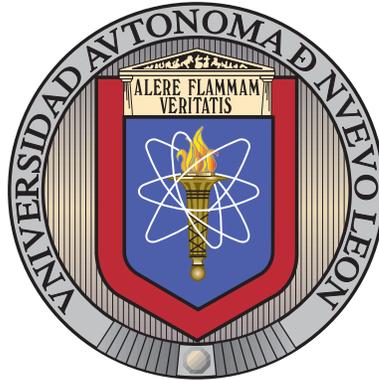


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS
CONSIDERANDO LA SEGURIDAD EN LA CADENA
DE SUMINISTRO

POR

ING.MARILYN ROXANA LOZADA DARIO

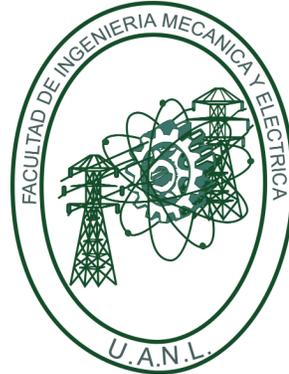
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

ABRIL 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS
CONSIDERANDO LA SEGURIDAD EN LA CADENA
DE SUMINISTRO

POR

ING.MARILYN ROXANA LOZADA DARIO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

ABRIL 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Problema de ruteo de vehículos considerando la seguridad en la cadena de suministro”, realizada por el/la estudiante Marilyn Roxana Lozada Darío, con número de matrícula 2033952, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa
Director

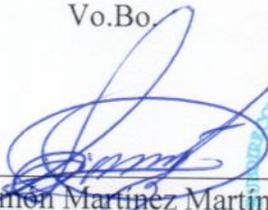
Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas
Co-director

Dr. Tomás Eloy Salais Fierro
Revisor

Dr. Luis Alfonso Infante Rivera
Revisor

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez
Revisor

Vo.Bo


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución: 190001

Programa: 642597

Acta Núm: 4032

Ciudad Universitaria, a junio 2022.

Con la más profunda gratitud, a mi familia, amigos que han aderezado mi vida con su amor y sabiduría pero especialmente a esa persona que estuvo conmigo en los momentos más difíciles, Aldo Alejandro Vázquez Mata .

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XIII
Resumen	xv
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Justificación	3
1.5. Metodología	5
1.6. Estructura de la tesis	5
2. Antecedentes	7
2.1. Problema de ruteo de vehículos	7
2.2. Elementos fundamentales de un problema de ruteo de vehículos	8
2.2.1. Clientes	8
2.2.2. Vehículos	9

2.2.3. Objetivos	10
2.3. Problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP)	10
2.3.1. Modelación matemática para el CVRP	11
2.4. Variantes del VRP	13
2.4.1. VRP Homogéneo	13
2.4.2. VRP Heterogéneo	14
2.5. Métodos de resolución para el VRP	16
2.5.1. Métodos exactos	16
2.6. Seguridad en la cadena logística	17
2.6.1. Nivel de riesgo sobre las cadenas logísticas terrestres	18
2.6.2. Análisis de la seguridad de las cadenas logísticas terrestres de México	19
2.7. Criterios de evaluación	22
2.7.1. Indicadores de desempeño en seguridad	22
2.7.2. Vehículos	23
2.7.3. Infraestructura	23
2.7.4. Usuarios	24
2.8. Selección de herramienta para la evaluación de los criterios de riesgo en carreteras	24
2.8.1. Métodos de decisión multicriterio	25
2.8.2. Utilidad multiatributo (MAUT)	26

2.8.3. Método TOPSIS	26
2.8.4. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	27
3. Metodología	29
3.1. Proceso analítico jerárquico	30
3.1.1. Identificación de criterios	30
3.1.2. Establecer un modelo de jerarquía	31
3.1.3. Diseño de la herramienta	32
3.1.4. Perfil del encuestado	33
3.1.5. Establecer una matriz de comparación por pares	34
3.2. Safety Vehicle Routing Problem	35
3.2.1. Definir Parámetros	35
3.2.2. Definir Variables	36
3.2.3. Definir Función objetivo	36
3.2.4. Formulación del problema	37
4. Análisis y resultados	38
4.1. Aplicación del Proceso analítico jerárquico	38
4.1.1. Resultados del Proceso analítico jerárquico	41
4.2. Safety Vehicle Routing Problem	43
4.2.1. Creación de instancias	43
4.2.2. Implementación Computacional	44

