muchos estudios con diferentes estrategias han sido propuestas en la literatura científica.

Los problemas de rutas de vehículos, por sus siglas en inglés VRP, se conforman de una flota de vehículos con capacidad limitada que deben de visitar a un set de clientes geográficamente dispersos. Por lo general, para formar una ruta se agrupan varios clientes en relación con su proximidad o de la forma más eficiente que indique el método que se está utilizando. De esta manera, la demanda total de cada ruta no debe exceder la capacidad de vehículo realizando la entrega. El objetivo de las soluciones creadas es la minimización de los costos que se incurren en realizar las entregas.

El presente diseño de investigación buscar encontrar el método que más se adecue a las necesidades de la empresa, así como con las características de su demanda y su flota. Logrando así mejorar el rendimiento y el control sobre toda su logística relacionada a la flota de entregas.



# 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación se enmarca en el campo de logística integral, planificación y gestión de la distribución. Se centra en la búsqueda de las técnicas más adecuadas para diseñar un modelo de evaluación y de optimización de rutas de distribución para disminuir los costos de distribución de una fábrica de alimentos para animales, así como llevar un mejor control sobre la flota.

Desde la antigüedad, los seres humanos han buscado movilizar sus mercancías para realizar transacciones comerciales y siempre se ha visto en la necesidad de buscar rutas óptimas en las cuales se vea beneficiado. Ya sea para reducir tiempos, costos o el esfuerzo requerido. En un mercado tan interconectado y globalizado como el de la actualidad, es necesario encontrar las rutas más adecuadas para que una empresa sea competitiva. Esta presión ha causado que muchas industrias y académicos se enfoquen en el estudio de las técnicas de optimización de la logística, y en particular en la optimización de rutas de distribución.

En esta investigación, se hará una exploración de las técnicas tradicionales de las soluciones de problemas de ruteo: métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas. Así como análisis con algoritmos de aprendizaje mediante las técnicas de *machine learning*. Esto espera mejorar y hacer más eficiente el rendimiento de la logística de la flota de entregas, disminuyendo los tiempos y costos que actualmente maneja una fábrica de alimentos para animales.



## 2. ANTECEDENTES

Encontrar la mejor ruta para el movimiento de bienes no es un problema reciente, desde hace mucho tiempo el ser humano ha buscado la ruta óptima para poder movilizar lo que vende y compra. En la actualidad, las rutas de transporte han sido un factor crucial para el desarrollo de un país, permitiendo la dinamicidad y crecimiento global de las compañías. De acuerdo con La Comisión Europea de Transporte, un transporte de bienes y servicios eficiente está conectado a un incremento en el producto interno bruto de los países (Perboli, Rosado y Gobbato, 2016).

Según Bosona (2022), la distribución de bienes en las áreas urbanas ha tenido una tendencia al alza debido a la creciente urbanización, la densificación y la globalización. La logística en un área urbana se ve entramada por varios factores, especialmente en la particularidad de la ciudad de Guatemala debido a las vulnerabilidades de su infraestructura. Por lo que para realizar una optimización se debe de considerar el ambiente del tráfico, la congestión, las restricciones de horario, las rutas alternas y también la seguridad de los camiones.

Uno de los principales problemas de la ciudad es la congestión vehicular. Según el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2017) existe un gran número de vehículos debido al dinamismo diario de la ciudad provocado por la gran concentración de actividades comerciales, servicios, e industrias que generan un gran número de desplazamientos dentro y fuera de la ciudad.



Los problemas de rutas de vehículos, denominados en inglés como *vehicle routing problems* (VRP) se conforman de una flota de vehículos establecida, clientes con ubicaciones geográficas aleatorias, las demandas de cada uno y la ubicación del almacén principal de donde parten los vehículos hacia los clientes. En resumen, consiste en generar un grupo de rutas, utilizando un grupo de vehículos con capacidad de carga limitada. De forma que la suma total de cada ruta no supere la cantidad que el vehículo asignado puede llevar. Lo que se busca al solucionar un VRP es la reducción de los costos que tiene la distribución, costo que se ve íntimamente ligado a la distancia recorrida por el set de camiones repartidores (Domínguez, 2015).

Existen muchos algoritmos y sistemas de optimización que pueden ser usados para mejorar el desempeño de las entregas de producto, utilizando datos en tiempo real, soluciones con gestión de flota, algoritmos de planeación de rutas dinámicas, entre otros. Varios estudios con diferentes estrategias han sido propuestas en la literatura científica (Ranieri *et. al.*, 2018).

Muchos estudios han analizado también los criterios que los clientes estiman más, identificando que puntualidad, que los bienes lleguen con la cantidad y calidad prometida son los factores más críticos. Si estos criterios no son completamente obtenidos, se generará una reacción negativa (Escudero-Santana *et. al.*, 2022).

En Escudero-Santana *et. al.* (2022) implementaron y compararon seis técnicas numéricas para la planificación de la distribución y las rutas; tres heurísticas y tres metaheurísticas. Encontrando que si existe una posibilidad de múltiples lugares de entrega a distintas horas se pueden reducir los costos de la flota sin reducir la calidad del servicio prestado.

La mayoría de las industrias tienden a estar en algún tipo de clúster, por lo que se puede considerar la posibilidad de evaluar agrupar a los clientes de esta forma. En Iyer *et. al.* (2021) agrupan de esta forma a las industrias para realizar la planeación de rutas de entrega. Otra forma estudiada es agrupando distintos productos para realizar múltiples entregas reduciendo costos (Myung, 2022).

También existen métodos novedosos los cuales han sido surgiendo debido a la popularización de modelos estadísticos encontrados por inteligencia artificial, utilizando los modelos de *machine learning* (ML). En Giuffrida *et. al.* (2022) se encontró que los análisis realizados por ML son particularmente útiles para la detección de anomalías en pronósticos de demandas, para realizar agrupaciones por clúster, realizar análisis de trayectorias de los vehículos y su optimización, entre otros. Algoritmos creados por ML han probado que tienen un rol importante en soluciones técnicas innovadoras. El uso de sistemas inteligentes de transporte tiene muchos beneficios, tales como la reducción en los tiempos de manejo, reducción de los costos del manejo de las flotas y reducción en el consumo de energía (Kadłubek *et. al.*, 2022).

Para esta investigación, se explorarán los distintos métodos numéricos que existen para resolver los VRP y lograr encontrar las rutas óptimas para las necesidades que la empresa actualmente enfrenta, investigando las herramientas que mejor se acoplen y mejoren el servicio prestado de la flota de distribución.



### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1. Contexto general**

El trabajo de investigación se realizará en una fábrica de alimentos para animales ubicada en la Ciudad de Guatemala, la cual produce alimentos para animales agrícolas, que busca para proveer una mejor nutrición animal a través de investigación y desarrollo desarrollar productos innovadores, servicios alimenticios y de premezcla.

La empresa cuenta con tres puntos de distribución de su producto. La planta de producción la cual atiende los clientes en el área central del país, un centro de distribución norte el cual atiende el área nor-oriente del país y un centro de distribución sur, el cual atiende toda la costa sur y el occidente del país.

Actualmente realiza la distribución de sus productos a través de una empresa subcontratada que ofrece una cantidad determinada de camiones y furgones para realizar todo el transporte de su producto terminado. En la planta se tienen tres tipos de transporte para la movilización del producto terminado: camiones medianos, camiones pesados y furgones. El producto terminado se empaca en sacos y luego es movilizad desde la planta hacia los dos centros de distribución y hacia los clientes mayoristas en la región central.

El Departamento de Logística es el encargado de coordinar las rutas de las entregas a los clientes, la recepción de materias primas y de movilizar el producto hacia los centros de distribución. Debido al aumento de clientes en el área central, el departamento ha determinado que la flota con la que cuenta para realizar las

entregas es insuficiente para cumplir todas sus metas, ocasionando momentos en los que hay unidades ociosas y otros en que hacen falta unidades.

Por esto, la empresa se ha visto forzada a detener la producción del producto terminado debido a que el almacén interno de la planta excede su capacidad y no existan unidades disponibles para movilizar.

### **3.2. Descripción del problema**

El manejo que ha tenido la flota ha provocado que en ocasiones existan unidades ociosas, teniendo que esperar en la planta durante largos periodos, mientras que en otras ocasiones las unidades son insuficientes para realizar todas las entregas a tiempo, por lo que el almacén interno de la planta se ve excedido de sus capacidades.

Actualmente la distribución del producto se atiende conforme las órdenes de trabajo van llegando, esto sin haber un estudio y una planificación de rutas previa. Esto perjudica directamente a la producción y eficiencia de la empresa, la cual se ve forzada a frenar por estas deficiencias, provocando que el almacén interno de la planta exceda sus capacidades, que existan retrasos para futuras entregas y entregas inmediatas, generando un malestar en la clientela. Todo esto en conjunto indudablemente representa pérdidas económicas afectando también la reputación de la empresa.

### **3.3. Formulación del problema**

Debido a esta problemática que se presenta, se deben proponer una serie de mejoras en la planificación de las rutas de las entregas, que permitan readecuar el número de unidades en la flota de furgones y camiones existentes,

para poder brindar un mejor servicio para los clientes y para los mismos centros de distribución.

### **3.3.1. Pregunta central**

¿Cómo mejorar el modelo actual para reducir los tiempos de entrega y disminuir los costos de la distribución en una fábrica de alimentos para animales?

### **3.3.2. Preguntas auxiliares**

- ¿Cuáles son los principales factores que afectan la capacidad de la flota ya instalada en la fábrica?
- ¿Cuál es la cantidad adecuada de camiones y furgones que la empresa debe de contar para realizar las entregas?
- ¿Cuáles son las rutas óptimas para realizar las entregas del producto terminado?

### **3.4. Delimitación del problema**

El trabajo de investigación se realizará en una empresa dedicada a la fabricación de alimentos para animales, ubicada en la Ciudad de Guatemala. El departamento de logística es el encargado de manejar las rutas de distribución y el transporte de producto terminado.

La investigación se centrará en las rutas de distribución dedicadas a la entrega de producto terminado en el departamento de Guatemala.



## 4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación se enmarca en el campo de logística integral, planificación y gestión de la distribución, el cual surge de la necesidad de proponer mejoras en las rutas de entrega, así como identificar la cantidad adecuada de las unidades de cada tipo de transporte para la distribución del producto terminado. Toda esta gestión recae bajo la responsabilidad del departamento de logística de una empresa en donde se fabrican alimentos para animales ubicada en la ciudad de Guatemala.

La importancia de la realización de esta investigación radica en lo esencial que es la distribución y su buena gestión para la empresa. La distribución del producto terminado y la entrega es el contacto más directo que se tiene con todos los clientes. Si las rutas de entrega fallan, se repercuten directamente en las ganancias de la empresa, se daña la reputación que se tiene con los clientes y afecta el grado de confianza que pueden tener por sobre la competencia.

La mala gestión de las rutas de las entregas y su flota inadecuada ha causado que existan tiempos muertos en la producción, ya que en momentos determinados el número de unidades se ha visto insuficiente para movilizar el producto hacia los clientes y hacia los centros de distribución. Por lo que la investigación contribuirá a minimizar la incidencia de paros en la producción, evitar pérdidas económicas y elevar la eficiencia de la producción de la fábrica. Así mismo, la optimización de las rutas brindará un mejor panorama de cuál es la flota adecuada para la empresa, de cuántos camiones y furgones deberá mantener disponibles y reducirá el problema de unidades ociosas. La optimización de las rutas de distribución contribuirá a un mejor manejo de los



recursos disponibles, logrando reducir costos, mejorando los niveles de atención y servicio a los clientes, dando como resultado una mejor percepción de la empresa.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Diseñar un modelo de evaluación y de optimización de rutas de distribución para reducir los tiempos de entrega y disminuir los costos de distribución de una fábrica de alimentos para animales.

### **5.2. Específicos**

- Identificar los principales factores que afectan la capacidad de la flota ya instalada en fábrica.
- Identificar la cantidad adecuada de unidades de cada tipo de transporte para la distribución de producto terminado.
- Establecer las rutas óptimas de entrega para reducir los tiempos de entrega y minimizar los tiempos muertos de las unidades.



## 6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El presente estudio tiene como finalidad brindar a una fábrica de alimentos para animales un modelo para optimizar sus rutas de distribución de producto terminado en el departamento de Guatemala. Con el objetivo de determinar cuáles son las rutas más rentables, así como el tamaño de la flota que debe ser contratada. Para llevar a cabo la elaboración de este modelo, se analizarán los datos históricos de las rutas de la fábrica de los últimos 3 años.

Con el objetivo de mejorar el nivel de servicio al cliente, respetar sus ventanas de tiempos, entregas y el precio acordado, se evaluarán las técnicas de optimización de rutas tradicionales y también los modelos estadísticos encontrados por inteligencia artificial, tales como *machine learning*. Estos modelos deben tomar en cuenta los recursos que la empresa tiene disponible: la flota, el tipo de camiones con sus capacidades respectivas, siempre tomando en cuenta las limitantes que surgen debido a las políticas de la empresa y de las políticas públicas.

A partir de las soluciones dadas por las técnicas de optimización de ruta, se elaborará una comparativa en la cual se concluya con cuál de todos será el más beneficioso según los costos, los tiempos y la flota más conveniente para la empresa.

Para llegar a una solución eficiente a la fábrica de alimentos para animales, se seguirán las siguientes fases:

**Tabla I. Fase 1: recolección de datos e información**

<b>Actividad</b>	<b>Metodología</b>	<b>Recursos</b>	<b>Tiempo</b>
Obtención de costos	Investigar el costo que ha representado la flota de distribución a la compañía durante los últimos 3 años mediante entrevistas	Recurso humano Microsoft Excel	1 mes
Obtención de datos de demanda histórica	Solicitar los registros de demanda histórica que la empresa ha tenido en los últimos 3 años.	Recurso humano Microsoft Excel	1 mes
Recolección de datos de transporte	Investigar las capacidades de la flota de transporte, las distancias máximas que pueden recorrer y las ventanas de tiempo que manejan.	Recurso humano Microsoft Excel	1 mes
Obtención de datos de clientes	Solicitar las ubicaciones geográficas de los clientes, sus propias ventanas de tiempo y su demanda.	Recurso humano	1 mes

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

**Tabla II. Fase 2: análisis de la información**

<b>Actividad</b>	<b>Metodología</b>	<b>Recursos</b>	<b>Tiempo</b>
Análisis de costos	Determinar el costo promedio de transporte por cada viaje realizado utilizando los datos históricos	Recurso humano Excel	Análisis de costos

Continuación tabla II.

Pronóstico de demanda	A partir de la demanda que se ha tenido, realizar una proyección de cuánto se estima crecer en el futuro cercano.	Recurso humano Datos históricos	Pronóstico de demanda
Identificación de factores	Evaluar si las capacidades de la flota actual cumplen con la demanda proyectada, para determinar si la flota debe de ser readecuada.	Recurso humano	2 meses

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla III. **Fase 3: diseño del modelo**

Actividad	Metodología	Recursos	Tiempo
Evaluación de los métodos de solución	Evaluar los métodos de aproximación de Vogel, métodos de asignación, <i>machine learning</i> y otros modelos de optimización para determinar las rutas óptimas.	Recurso humano Datos recabados Power BI	2 meses
Determinar el método más favorable para la empresa.	A partir de las soluciones de los métodos, determinar cuáles son los más aptos para obtener el beneficio más alto.	Recurso humano Resultados de los métodos de solución.	2 meses
Cuadro comparativo	Realizar un cuadro comparativo de la situación actual y los mejores métodos encontrados, realizando una comparación de los costos, los tiempos de entrega y el número de la flota óptimo en cada escenario.	Recurso humano Power BI	2 meses

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.



## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Transporte de bienes por carretera**

El transporte de bienes por carretera es la forma de transportar mercadería en trayectos de la red vial pública, por lo que tiene costos fijos muy bajos. Este tipo de transporte ofrece muchas ventajas sobre otros gracias a su “flexibilidad, frecuencia, disponibilidad y velocidad” (Centro de Estudios para la Integración Económica, 2018, p. 3).

Según el Centro de Estudios para la Integración Económica (2018), el transporte por carretera es uno de los más utilizados en Centroamérica. Las importaciones y movimientos en esta modalidad han ido aumentando en los últimos años.

Todo transporte de mercadería conlleva un tiempo, el tiempo de transporte no solo se refiere a cuánto tiempo la mercancía estuvo en tránsito, más bien este:

Comprende el desde que la mercancía está dispuesta en los muelles para su carga hasta que es físicamente descargado en el lugar de entrega, por lo que es necesario tomar en cuenta los conceptos tales como tiempos de espera, carga, descarga, paros en ruta, transbordos, entre otros. (Centro de Estudios para la Integración Económica, 2018, p. 5)

Reconocer el tipo de carga que se transportará es de vital importancia para saber el tipo de transporte adecuado con el que se debe contar para mover de un lugar a otro esta mercancía. Las características principales de una carga para

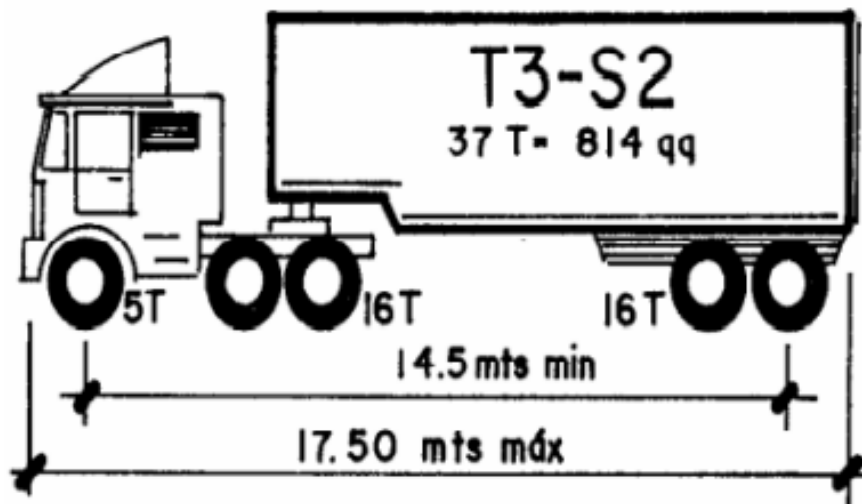


elegir un tipo de transporte adecuado son el peso, las dimensiones, su fragilidad, la durabilidad o si esta es perecedera, entre otros (Domínguez, 2015).