4.2.3. Experimentación computacional	44
5. Conclusiones	62
5.1. Aportación científica	63
5.2. Trabajo a futuro	63
A. Apéndice	64
A.1. Estructura y resultados del cuestionario	64
A.2. Juicios de expertos	67

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Incidencia delictiva del fuero común, robo a transportista	4
2.1. Variantes VRP	13
2.2. Evaluación del riesgo global de robo de mercancías	19
2.3. Zonas de alto riesgo de robo de carga en México	20
2.4. Robo de carga en México por producto	21
3.1. Árbol jerárquico con objetivo, criterios y Subcriterios	32
3.2. Perfil de expertos	33
4.1. Jerarquía de decisiones	39
4.2. Comparación por pares factores de riesgo en el autotransporte	40
4.3. Matriz consolidada de la comparación por pares	41
4.4. Factores más influyentes en los riesgos del transporte de mercancías .	42
4.5. Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	47
4.6. Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.9, lambda tiempo 0.1	47
4.7. Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.3, lambda tiempo 0.7	48

4.8. Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	49
4.9. Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	51
4.10. Resultados 10 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	52
4.11. Resultados 15 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	54
4.12. Resultados 15 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	55
4.13. Resultados 15 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	56
4.14. Resultados 20 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	57
4.15. Resultados 30 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5	60

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Robo de carga en México por estado	20
2.2. Revisión de literatura	25
2.3. Escala de preferencia	27
3.1. Factores relevantes encontrados en literatura	30
3.2. Índice de consistencia aleatoria (RI) para (n) criterios	34
4.1. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A 7 clientes .	46
4.2. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B 7 clientes .	49
4.3. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C 7 clientes .	50
4.4. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A con 10 clientes	51
4.5. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B con 10 clientes	52
4.6. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C con 10 clientes	53
4.7. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A con 15 clientes	53
4.8. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B con 15 clientes	55
4.9. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C con 15 clientes	56

4.10. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A con 20 clientes	58
4.11. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B con 20 clientes	58
4.12. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C con 20 clientes	59
4.13. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A 30 clientes .	60
4.14. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B 30 clientes .	61
4.15. Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C 30 clientes .	61

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida.

A mis hermanas, que me alentaron a llegar hasta el final y que son mi motivación para nunca rendirme.

A la Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa, mi asesora de tesis, por haber compartido conmigo sus conocimientos, por la dedicación para la dirección de este trabajo, por su paciencia y por haberme guiado para finalizar con éxito esta faceta de mis estudios.

A mi co-asesor el Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas, por su apoyo, esfuerzo, confianza y dedicación para la realización de este trabajo.

Al Dr. Luis Alfonso Infante Rivera, Por apoyarme durante toda la realización de este trabajo, por sus infinitas asesorías y siempre resolver mis dudas, simplemente GRACIAS.

Al Dr. Tomas Eloy Salais Fierro por su tiempo, atención y consejos durante mi estancia en la maestría.

A la Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez, por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por el apoyo y la oportunidad para cursar la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por brindarme los recursos durante la realización de los estudios.

RESUMEN

Ing. Marilyn Roxana Lozada Dario.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CONSIDERANDO LA SEGURIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO.

Número de páginas: 73.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Diseñar un modelo de transporte que optimice el tiempo y costo total del transporte considerando la seguridad en las rutas. Este estudio se divide en dos fases: (i) primeramente, se implementa un proceso analítico jerárquico para identificar los criterios o factores de riesgo en el autotransporte de carga como lo son iluminación, carga de trabajo, tipo de vehículo, entre otros; (ii) seguido, definimos un problema de ruteo de vehículos que además de minimizar el costo de ruta, también reduce el nivel de riesgo de la distribución, considerando los factores medibles en base a información histórica de la actividad logística del país.

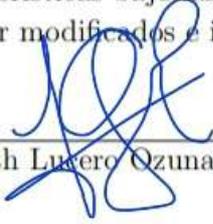
CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: El problema de optimización que estudiamos en esta tesis nos permitió visualizar cómo cambiaría la importancia del objetivo en función al peso que se le asigne a cada λ (riesgo o tiempo), así como la programación de las rutas de entrega utilizadas para satisfacer las necesidades del cliente. Algunos de los hallazgos más importantes al final de la experimentación fueron:

- Entre mayor sea el riesgo asignado será más difícil para el SOLVER resolver la instancia.

- Cuando el tiempo tenga una mayor ponderación el solver lograr reducir considerablemente el GAP.
- Se pueden considerar una gran diversidad de factores que inciden en el riesgo al robo al autotransporte de carga para establecer una medida de seguridad, todo dependerá de que tan alcanzable sea el modelar las condiciones del problema que se busquen incluir.

El modelo que hemos desarrollado en este trabajo es fácilmente adaptable a cualquier caso que cumpla con las características bajo las cuales se trabajó en este problema, sus parámetros solo deberán ser modificados e ingresar los datos requeridos.

Firma del asesor:


Dra. Edith Luero Ozuna Espinosa

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La necesidad de garantizar la seguridad de la cadena de suministro, es cada vez más evidente. En la situación actual, con una economía global y con un flujo de transporte de mercancías en continuo crecimiento, poder garantizar la seguridad de la cadena de suministro es imprescindible para la continuidad de las actividades económicas, y, por tanto, las empresas de transporte y en particular las de transporte de carga por carretera deben incorporar medidas que les permitan proveer un servicio para asegurar la confiabilidad del envío y minimizar las pérdidas o daños de mercancías durante su traslado (Cepal, 2013). Para mejorar estos aspectos, las empresas de autotransporte deben aplicar algunas herramientas que le permitan planear y controlar las actividades de distribución, donde en la mayoría de los casos implica necesariamente la toma de decisiones sobre la reducción en el costo de transporte que permita satisfacer la demanda de los clientes de manera eficiente. Este problema ya ha sido estudiado en la literatura y se le conoce como Problema de Ruteo de Vehículos (VRP, por sus siglas en inglés *Vehicle Routing Problem*). Se ha desarrollado diferentes variantes del problema para hacer frente a muchas aplicaciones de la vida real recogida de residuos, distribución de mercancías, transporte de materiales peligrosos, etc. Sin embargo, un campo de investigación que no ha recibido mucha atención hasta ahora, se refiere a la cuestión de la seguridad en las rutas.

En México el robo de carga sigue siendo una de las amenazas más graves

para las empresas de auto transporte con pérdidas anuales estimadas en miles de millones de dólares, equivalentes a 11,662 incidentes en el año 2019, de los cuales un 80% de los casos estuvieron involucrado con algún tipo de violencia hacia el operador (CANACAR, 2019). No obstante, México cuenta con pocas herramientas para identificar las principales variables relacionadas con en el riesgo de robo al auto transporte.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La importancia de tener un buen diseño y planificación correcta de las rutas de transporte en ocasiones pasa desapercibida. La optimización de rutas consiste en definir la planificación óptima de una flota de vehículos, en la cual se determine, para cada vehículo, el conjunto de nodos (clientes, instalaciones, zonas, etc.) a visitar y el orden en que deben ser visitados. Este problema se generaliza a el problema de ruteo de vehículos (VRP), donde se cuenta con una flota de vehículos que parten de un nodo central (almacén, centro de distribución) hasta un número de clientes dispersos geográficamente. Cada ruta inicia y termina en el depósito, cada cliente debe ser visitado exactamente una vez por un solo vehículo para satisfacer su demanda y la carga de cada vehículo no debe exceder su capacidad. Adicionalmente, estas rutas deben cumplir cierto criterio u objetivo, que usualmente es el minimizar el tiempo de uso de la flota de vehículos. Sin embargo, en la literatura revisada, la seguridad en las rutas no es considerada dentro de los objetivos clásicos que estudia el ruteo de vehículo, por lo que representa un problema para las organizaciones de transporte ya que al no tener cubierto este aspecto en su enrutamiento, genera robos o siniestros a sus unidades, obteniendo pérdidas de hasta 1,325 millones de pesos (CANACAR, 2019).

1.2 OBJETIVO

Diseñar un modelo de transporte que optimice el tiempo y costo total del transporte considerando la seguridad en las rutas.

1.3 HIPÓTESIS

Mediante el diseño de un modelo de transporte, considerando las variables clásicas del problema de ruteo de vehículo permitirá optimizar la distancia recorrida, tiempo de distribución y satisfacer la seguridad en las ruta para obtener una disminución de los incidentes en carreteras.