### 7.1.1. Tipos de vehículos para el transporte por la carretera

El transporte en Guatemala se rige por el Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones. Publicado por el Acuerdo Gubernativo 379-210. Este reglamento contiene los tipos de vehículos que pueden ser utilizados en todo el territorio nacional para transportar carga de materia prima y productos terminados. Los tipos de vehículos que se utilizan en la fábrica de alimentos para animales son los tipo T3-S2 y T3-S3.

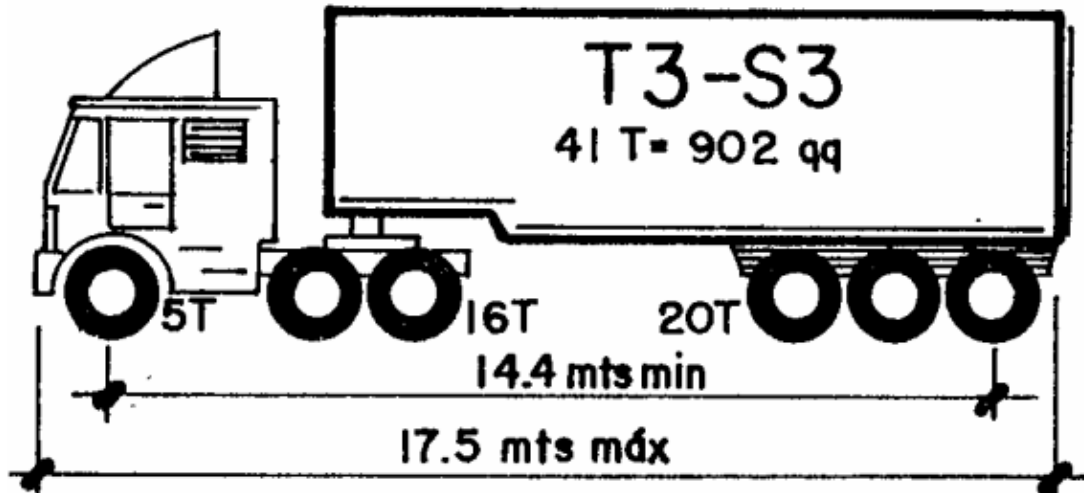
Figura 1. Camión tipo T3-S23



Fuente: Acuerdo Gubernativo 379-2010 (2011). *Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones.*

El camión tipo T3-S2 (figura 1) está definido como un cabezal con un eje direccional simple y un eje simple de rueda doble, con un semirremolque con un eje trasero doble. Mientras que el camión tipo T3-S3 (Figura 2) está definido como un cabezal con un eje direccional simple y un eje simple de rueda doble, con un semirremolque con un eje trasero triple. La capacidad máxima de carga permitida por el ministerio es de 814 y 902 quintales respectivamente.

Figura 2. Camión tipo T2-S3



Fuente: Acuerdo Gubernativo 379-2010. (2011) *Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones.*

## 7.2. Infraestructura de transporte en Guatemala

En cualquier país la red vial tiene una suma importancia en el comercio, esto se da principalmente por el suministro de los materiales básicos que se le brindan al sector industrial, el traslado de productos secundarios a centros de procesamiento y lo más importante para esta investigación, la distribución de bienes terminados desde los almacenes hasta el cliente.

La infraestructura vial en Guatemala se observa en un muy mal estado a comparación de las redes viales en otras naciones de la región. Según FUNDESA (2021), el porcentaje del PIB invertido en la infraestructura en Guatemala es del 12 %, mientras que en Panamá, México y Costa Rica las inversiones son del 39 %, 22 % y 18 % respectivamente. En el país se construyen en promedio apenas 216 kilómetros al año. En 2017 la velocidad del transporte de carga en las rutas principales se mantenía, en promedio, a 34 kilómetros por hora.

Toda la estructura vial compone una red logística que estructura una entidad compacta y compleja, por lo que la optimización es de vital importancia para lograr la sostenibilidad de todo el sistema.

### **7.2.1. Optimización de rutas de transporte**

Actualmente, las empresas deben enfocarse en la entrega a tiempo de sus productos. No solo para aumentar su competitividad, si no como algo primordial para su supervivencia en una economía donde el mercado tiende a ser mucho más abierto y competitivo. Un elemento clave para alcanzar esta meta es la elaboración de sistemas de distribución eficientes en los cuales los bienes son entregados en el momento adecuado, en el lugar adecuado y en la cantidad adecuada (Ichoua *et. al.*, 2007).

Existen múltiples métodos para la optimización de las redes logísticas que componen las rutas de transporte urbano, ya sea de bienes o de personas. Entre ellos existen el TSP (*traveling salesman problem*), el CPP (*chinese postman problem*) y el VRP (*vehicle routing problem*). Cada uno de estos permite diseñar las rutas de transporte para varios vehículos y que estos visiten varios puntos geográficamente dispersos. Sus características fundamentales son el conocer con anticipación el tipo de vehículo que se utilizará, las dimensiones de este, su

peso máximo a cargar, la forma de la carga y por último las ventanas de tiempo que disponen los clientes.

Esta investigación se centrará en los problemas de asignación de rutas de vehículos VRP, ya que este se enfoca en la optimización del proceso de distribución de mercancías, con el objetivo principal de minimizar tiempos y costos en el proceso de entrega.

### **7.3. Problemas de rutas de vehículos (VRP)**

El problema de rutas de vehículos, VRP por sus siglas en inglés, ha tenido una gran atención y estudio de la comunidad científica, puesto que su rol es vital en el diseño de sistemas de distribución. Según Larsen et al. (2007), los VRP consisten en diseñar rutas que inician y terminan en un almacén, para un grupo de vehículos con una cierta cantidad de carga máxima, que deben de distribuir hacia a un grupo de clientes geográficamente dispersos. Todo esto lográndolo de la manera menos costosa y más rápida.

Para este tipo de problemas VRP, se pueden realizar muchas subdivisiones en las cuales se toman en cuenta las diferentes configuraciones que se tienen al momento de transportar mercancías, entre estas características que los diferencian están: la capacidad de las unidades, la configuración en la que se pueden colocar los productos debido a limitaciones físicas, las ventanas de tiempo que maneja la distribuidora o los clientes, entre otros.

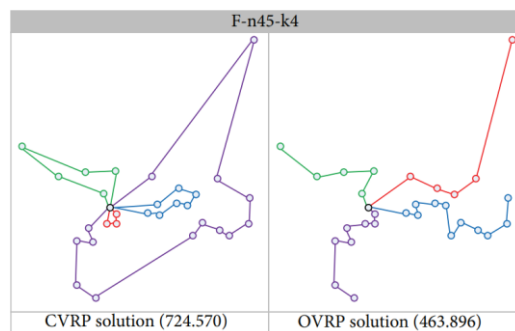
Un tipo de variación para este problema es el CVRP que por sus siglas en inglés significa problemas de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad. Este tipo de problema, descrito en Pichpibul y Kawtummachai (2013) como un problema que tiene un número fijo de vehículos que despacharán a un

grupo de clientes con coordenadas geográficas y demandas conocidas. Una ruta representa una secuencia de las ubicaciones geográficas de los clientes en las que un vehículo debe visitar, las distancias entre los clientes y entre el almacén.

Los CVRP tienen entre sus características un único lugar de inicio y fin (el almacén), una flota homogénea de vehículos, y un grupo de clientes que requieren de bienes que provee el almacén. El objetivo de los CVRP es construir un grupo de rutas factibles en las cuales se minimice ya sea la distancia total viajada o bien el número total de vehículos a utilizar. Por lo tanto, la ruta debe de satisfacer las siguientes limitaciones: el cliente debe ser visitado una vez, y no exceder la capacidad del vehículo durante cada ruta.

Otra variación que se menciona en Pichpibul y Kawtummachai (2013) es el *open vehicle routing problem*. Esta variación es muy similar al CVRP, con la diferencia que los vehículos son subcontratados, por lo que el costo del transporte únicamente depende de la distancia desde el almacén hacia los clientes, debido a que los vehículos no regresan hacia el almacén y tampoco se incurren en gastos de mantenimiento.

Figura 3. **Diferencias entre una solución CVRP y una solución de OVRP**



Fuente: Pichpibul y Kawtummachai (2013). *A heuristic approach based on clarke-wright algorithm for open vehicle routing problem.*

En la figura 3 podemos observar las diferencias entre la mejor solución para CVRP y OVRP, teniendo un mismo grupo de clientes y demandas que atender. Las rutas encontradas son muy distintas dado que CVRP tiene la limitante de que el vehículo tiene que volver al almacén.

También existe otra variación llamada problema de ruteo de vehículos estocástico, SVRP por sus siglas en inglés. Esto ocurre cuando uno o más de sus factores a estudiar son inciertos (Martínez-Bernal *et. al.*, 2020).