1.4 JUSTIFICACIÓN

CANACAR (2019) expone que en México la industria del autotransporte de carga proporciona servicio a 71 actividades económicas del país generando alrededor de cuatro millones de empleos, de los cuales 1.5 millones son directos y 2.5 indirectos, consolidándose como un sector vital para la economía nacional, movilizandando 556 millones de toneladas de productos esto equivale al 81.3% de la carga terrestre y el 55.5% de la carga domestica total, siendo una de las modalidades más dinámicas de todo el sector de transporte representando un peso económico del 3.2% del producto interno bruto (PIB), que contribuye con el 50% del PIB logístico en México que asciende a 6.5%. Sin embargo, esta industria se ha visto afectada por los siniestros y robos en carreteras federales, como se puede observar en la Figura 1.1.



FIGURA 1.1: Incidencia delictiva del fuero común, robo a transportista

Fuente: (CANACAR, 2019).

La carga más sustraída son abarrotes, licores, cigarrillos, electrodomésticos, fármacos, ropa y material para la construcción, entre otros enseres de fácil reducción. SensiGuard (2019) estima que se cometen en promedio 600 asaltos anuales a transportistas, los cuales han generado lesiones graves a los operadores de transporte, a lo cual se suma que entre el 5 % y el 10 % de esos siniestros terminan en la muerte del conductor.

Los actos delictivos contra las cadenas de suministro, no solamente encarecen los costos logísticos, sino que además desalientan el emprendimiento y el comercio formal, generando importantes repercusiones económicas para las empresas y para el desarrollo económico nacional y regional.

Desde el punto de vista de las empresas, la falta de seguridad incide en sus costos operacionales, incrementando el *lead time*, el volumen de inventarios, el valor de las primas de seguro, entre otros ítem, que en definitiva encarecen el precio de los productos y los hace menos competitivos internacionalmente.

Para el Estado la inseguridad sobre las cadenas logísticas afecta la imagen

del país, incrementa la sensación de inseguridad en la población, reduce los ingresos tributarios, desalienta el emprendimiento y la inversión privada, encareciendo además los precios de los bienes que la población nacional consume, afectando a todos elementos que reducen el crecimiento económico y desarrollo social.

Estos aspectos justifican la incorporación de esta dimensión en el problema de ruteo de vehículos.

1.5 METODOLOGÍA

Este estudio se divide en dos fases: (i) primeramente, se implementa un proceso analítico jerárquico para identificar los criterios o factores de riesgo en el autotransporte de carga como lo son iluminación, carga de trabajo, tipo de vehículo, entre otros; (ii) seguido, definimos un problema de ruteo de vehículos que además de minimizar el costo de ruta, también reduce el nivel de riesgo de la distribución, considerando los factores medibles en base a información histórica de la actividad logística del país.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de estudio está segmentado en los siguientes capítulos: En el primer capítulo se presenta la introducción y generalidades de la tesis; da a conocer la problemática en estudio y el objetivo propuesto. El capítulo dos aborda los antecedentes; por medio de revisión de literatura se analizan y comparan casos similares de estudio. El tercer capítulo lo corresponde a la metodología que contiene las etapas del desarrollo de la tesis. En el cuarto capítulo denominado resultados se hace un análisis con los datos obtenidos mediante la aplicación de la propuesta. Por último, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones que revela la investigación, el desarrollo y la validación de la propuesta además de incluir las contribuciones y

trabajo futuro.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

El presente capítulo muestra el estado del arte del problema que justifica esta investigación y una breve introducción a conceptos básicos que ayudan al entendimiento del mismo. Esta revisión de la literatura tiene como propósito conocer los problemas presentados en los últimos años relacionados con el tema y la manera en que los autores han encontrado las mejores aportaciones para la soluciones de estos problemas.

2.1 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

El problema de ruteo de vehículos surge cuando Dantzig y Ramser (1959) realizan por primera vez una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible. En este artículo ellos definen dicho problema como: «*la determinación de la ruta óptima para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos (almacenes) para satisfacer la demanda de varios clientes dispersados geográficamente*».

Cinco años después, Clarke y Wright (1964) generalizaron este problema a un problema de optimización lineal conocido como *Savings Algorithm* en este problema se define cómo atender a un conjunto de clientes, distribuidos geográficamente

alrededor del depósito central, utilizando una flota de camiones con diferentes capacidades, desde entonces cientos de modelos han sido propuestos para solucionar este problema y sus diferentes versiones por este tipo de problemas envuelve a los investigadores hasta el día de hoy.

Como el VRP es un problema NP-difícil, los algoritmos exactos solo son eficientes para casos de problemas pequeños, por su parte las heurísticas y meta-heurísticas suelen ser más adecuadas para aplicaciones prácticas. El tiempo y esfuerzo computacional requerido para resolver este problema aumenta exponencialmente respecto al tamaño del problema, es decir, la cantidad de nodos a ser visitados por los vehículos. Por esta razón se han ideado algoritmos que no garantizan optimalidad, pero que logran entregar buenas soluciones a estos problemas.

2.2 ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE UN PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Toth y Vigo (2002) Mencionan que los elementos fundamentales en un VRP, que determinaran la variante del VRP que debe aplicarse, están relacionadas con las características de los clientes, de los vehículos, así como los objetivos específicos a alcanzar. Descritos a continuación:

2.2.1 CLIENTES

Las características principales asociadas a clientes son:

- Un vértice en la red vial que representa su localización.
- Cantidad de bienes o demandas, posiblemente de diferentes tipos que deben ser entregados o recolectados.

- Ventanas de tiempo: período durante el cual el cliente debe ser atendido.
- Tiempo requerido para entregar o recolectar los bienes o pedidos.
- Conjunto de vehículos disponibles que pueden utilizarse para atender al cliente.
En algunas ocasiones no es posible satisfacer la demanda del cliente en su totalidad.

En estos casos, la cantidad entregada o recolectada puede ser reducida o un conjunto de clientes pueden no ser servidos. Para esto se asocian prioridades o penalidades a los clientes.

2.2.2 VEHÍCULOS

El transporte de mercancías se lleva a cabo utilizando una flota de vehículos cuya composición y tamaño pueden fijarse o definirse según las necesidades de los clientes.

Características típicas de los vehículos:

- Depósito de los vehículos en ocasiones se tiene la posibilidad de finalizar el servicio en un depósito distinto al origen.
- Capacidad del vehículo expresado como peso máximo, volumen y número de pallets que el vehículo puede cargar.
- Posible subdivisión del vehículo en compartimentos, cada una caracterizada por su capacidad y por el tipo de bienes que puede transportar.
- Dispositivos disponibles para las operaciones de carga y descarga.
- Subconjunto de arcos del grafo por los que el vehículo puede transitar.
- Costo asociado a la utilización del vehículo, en unidades de distancia, de tiempo, de ruta, etc.

2.2.3 OBJETIVOS

Se pueden considerar varios objetivos típicos en un problema de ruteo de vehículos, algunos de ellos son:

- Minimización del costo global de transportación, que depende de la distancia total recorrida y de los costos fijos asociados a cada vehículo.
- Minimización del número de vehículos necesarios para satisfacer a todos los clientes.
- Balanceo de rutas para la carga de los vehículos o del tiempo de viaje.
- Minimización de las penalidades asociadas con el servicio parcial a los clientes.

o cualquier combinación ponderada de estos objetivos.

2.3 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CAPACITADO (CVRP)

La versión básica del VRP es el problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP), en el cual cada vehículo tiene asignada una capacidad (Toth y Vigo, 2002). En el CVRP cada cliente tiene una demanda que es conocida y que tiene que ser servida en su totalidad por un único vehículo. Cada uno de los clientes se puede ver como un nodo de una red, para conectar a los clientes se tienen arcos los cuales pueden ser dirigidos o no, en dependencia de si se puede viajar por el arco en ambos sentidos. Cuando el arco es no dirigido se conoce como arista. Cada arco tiene asociado un costo no negativo. Se cuenta con un número K de vehículos disponibles los cuales tienen una capacidad limitada Q .