De acuerdo con Martínez-Bernal *et. al.* (2020), entre las variaciones que pueden tener SVRP:

Se distinguen cuatro tipos de modelos: el VRPSD (VRP *stochastic demand*) es un VRP con demanda estocástica,  $m$  de vehículos cuya capacidad limitada atienden clientes con demanda desconocida que puede ser mayor a la capacidad del vehículo. En el VRPSTT (VRP *stochastic travel time*) cada cliente tiene que ser atendido en una ventana de tiempo. El VRPSC (VRP *stochastic customer*) es un TSP en donde se conoce la ubicación precisa de los nodos, la probabilidad de que el cliente realice o no un pedido al CD. El VRPSDC (VRP *stochastic demand and customers*) es la combinación del VRPSD y el VRPSC, tiene por objetivo la búsqueda de la ruta óptima para un vehículo capacitado que entrega la mercancía a un conjunto de clientes, donde cada cliente tiene una probabilidad fija de ser visitado y una demanda estocástica. (p. 277)

En Martínez-Bernal *et. al.* (2020) se realiza un metaanálisis de 99 artículos científicos “con el objetivo de establecer el estado del arte de los modelos de localización, inventario y ruteo con parámetros estocásticos” (p. 269). Este trabajo encontró que el 52.4 % de los autores trabajan con problemas de una

demanda estocástica, siendo el VRPSD el problema más estudiado en los últimos años.

#### **7.4. Métodos de solución para VRP**

Todas las variaciones y tipos de VRP tienen distintas soluciones, dependiendo del método utilizado. Cada método brinda la mejor solución conocida mediante sus propias características. La logística es un campo muy diverso, por lo que se puede afirmar que la distribución en cada empresa es muy diferente, ya que esta se realiza acorde a sus necesidades. Cualquier solución o cambio que se implemente debe de ser la apropiada, ya que una solución inefectiva puede llegar a representar a un aumento desproporcionado en los costos de la logística. Es por ello que se exploran diferentes métodos para encontrar la óptima solución al problema de enrutamiento que se presente.

En Martínez-Bernal *et. al.* (2020) se encontró que, en la literatura revisada, el 44 % de los métodos utilizados son los métodos exactos, en segundo lugar, las metaheurísticas con un 25 %, luego las heurísticas con un 24 % y por último el método menos utilizado fueron las simulaciones con un 7 % de todos los artículos inspeccionados. También se menciona que varios de los autores utilizaron más de un solo método para la solución.

##### **7.4.1. Métodos exactos**

“Los métodos exactos se clasifican en tres grupos: búsqueda directa de árbol, programación dinámica y programación lineal” (Lozano, 2018, p. 25). Muchas veces estos métodos de solución son más funcionales para una cantidad limitada de datos debido a la capacidad computacional.

Estas soluciones cada vez son más factibles, debido al crecimiento exponencial que ha tenido la tecnología y la capacidad de computación desde inicios de la década.

#### **7.4.1.1. Algoritmo de exploración: *branch and bound***

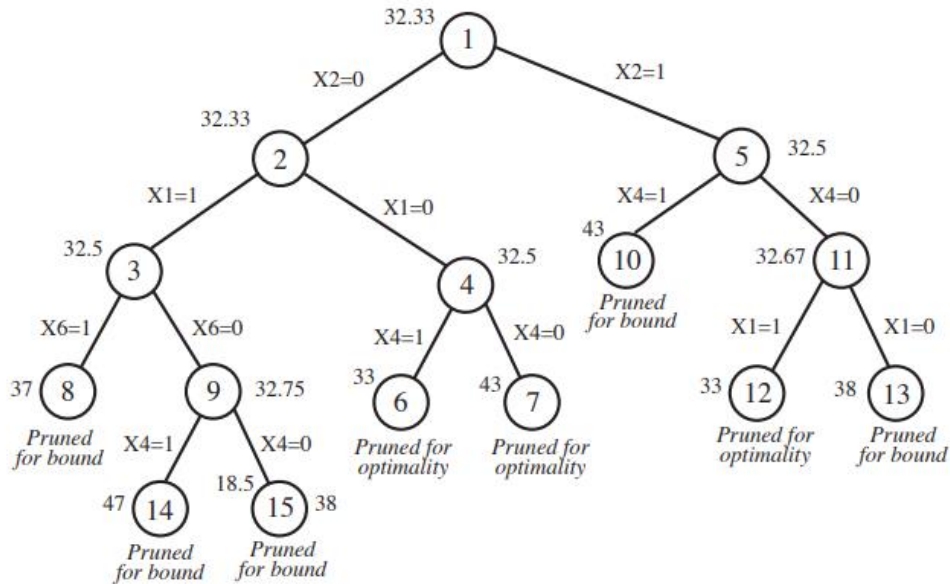
Según Bermeo y Calderón (2009) este algoritmo “pertenece a una variedad de estrategias de partición para resolver modelos de optimización global. Se encarga de mantener un límite inferior y superior (global) del valor óptimo de la función objetivo” (p. 57). Las limitaciones de este modelo son las mismas que se presentan en todos los métodos exactos, se toman bastante tiempo en resolver y al aumentar la cantidad de datos a manejar, el esfuerzo necesario crece exponencialmente.

Esta solución se aplica en dos pasos, primero tenemos la ramificación (*branch*) que consiste en “recorrer cada nodo del árbol desde el nivel superior hasta cada base del árbol y los nodos terminales resolviendo en cada nodo un programa lineal” (Lozano, 2018, p. 24). Teniendo al final de cada rama las soluciones apropiadas para el problema inicial.

El segundo procedimiento por realizar es el acotamiento (*bound*), este se realiza dado que algunos de los nodos del árbol no requerirán de más ramas, por lo que se corta esa rama dado que el problema que tiene en ese nodo no es posible realizar, por lo que a partir de esa rama todas las ramas subsecuentes no serán posibles. Un ejemplo de cómo se utiliza este método para solucionar un VRP, podemos observarlo en la figura 4.



Figura 4. **Método utilizado por el algoritmo de *branch and bound***



Fuente: Bermeo y Calderón (2009). *Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte.*

### 7.4.1.2. Programación lineal

Esta solución resuelve los VRP mediante modelaciones con ecuaciones lineales según la lógica de lo que se busca. Este brinda una solución específica para un problema. Por ejemplo, el trabajo de Wassan (2014) se realiza un modelo con las siguientes restricciones:

- Primero, lo principal que se busca es reducir la distancia total viajada por los vehículos.
- Todo cliente debe ser atendido una vez.

- El vehículo comienza vacío, se le colocan las cargas en el almacén y este debe regresar vacío.
- El vehículo tiene una capacidad que no debe de ser traspasada.

#### **7.4.1.3. Programación dinámica**

Este a diferencia de la programación lineal, brinda una solución con un panorama más amplio de todas las características por lo que es más recomendable para problemas en las que se desea analizar múltiples variables interrelacionadas, y este brinda un grupo óptimo de las decisiones específicas que se deben tomar por separado para la solución (Lozano, 2018).

Este tipo de programación normalmente utiliza un número fijo de vehículos, en los que se quiere obtener el costo mínimo alcanzable (la distancia recorrida) de una ruta que se mueve a través del nodo 1 (almacén) hacia todos los nodos (clientes).

#### **7.4.2. Heurísticas**

Las heurísticas son las estrategias sistemáticas que se utilizan para resolver cualquier tipo de problema, a continuación, se describen las más comunes para resolver los problemas de enrutamiento de vehículos.

##### **7.4.2.1. Algoritmo de Clarke Wright**

Este método se resalta por su flexibilidad de manejar un rango bastante amplio de limitaciones prácticas, es relativamente ligero en el sentido que no requiere mucha capacidad computacional para problemas con un número

moderado de paradas y es muy capaz de generar soluciones que son muy acertadas. Resolver los VRP con él, este procedimiento es un proceso con pasos graduales.

Este proceso, de acuerdo como se menciona en Jeřábek *et. al.* (2016) es el siguiente: se toma una red de transporte de  $S- (V; H)$ , donde  $V$  es el grupo de nodos (clientes) de la red y  $H$  es el grupo de conexiones entre estos nodos.  $V_0$  es considerado el almacén de la red de transporte,  $V_1$  hasta  $V_N$  son todas las ubicaciones de los clientes. Cada cliente o nodo requiere una cierta cantidad de bienes que el transporte le debe de proveer, la ruta comienza y termina en el almacén y la capacidad del vehículo es limitada. El costo total del transporte debe ser mínimo, cada cliente debe ser atendido una vez por ruta y no se debe exceder la capacidad del vehículo. Se deben tomar en cuenta otras restricciones que pueden surgir tales como la duración en tiempo máxima de cada ruta, consumo de combustible, facilidad de alcance de cada ubicación del cliente, entre otros.

El método nos indica primero debemos formar una primera solución, aceptable pero ineficiente, seleccionando dos posibles rutas  $(V_0 - V_i - V_0)$  y  $(V_0 - V_j - V_0)$  conectándolas en una sola agrupada  $(V_0 - V_i - V_j - V_0)$ . Dos rutas pueden ser agrupadas únicamente si la resultante cumple con todas las limitaciones anteriormente descritas y que la carga no exceda el límite permitido del vehículo  $K$ . Las ventajas y desventajas de estos agrupamientos son determinadas por los ahorros que se generan al realizarlos, estos ahorros son medidos por el coeficiente de ventaja  $z_{ij} = (d_{0i} + d_{0j} - d_{ij})$  donde  $d_{0i}$ ,  $d_{0j}$  y  $d_{ij}$  indican la longitud de las distancias  $(V_i, V_0)$ ,  $(V_0, V_j)$  y  $(V_i, V_j)$ . El valor  $z_{ij}$  nos indica la diferencia entre la suma de las distancias de las rutas  $(V_0 - V_i - V_0)$  y  $(V_0 - V_j - V_0)$  y la distancia de la ruta agrupada  $(V_0 - V_i - V_j - V_0)$ .

La especificación de este método es que en cada iteración del procedimiento son agrupados los dos nodos que tienen el mayor coeficiente de ventaja  $z_{ij}$ , siempre y cuando las restricciones sean respetadas. La ventaja de este procedimiento es que el coeficiente está fijado y únicamente depende de las distancias mutuas de los nodos  $V_i$ ,  $V_j$  y  $V_0$ .

El procedimiento para resolver se puede formular en los siguientes pasos:

- Dada una red de transporte es necesario compilar la siguiente matriz:  $D = d\{(i;j)\}$ , donde  $(i, j)$  irán desde 0 hasta  $n$ , la cantidad de nodos  $V$ . Otros valores que son necesarios conocer son:
  - $c$  la velocidad promedio del vehículo en la red.
  - $t$  el tiempo requerido por elemento  $(q)$  para descargarlo del vehículo.
  - $T$  el tiempo máximo que un vehículo puede estar fuera del almacén  $V_0$ .
  - $K$  la capacidad del vehículo.
  - $q_i$  el número de elementos transportados desde el almacén  $V_0$  hacia el nodo  $V_i$ .
  
- La solución inicial se coloca como en la tabla IV, la solución incluye un grupo de rutas elementales  $(V_0 - V_i - V_0)$  para todos los nodos de la red  $i = 1, 2, \dots, n$  con cierto número de elementos transportados y su respectivo tiempo de entrega.

Tabla IV. **Solución Inicial utilizando Clarke Wright**

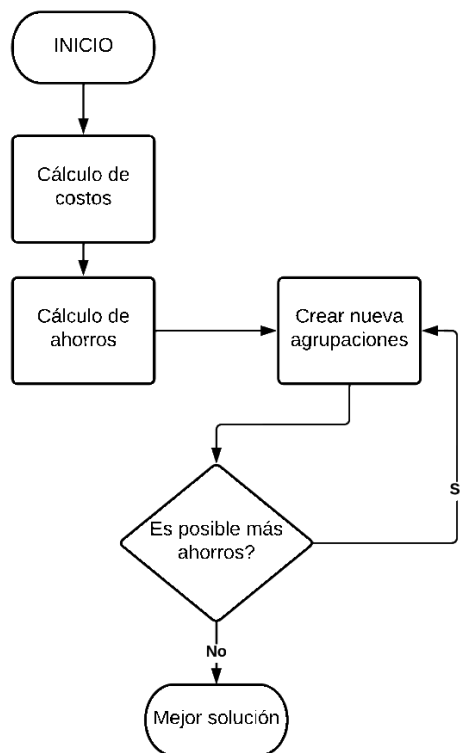
Ruta	Elementos transportados	Tiempo de entrega
$V_0 - V_i - V_0$	$q_i$	
(...)	(...)	(...)
$V_0 - V_n - V_0$	$q_n$	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- La matriz D es utilizada para derivar la matriz de coeficientes de ventajas  $Z = \{z_{ij}\}$ .
- El elemento  $z_{ij}$  positivo más grande es encontrado en la matriz Z y las rutas  $(V_0 - V_i - V_0)$  y  $(V_0 - V_j - V_0)$  son agrupadas, si es posible dadas las limitaciones, en una nueva ruta  $(V_0 - V_i - V_j - V_0)$ . Si este elemento no existe, el primer resultado obtenido del algoritmo es el óptimo que puede ofrecer, si existe, se remite al siguiente paso.
- Se revisa si al formar la ruta obtenida conectando  $(V_0 - V_i - V_0)$  y  $(V_0 - V_j - V_0)$  es admisible, si dicha ruta no es formada, entonces  $z_{ij} = 0$  y se debe regresar al paso anterior. Si es formada y admisible, se sigue al siguiente paso.
- Se actualizan los nodos V con la selección de los nodos i y j, si las rutas agrupadas resultantes terminan en los últimos nodos de la ruta, entonces  $z_{ij} = 0$ . Al actualizar el grupo de rutas ayuda a crear nuevos agrupamientos y al mismo tiempo los otros parámetros como distancia de la ruta y tiempo de entrega también se actualizan.

Este procedimiento es repetido hasta que la matriz Z lo permita o cuando sea claro que la capacidad de los vehículos sería rebasada al agrupar más nodos, este desarrollo lo podemos ver en la figura 5.

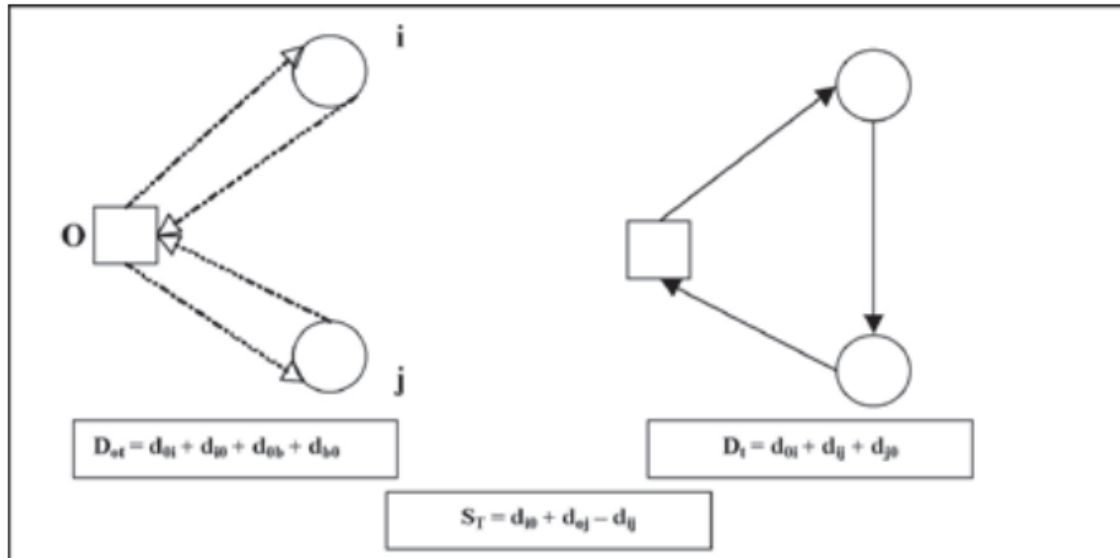
Figura 5. **Diagrama de flujo algoritmo de Clarke Wright**



Fuente: elaboración propia, empleando lucid.app.

En la figura 6, podemos observar el ejemplo más básico del algoritmo Clarke y Wright, el cual comienza con únicamente tres nodos, el almacén 0, y dos clientes i y j, en el cual se comienza con la ruta más elemental, del almacén hacia el cliente y del cliente hacia el almacén. Luego de aplicar el algoritmo, ambas rutas se agrupan.

Figura 6. Ejemplo del algoritmo Clarke y Wright



Fuente: Bermeo y Calderón, J. (2009). *Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte*.

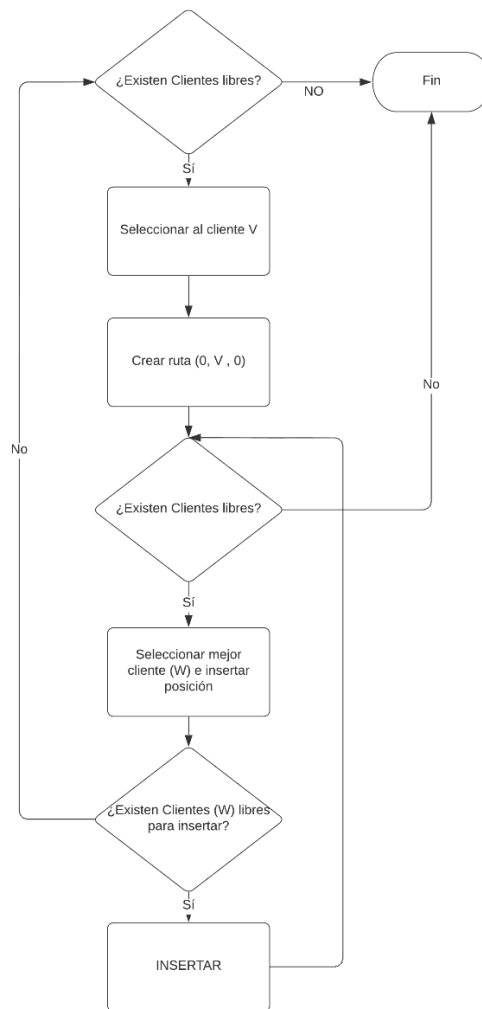
#### 7.4.2.2. Heurísticas de inserción

Según Lozano (2018), “la heurística de inserción maneja dos algoritmos de dos fases cada uno, estas heurísticas crean soluciones mediante sucesivas inserciones de clientes en la ruta, es decir tener soluciones parciales en cada una de las interacciones” (p. 27). Este método produce soluciones rápidas y sencillas para implementar según las necesidades de cada problema. Estas se pueden clasificar en dos, inserción secuencial e inserción en paralelo.

Las heurísticas de inserción secuencial utilizan como punto principal de evaluación la distancia que se obtiene al insertar un nodo libre entre dos nodos consecutivos ya en la ruta, luego de esto se calcula el costo de insertar este nodo y al mismo tiempo el costo de no reordenar los nodos ya establecidos en ruta. La

heurística de inserción en paralelo utiliza la secuencial en una primera fase y luego, los clientes libres se insertan utilizando un criterio de peso, comparando las características entre las mejores dos inserciones.