2.3.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA EL CVRP

Para la modelación del CVRP consideraremos la siguiente notación:

- Sea $G = (V, A)$ un grafo completo no dirigido.
- $V = 0, \dots, n$ es el conjunto de vértices, el vértice 0 está asociado al depósito y los restantes están asociados a los clientes .
- A es el conjunto de aristas, $A = (i, j) : i, j \in V, i \neq j$
- Matriz C , está se forma de los costos no negativos c_{ij} de viajar del vértice i al vértice j . La matriz es simétrica cuando se cumple que $c_{ij} = c_{ji}$. Esta matriz satisface la desigualdad triangular: $c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij} \quad \forall, j, k \in V$
- Flotilla de K vehículos de capacidad Q .
- Cada cliente $i \in V$ distinto del depósito, tiene asociada una demanda no negativa d_i

Las variables de decisión son x_{ij} que será 1 si el arco $(i, j) \in A$ se encuentra en la solución y 0 en otro caso. Note que $x_{ij} = 1$ significa que los clientes i y j pertenecen a la misma ruta y que j es visitado exactamente después de i , por el mismo vehículo.

Modelo Matemático

El modelo de dos índices tomado de Toth y Vigo (2002) es el siguiente:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij}$$

sujeto a

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (2.1)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (2.5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n \quad (2.6)$$

Las ecuaciones 2.1 y 2.2 imponen que un solo vehículo visite cada cliente, las ecuaciones 2.3 y 2.4 controlan la entrada y salida de vehículos del depósito, es decir, los k vehículos que salen del depósito deben regresar a él. La restricción 2.5 se utiliza para la eliminación de subtours, donde un subtour es un tour en el cual no se incluye al depósito, $r(S)$ es el mínimo número de vehículos que se necesitan para servir al conjunto S , estas son llamadas restricciones de capacidad y corte, las cuales son de cardinalidad exponencial en n y son las restricciones difíciles para el modelo.

2.4 VARIANTES DEL VRP

Las variantes del VRP se clasifican en base a las características de los clientes, depósitos, vehículos y de las restricciones operativas. Algunas de estas se ilustran en la Figura 2.1:

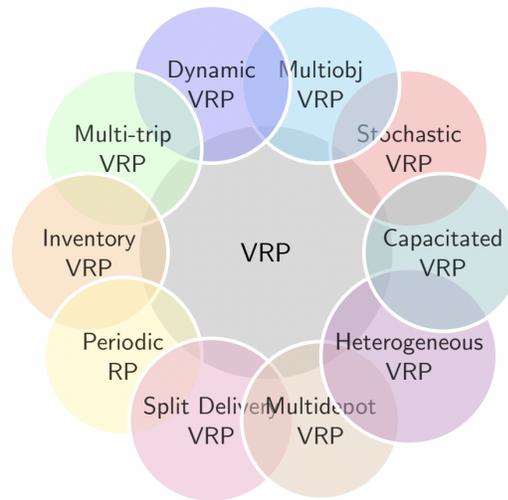


FIGURA 2.1: Variantes VRP

Fuente: Elaboración propia

2.4.1 VRP HOMOGÉNEO

El VRP homogéneo se refiere a características comunes en las que todos los nodos manejan el mismo recurso como distancia, ventanas de tiempo, retornos y entregas fraccionadas.

- **Ventanas de tiempo VRPTW:** El objetivo es minimizar la flota, los tiempos y costos relacionados al viaje. Para brindar un mejor servicio, se manejan ventanas de tiempo angostas, beneficiando a los clientes al disminuir los tiempos de espera (Kallehauge y Solomon, 2002). En Restrepo *et al.* (2008) se

establece que el servicio de cada cliente debe iniciar dentro de una ventana de tiempo asociada y el vehículo debe detenerse en el centro de consumo por instantes de tiempo.

- **El VRP con retornos (VRPB):** Los consumidores pueden demandar o retornar algunas mercancías. Es necesario tener en cuenta cuales de los bienes que los consumidores devuelven al vehículo de reparto pueden caber en él. El supuesto más crítico en lo que respecta a todas las entregas, es que éstas deben ser realizadas en cada ruta antes de que alguna recogida pueda ser iniciada. Esto surge del hecho de que los vehículos son cargados en la parte trasera y las cargas reacomodadas en los camiones y que los puntos de entrega son considerados económicamente factibles. Las cantidades a ser distribuidas y recogidas son fijas y conocidas con anticipación(Zhong y Cole, 2005).
- **El VRP con Recogida y Entrega (VRPPD):** Una flota de vehículos heterogénea basada en múltiples terminales debe satisfacer un conjunto de solicitudes de transporte. Cada solicitud se define por un punto de recogida, un punto de entrega correspondiente y una demanda que debe ser transportada entre estos lugares. El transporte solicitado puede incluir bienes o personas. Este último entorno se denomina " *dial-a-ride*". La función o funciones objetivas generalmente minimizan los costos del sistema(Desaulniers *et al.*, 2002).