Figura 7. Diagrama de flujo de algoritmo de inserción



Fuente: elaboración propia, empleando lucid.app.



### **7.4.2.3. Vecino más cercano**

Según Demirci *et. al.* (2020) este algoritmo para solucionar VRP lo primero que realiza es seleccionar al azar un vehículo y un cliente, luego de esto agrega al siguiente cliente que se encuentre más cerca y que aún no ha sido tomado en cuenta para la ruta, esto hasta que la capacidad del vehículo sea alcanzada. Luego de esto, se escoge al siguiente vehículo y se siguen los mismos pasos hasta que todos los clientes hayan sido visitados o hasta que la capacidad de todo el vehículo ha sido utilizada.

En cada iteración que realiza, busca el cliente más cercano al último que fue añadido a la ruta, siempre tomando en cuenta las condiciones limitantes del problema que se está resolviendo.

### **7.4.3. Metaheurísticas**

Este tipo de solución es utilizado cuando las heurísticas no satisfacen completamente las características del problema que se está analizando, por lo que se recurren a híbridos de las heurísticas que tratan de hallar una solución mucho más acorde a las necesidades del problema de ruteo.

#### **7.4.3.1. Tabú search**

En Wassan (2014) mencionan cómo se desarrolló una metaheurística llamada *reactive tabú search* (RTS), en la cual se utilizan dos métodos, el de ahorro por inserción y de ahorro por asignación, esto con el fin de encontrar una solución para su algoritmo inicial de búsqueda. El enfoque de este RTS es usar una estrategia de diversificación, diferente a otros métodos utilizados

anteriormente. También existen otros algoritmos *tabu search* que no son reactivos, estos utilizan diferentes metodologías más simples.

Este procedimiento busca las soluciones más allá de una perspectiva local, permite realizar cambios mejorando o empeorando la situación de la solución hasta llegar a la solución más eficaz. Las últimas iteraciones en la búsqueda de las soluciones se clasifican como tabú, esto haciendo referencia a algún tipo de prohibición en la que se dejan fuera para no permitir que el algoritmo haga algún tipo de bucle y logre llegar a la solución correcta (Bermeo y Calderón, 2009).

#### **7.4.3.2. Ant-colony**

Otra metaheurística muy popular es la optimización de *ant-colony*, este algoritmo es modelado tras el comportamiento real de colonias de hormigas. Es sabido que, aunque las hormigas individuales se desplazan de una manera cuasi aleatoria realizando tareas muy simples, la colonia entera puede movilizarse colectivamente alcanzando patrones muy sofisticados. Esto mediante un rastro de feromonas el cual atrae a las hormigas individuales y estas, por probabilidad, son propensas a seguir las que más fuerte sea la presencia de la feromona (Kucukkoc y Zhang, 2022).

Este algoritmo se basa en encontrar el camino más corto, así como las hormigas siguen el camino más corto entre su nido y las fuentes de comida. Cuando a las hormigas se les proporciona un grupo de posibles caminos hacia una fuente de alimento, las hormigas empezarán tomando cualquier camino aleatoriamente. Las hormigas que escojan el camino más corto regresarán más rápido, por lo tanto, habrá un rastro de feromonas más fuertes que en los demás. Esto desencadenará que las demás hormigas sigan este camino y será considerado como la ruta óptima.

Este método es muy recomendable para minimizar al mismo tiempo el número de vehículos, las distancias totales recorridas y el tiempo que toma realizar cada una.

#### **7.4.4. *Machine learning***

Recientemente el *machine learning* ha tenido un auge en popularidad debido a los buenos resultados que ha logrado presentar para resolver problemas complejos. Dentro del machine learning se encuentran principalmente dos tipos, el supervisado y el no supervisado. El *machine learning* no supervisado es útil para encontrar patrones en grupos de datos sin etiquetas y sin clasificaciones.

##### **7.4.4.1. *Machine Learning* supervisado**

El ML supervisado es una estrategia muy considerada para la identificación de patrones en sets de datos relacionando características con etiquetas. Este proceso a diferencia del no supervisado, se le indica qué patrones debe de buscar siguiendo las características brindadas.

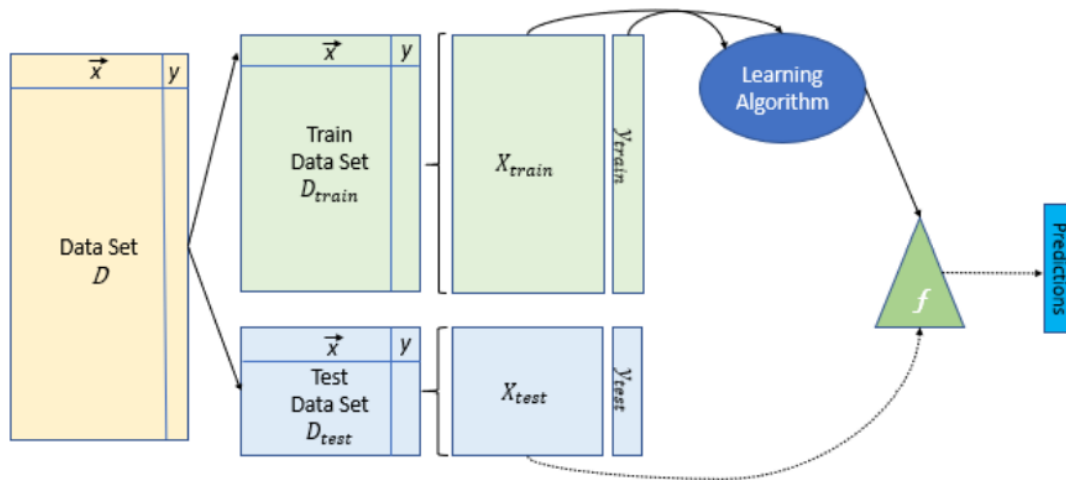
Según Fellers (2021) este proceso consiste en indicarle las instancias conocidas a un algoritmo de aprendizaje, el cual identifica las relaciones que tienen entre la característica y la etiqueta, esto en forma de una función de predicción  $f$ . Subsecuentemente, las futuras instancias son presentadas en la función  $f$  para una predicción. Por lo que el objetivo es generar una función capaz de predecir y de generalizar los datos más allá de los datos originales que se usaron para entrenar el algoritmo de aprendizaje.

El formato para presentar los datos al algoritmo de aprendizaje supervisado es exacto. Las instancias están representadas por los vectores  $\vec{x}$  representando

las características,  $y$  representado las etiquetas y un grupo de datos con las instancias agregadas  $D = (\vec{x}_1, y_1), (\vec{x}_2, y_2), \dots, (\vec{x}_n, y_n)$ .

$D$  está organizado para representar las instancias usadas para entrenar el algoritmo y las futuras instancias que son usadas para examinar la eficacia de la función de predicción  $f$  y evaluar cómo se comporta con datos reales con resultados ya conocidos. Esto se realiza comúnmente dividiendo los datos en dos grupos, un grupo para entrenamiento y el otro de examinación. En la figura 8 se observa cómo un set de datos es separado para alimentar la inteligencia de aprendizaje.

Figura 8. **Implementación de un grupo de datos para un algoritmo de aprendizaje**



Fuente: Fellers (2021). *Algorithm selection for the Capacitated Vehicle Routing Problem using Machine Learning classifiers.*

Aplicado a VRP, las instancias son representadas como un vector de las características y su mejor algoritmo como la etiqueta, por lo que con un algoritmo supervisado se observa una clara conexión en la relación de estos dos. Lo que se realiza en el trabajo de Fellers (2021), es comparar entre tres diferentes algoritmos con distintos enfoques para resolver el problema de clasificación.

En Furian *et. al.* (2021) se menciona que, para la mayoría de las variantes VRP, se asume que a los clientes o nodos siempre se les considera como grupo que no se puede predecir a diferencia de las demás características que se necesitan resolver pero que, en las aplicaciones del mundo real, las instancias siguen distintos patrones los cuales permiten el uso de ML y modelos de aprendizaje para la optimización. Se definen modelos de Machine Learning los cuales hacen uso de las propiedades de las instancias y luego estos modelos son combinados con los algoritmos de optimización clásicos para mejorar su eficiencia y rendimiento

## 8. PROPUESTA DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO REFERENCIAL

### 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Transporte de bienes por carretera

2.1.1. Tipos de vehículos para el transporte por carretera

2.2. Infraestructura de transporte en Guatemala

2.2.1. Optimización de rutas de transporte

2.2.1.1. Turbinas Francis

2.3. Problemas de rutas de vehículos (VRP)

2.4. Métodos de solución para VRP

2.4.1.1. Métodos exactos

2.4.1.1.1. Algoritmo de  
exploración: *Branch  
and bound*

- 2.4.1.1.2. Programación Lineal
- 2.4.1.1.3. Programación dinámica
- 2.4.1.2. Heurísticas
  - 2.4.1.2.1. Algoritmo de Clarke Wright
  - 2.4.1.2.2. Heurísticas de inserción
  - 2.4.1.2.3. Vecino más cercano
- 2.4.1.3. Metaheurísticas
  - 2.4.1.3.1. Tabú *search*
  - 2.4.1.3.2. *Ant-colony*
- 2.4.1.4. *Machine learning*
  - 2.4.1.4.1. *Machine learning* Supervisado

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 3.1. Factores que más afectan a la flota de vehículos
- 3.2. Método de planificación más adecuado para la empresa
- 3.3. Rutas óptimas para minimizar costos y tiempos de entrega
- 3.4. Evaluación del modelo de optimización de rutas de distribución

### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 4.1. Diferencias con la flota actual que posee la empresa
- 4.2. Método de planificación adecuado
- 4.3. Rutas actuales comparadas con rutas óptimas
- 4.4. Validación del modelo de optimización de rutas propuesto

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES  
ANEXOS





## **9. METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo este proyecto en la fábrica de alimentos se plantea un enfoque cuantitativo, con un alcance descriptivo y un diseño no experimental.

### **9.1. Características del estudio**

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo, ya que el objetivo general se enfoca a una solución medible y cuantificable. El proyecto de investigación lo que propone es reducir los tiempos de entrega y disminuir los costos de distribución dados por las rutas y se enfoca en una población total de 20 furgones tipo T3-S2 y T3-S3.

El alcance es descriptivo, dado que se recolectarán los datos de diversos elementos que afectan las rutas de distribución del producto, tales como las ubicaciones de los clientes, las cantidades a entregar, las zonas de distribución y los tipos de transporte utilizados.

El diseño adoptado será no experimental, pues la información recabada serán los datos de los tiempos y el estado actual de los costos de las rutas, estas se analizarán en su estado original sin ninguna manipulación para realizar el modelo de optimización. Además, este diseño será transversal debido a que se investigarán los efectos que tienen los tipos de transporte que se utilizan, las empresas subcontratadas, la cantidad de producto transportado y las ubicaciones de los clientes.

## 9.2. Unidades de análisis

La población total del estudio serán los 20 furgones tipo T3-S2 y T3-S3 que posee la empresa, estos furgones son los que realizan las rutas de entrega que parten de la planta central hacia los clientes. La unidad de análisis serán las rutas que realizan estos veinte furgones, por lo que se analizarán las entregas que se han realizado durante los últimos tres años.

## 9.3. Variables

Las variables para tomar en cuenta en el estudio son las siguiente:

Tabla V. **Variables en estudio**

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operativa</b>
<b>Costo de transporte</b>	Costos incurridos por el envío de productos desde el distribuidor hasta un cliente (Chopra y Meindl, 2013).	Se determinarán los costos históricos que han representado en promedio, transportar la mercadería hacia un cliente. La unidad de medida utilizada serán quetzales.
<b>Tiempo en ruta</b>	Duración del vehículo fuera del almacén (Jeřábek <i>et. al.</i> , 2016).	Promedio de tiempo que toma transportar la mercadería hacia un cliente. La unidad de medida utilizada será en horas y minutos.
<b>Tiempos de carga</b>	Tiempo requerido para colocar la carga en el camión (Jeřábek <i>et. al.</i> , 2016).	Promedio de tiempo que toma cargar la mercadería a una unidad de transporte. La unidad de medida utilizada será en horas y minutos.

Continuación de la tabla IV.

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operativa</b>
<b>Tiempos de descarga</b>	Tiempo requerido para descargar una unidad de carga del camión (Jeřábek <i>et. al.</i> , 2016).	Promedio de tiempo que toma descargar la mercadería a una unidad de transporte. La unidad de medida utilizada será en horas y minutos.
<b>Carga Transportada</b>	Mide la cantidad promedio por orden transportada (Chopra y Meindl, 2013).	Cantidad de producto promedio que se le provee a un cliente por unidad de transporte. La unidad de medida utilizada serán kilogramos.
<b>Distancia de lugar de entrega</b>	Suma de las distancias entre los clientes en las rutas y el almacén (Jeřábek <i>et. al.</i> , 2016).	Distancia que existe entre la planta productora y el cliente final. La unidad de medida utilizada serán kilómetros.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

## 9.4. Fases

El estudio de investigación se realizará mediante cuatro fases las cuales se describen a continuación.

### 9.4.1. Fase 1: recolección de datos e información

Se investigará toda la información necesaria para la elaboración del nuevo modelo para optimizar las rutas de distribución, información proveniente de la empresa y búsqueda de bibliografía para la realización del estudio.

- Obtención de costos: se realizará una investigación y entrevistas para obtener el costo que ha representado la flota de distribución a la compañía durante los últimos tres años.
- Obtención de datos de demanda histórica: se solicitarán los registros de la cantidad de producto transportado por la flota en los últimos 3 años.
- Recolección de datos de transporte: se investigarán las capacidades de carga de la flota de transporte, las distancias capaces de recorrer y el tiempo de carga y descarga que actualmente se manejan.
- Obtención de datos de clientes: se ubicarán geográficamente a los clientes, obtener sus tiempos de descarga y la demanda que estos generan.
- Búsqueda de bibliografía para la realización del modelo: se investigarán los métodos de solución para VRP métodos exactos, heurísticas, metaheurísticas, desarrollo de Machine Learning y otros modelos de optimización de rutas.

#### **9.4.2. Fase 2: análisis de los datos**

Luego de la obtención de toda la información necesaria, se harán los siguientes análisis:

- Análisis de viajes: se determinará el costo promedio de cada viaje realizado, se determinará cuáles son rutas son las más costosas y cuáles son los viajes más prolongados.

- Pronóstico de demanda: a partir de la demanda histórica obtenida, se realizará una proyección de cuánto producto terminado será requerido por los clientes en un futuro.
- Identificación de factores: se evaluarán las capacidades de la flota actualmente subcontratada y si estas cumplen con la demanda proyectada.

#### **9.4.3. Fase 3: diseño del modelo**

Después de realizar el análisis de los datos, se procederá a realizar el diseño del modelo el cuál reducirá costos y mejorará los tiempos de entrega:

- Evaluación de los métodos de solución: se evaluarán los distintos métodos investigados en la primera fase de recolección: los métodos exactos, las de heurísticas, las de metaheurísticas, y el algoritmo de aprendizaje con *machine learning*.
- Determinación de método más favorable: a partir de las soluciones de los métodos anteriormente evaluados, se determinará cuáles son los más aptos para obtener el mejor beneficio para la empresa.
- Realización de cuadro comparativo: se realizará un cuadro comparativo de la situación actual, de las soluciones de los métodos encontrados para comparar los costos, tiempos de entrega y número de flota óptimo para cada escenario.

#### **9.4.4. Fase 4: validación e informe final**

Por último, se realizará la fase de validación, en la cual se decidirá por el mejor modelo que se ajuste acorde a las necesidades establecidas por la empresa, dando como resultado una propuesta presentando los ahorros por alcanzar, de tiempo y de costos.

- Presentación de resultados
- Redacción de conclusiones
- Redacción de recomendaciones
- Redacción de informe final.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Para este trabajo de investigación se llevarán a cabo observaciones directas durante las visitas a la empresa en la investigación de campo, además que como fuente principal de información se tomarán los registros históricos del departamento de logística en los cuales se encuentran los datos primordiales para el desarrollo de la información.

### 10.1. Técnicas de análisis de información

Para la observación de datos, se utilizarán las siguientes herramientas estadísticas:

- Diagrama de líneas: Este gráfico se utilizará para identificar las variables en el transcurso del tiempo. Con esta herramienta se analizarán los costos y demanda histórica.
- Diagrama de barras: este gráfico se utilizará para representar las distribuciones de tiempos. Con esto, se identificará el tiempo promedio del tiempo que se toman las unidades en realizar una entrega.
- Heurísticas para el VRP: estas heurísticas son procedimientos simples que realizan una exploración de los datos y brindan soluciones para los problemas de ruteo de vehículos. Se utilizarán distintas técnicas para brindar solución a la presente investigación.



## **10.2. Técnicas cualitativas**

- Investigación documental: se obtendrá información teórica para ser utilizada como fuente de consulta para el desarrollo de la investigación. Se hará un análisis sobre los distintos algoritmos y heurísticas que se utilizan para la solución de problemas de ruteo.

## **10.3. Técnicas de recopilación de datos**

Para la recopilación de datos y análisis del estado de las rutas actuales se utilizarán las siguientes herramientas:

- Registros: los principales datos con los que se trabajará el desarrollo de esta investigación serán los datos históricos que la empresa ya posee concernientes a los costos, tiempos y demandas que han manejado durante los últimos tres años.
- Observación: de forma estructurada se observarán la manera en la que se desarrollan las actividades relacionadas a la carga y descarga de los furgones, los tiempos de transporte y las rutas utilizadas. La información posteriormente será tabulada para su interpretación.
- Entrevistas: estas conversaciones se llevarán a cabo con el personal del departamento de logística, con el fin de recopilar información sobre el funcionamiento operativo del sistema de distribución, el estado de la flota, de las rutas y de las relaciones con los clientes.

El presente trabajo de investigación busca diseñar un modelo de optimización de rutas de distribución para el producto terminado, uno que permita lograr entregas más eficientes, rápidas y con el menor costo posible.







## **12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO**

La ejecución del presente trabajo de investigación es factible pues la fábrica de alimentos ha autorizado todos los accesos necesarios para la realización de este, así como se cuentan con los recursos indispensables para ejecutar todas las fases para cumplir con los objetivos establecidos.

### **12.1. Recursos necesarios**

- Humanos: disposición del personal del departamento de logística para compartir la información necesaria para la realización del trabajo de investigación.
- Tecnológico: acceso a internet.
- Informativo: acceso a la información requerida por la investigación, tomando en cuenta la confidencialidad de los datos sensibles para la empresa.
- Infraestructura: la facilitación del acceso a todas las áreas relacionadas con la investigación.

El recurso financiero será totalmente aportado por el investigador, el cual se desglosa en los siguientes rubros presentados.

Tabla VII. **Recursos necesarios para la investigación**

<b>Tipo de recurso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>	<b>%</b>
Humano	Tiempo de Investigador	Q. 5,000.00	76 %
Tecnológico	Internet	Q. 500.00	8 %
Materiales	Papelería	Q. 100.00	1 %
Transporte	Consumo combustible	Q. 800.00	12 %
Varios	Misceláneos	Q. 200.00	3 %
<b>TOTAL</b>		<b>Q. 6,600.00</b>	<b>100 %</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 13. REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo 379-2010. Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones. Diario de Centroamérica. 28 de enero de 2011.
2. Bermeo, E., y Calderón, J. (febrero, 2009). Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte. *El Hombre y la Máquina*, (32), 52-67. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47811604005>.
3. Bosona, T. (octubre, 2020). Urban Freight Last Mile Logistics—Challenges and Opportunities to Improve Sustainability: A Literature Review. *Sustainability* 2020, 12(21), 8769. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8769>.
4. Centro de Estudios para la Integración Económica. (2018). *El transporte en Centroamérica: importancia en la economía regional*. Guatemala: Secretaría de Integración Económica de Centroamérica. Recuperado de [http://estadisticas.sieca.int/documentos/ver/PB%20N23\\_%20Transporte%20importancia%20en%20la%20econom%C3%ADa%20centroamericana.pdf](http://estadisticas.sieca.int/documentos/ver/PB%20N23_%20Transporte%20importancia%20en%20la%20econom%C3%ADa%20centroamericana.pdf).
5. Demirci, İ., Özdemir, Ş. y Yayla, O. (junio, 2020). Comparison of Randomized Solutions for Constrained Vehicle Routing Problem. *2nd International Conference on Electrical, Communication and*



*Computer Engineering (ICECCE)*. Congreso llevado a cabo en Estambul, Turquía. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2005.05873>.

6. Domínguez, Ó. (2015). *Metaheurísticas aplicadas a la optimización de rutas de transporte en Vehículos con restricción de carga en 2 dimensiones* (Tesis de doctorado). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España. Recuperado de [https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/24393/4/0738509\\_00000\\_0000.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/24393/4/0738509_00000_0000.pdf).
7. Escudero-Santana, A., Muñuzuri, J., Lorenzo-Espejo, A. y Muñoz-Díaz, M.-L. (abril, 2022). Improving E-Commerce Distribution through Last-Mile Logistics with Multiple Possibilities of Deliveries Based on Time and Location. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 17(2), 507-521. Recuperado de <https://www.mdpi.com/0718-1876/17/2/27>.
8. Fellers, J. (2021). *Algorithm selection for the capacitated vehicle routing problem using machine learning classifiers* (Tesis de maestría). Universidad de Rhode Island, Estados Unidos. Recuperado de <https://digitalcommons.uri.edu/theses/1933>.
9. Fundación para el Desarrollo de Guatemala (2022). *Infraestructura Vial para la recuperación económica*. Guatemala: Autor. Recuperado de [https://www.fundesa.org.gt/content/files/publicaciones/Foro\\_Ley\\_de\\_Infraestructura\\_Vial.pdf](https://www.fundesa.org.gt/content/files/publicaciones/Foro_Ley_de_Infraestructura_Vial.pdf).

10. Furian, N., O'Sullivan, M., Walker, C., y Çela, E. (enero, 2021). A machine learning-based branch and price algorithm for a sampled vehicle routing problem. *OR Spectrum*, 43(3), 693-732 Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00291-020-00615-8>.
11. Giuffrida, N., Fajardo-Calderin, J., Masegosa, A. D., Werner, F., Steudter, M., y Pilla, F. (abril, 2022). Optimization and Machine Learning Applied to Last-Mile Logistics: A Review. *Sustainability* 2022, 14(9), 5329. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5329>.
12. Ichoua, S., Gendreau, M., y Potvin, J.-Y. (2007). *Dynamic Fleet Management*. Boston, Estados Unidos: Springer. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-71722-7>.
13. Iyer, A., Gkritza, K., Dunlop, S., Thakkar, D., Candanedo, R., y Jayan, S. (2021). Last Mile Delivery and Route Planning for Freight. Indiana: Purdue University. Recuperado de <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3300&context=jtrp>.
14. Jeřábek, K., Majercak, P., Kliestik, T., y Valaskova, K. (enero, 2016). Application of Clark and Wright's Savings Algorithm Model to Solve Routing Problem in Supply Logistics. *Naše More*, 63(3), 115-119 Recuperado de <https://doi.org/10.17818/NM/2016/SI7>.
15. Kadłubek, M., Thalassinou, E., Domagała, J., Grabowska, S., & Saniuk, S. (junio, 2022). Intelligent Transportation System Applications and Logistics Resources for Logistics Customer Service in Road Freight

Transport Enterprises. *Energies* 2022, 15(13), 4668. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4668>.

16. Kucukkoc, I., y Zhang, D. (2022). On applications of ant colony optimisation techniques in solving assembly line balancing problems. *OR55 Annual Conference*, Congreso llevado a cabo en Balıkesir, Turquía. Recuperado de <https://core.ac.uk/outputs/43098377>.
17. Larsen, A., Madsen, O.B., y Solomon, M.M. (2007). *Classification Of Dynamic Vehicle Routing Systems en Zeimpekis*. Boston, Estados Unidos: Springer.
18. Lozano, G. (2018). *Optimización de ruta de venta utilizando métodos de Clarke - Wright y de Barrido* (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11285/629954>.
19. Martínez-Bernal, J., Cuervo-Cruz, R., y Orjuela-Castro, J. (septiembre, 2020). Modelos logísticos estocásticos: una revisión de la literatura. *Aibi Revista De Investigación, Administración E Ingeniería*, 8(S1), 269-285. Recuperado de [https://revistas.udes.edu.co/aibi/article/view/modelos\\_logisticos\\_estocasticos\\_una\\_revision\\_de\\_la\\_literatura](https://revistas.udes.edu.co/aibi/article/view/modelos_logisticos_estocasticos_una_revision_de_la_literatura).
20. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. (2017). *Plan de Desarrollo Vial (2018-2032)*. Guatemala: Autor.

21. Myung, Y.-S., y Yu, Y.-M. (junio, 2022). A Freight Transportation Network Model with a New Bundling Option. *Sustainability* 2022, 14(13), 7556. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/13/7556>.
22. Perboli, G., Rosado, M., y Gobbato, L. (2016). Decision support system for collaborative freight transportation management: a tool for mixing traditional and green logistics. *6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*. Congreso llevado a cabo en Bordeaux, Francia. Recuperado de [http://ils2016conference.com/wp-content/uploads/2015/03/ILS2016\\_SB03\\_4.pdf](http://ils2016conference.com/wp-content/uploads/2015/03/ILS2016_SB03_4.pdf).
23. Pichpibul, T., y Kawtummachai, R. (diciembre, 2013). A Heuristic Approach Based on Clarke-Wright Algorithm for Open Vehicle Routing Problem. *The Scientific World Journal*, 2013(874349), 1-11. Recuperado de <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/874349/>.
24. Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B., y Roccotelli, M. (marzo, 2018). A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision. *Sustainability* 2018, 10(3), 782. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/782>.
25. Wassan, N. (enero, 2014). Vehicle routing problem with deliveries and pickups: Modelling issues and meta-heuristics solution approaches. *International Journal of Transportation*, 2(1), 95-110. Recuperado de [http://article.nadiapub.com/IJT/vol2\\_no1/6.pdf](http://article.nadiapub.com/IJT/vol2_no1/6.pdf).



## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. Matriz de coherencia

	Elementos del problema	Preguntas de investigación	Objetivos
General	Existe un alto grado de incumplimiento en las entregas y la movilización de producto terminado.	¿Cómo mejorar el modelo actual para reducir los tiempos de entrega y disminuir los costos de la distribución en una fábrica de alimentos para animales?	Diseñar un modelo de evaluación y de optimización de rutas de distribución para reducir los tiempos de entrega y disminuir los costos de distribución de una fábrica de alimentos para animales.
	Existen ocasiones en las que la flota tiene unidades ociosas y otras en las que las no son suficientes para el transporte.	1. ¿Cuáles son los principales factores que afectan la capacidad de la flota ya instalada en la fábrica?	Identificar los principales factores que afectan la capacidad de la flota ya instalada en fábrica.
Específicos	La empresa no cuenta con un método de planificación de rutas	2. ¿Cuál es el método más adecuado según los requerimientos de la empresa para establecer las rutas de entrega?	Seleccionar el método de planificación de ruta más adecuado según la demanda y las capacidades de la flota.
	Las rutas de entrega con las que cuenta la empresa no son planificadas	3. ¿Cuáles son las rutas óptimas para realizar las entregas del producto terminado?	Establecer las rutas óptimas de entrega para reducir los tiempos de entrega y minimizar los tiempos muertos de las unidades.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.