2.4.2 VRP HETEROGÉNEO

Los modelos VRP heterogéneos referidos a componentes desiguales, se han clasificado en siete tipos los cuales se presentan a continuación:

- **Problema de Ruteo de Vehículos Flota Heterogénea (VRPHF):** En él los costos y capacidades de los vehículos varían; en esta formulación se asume que la cantidad de vehículos de cada tipo es ilimitada, se decide sobre las rutas y la composición de la flota de vehículos a utilizar (Golden y Raghavan, 2008).

- **Problema de Ruteo de Vehículos Periódico(PVRP):** En los VRP clásicos, típicamente el periodo de planeación es de un solo día, en el caso del VRP periódico (PVRP) el modelo se extiende a un período de planeación de M días.
- **Problema de Ruteo de Vehículos multicriterio (Multi-Trip VRP):** Consiste en que cada vehículo puede llevar a cabo varias rutas en el mismo periodo de planeación (Azi *et al.*, 2010). Resolver este tipo de problema no sólo implica el diseño de un conjunto de rutas, sino también la asignación de esas rutas de los vehículos disponibles. Esto hace que este tipo de problema sea muy práctico a nivel operativo, en el cual los horarios diarios de los conductores deban estar diseñados para una flota de vehículos fija.

Una compañía puede tener muchos depósitos para atender a sus clientes. Si los clientes son agrupados alrededor de los depósitos, entonces el problema de distribución debe ser modelado con un conjunto de VRP independientes. Sin embargo, si los clientes y los depósitos están entremezclados entonces se debe plantear como un problema VRP multidepósito (MDVRP, *Multiple-Depot VRP*). Un MDVRP requiere de la asignación de clientes a depósitos, de la asignación de una flota de vehículos a cada depósito, cada vehículo origina desde un depósito, un servicio al cliente asignado a ese depósito, y el retorno al mismo depósito (Toth y Vigo, 2002).

- **Problema de Ruteo de Vehículos Múltiples Capacidades(MCVRP):** Consiste en transportar más de una cantidad de objetos a la vez, es decir, si el CVRP se puede considerar como VRP con capacidad 1 y el MCVRP se considera como capacidad mayor a 1.
- **Problema de Ruteo de Vehículos Múltiples Objetivos(MOVRP):** Consiste en utilizar varios objetivos que pueden relatar diferentes aspectos del VRP como ruta (costo, beneficio, etc.), nodos y arcos (ventanas de tiempo, satisfacción del cliente, etc.) y recursos (mantenimiento de flota de vehículos, especificaciones de producto, etc.)

- **Problema de Ruteo de Vehículos Tamaño de Flota (SVRP):** Se trata del Problema de Ruteo de Vehículos Estocástico donde uno o varios componentes de la formulación son aleatorios. Fue planteado inicialmente en 1983, e incluye tres variaciones Tan *et al.* (2007) : VRPUD, cuando la demanda de cada consumidor es una variable aleatoria; VRPSTT cuando los tiempos de servicio y tiempos de viaje son variables aleatorias; y el SVRP-SN, en el cual cada consumidor tiene una probabilidad p de presentarse y $(1-p)$ de estar ausente.

2.5 MÉTODOS DE RESOLUCIÓN PARA EL VRP

En lo que respecta a los métodos de solución, de la revisión bibliográfica se concluyó que se han abordado tres grandes categorías, las cuales pueden ser agrupadas de la siguiente manera: métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas.

2.5.1 MÉTODOS EXACTOS

Son aquellos que parten de una formulación como modelos de programación lineal (enteros) o similares y llegan a una solución factible (entera) gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles. Los métodos exactos son eficientes en problemas hasta de 50 depósitos (Azi *et al.*, 2010), debido a restricciones de tiempo computacional. Los métodos exactos se pueden clasificar en tres grupos: programación dinámica, programación lineal y entera.

2.5.1.1 Programación dinámica

Propuesto por Eilon, Watson-Gandy y Christofides en 1971. En el método se considera un número fijo de m vehículos. Encuentra primero el costo mínimo alcanzable utilizando k vehículos, teniendo en cuenta la función del costo en la longitud de una ruta de vehículos a través de todos los vértices del subconjunto, luego encuentra el costo de todos los subconjuntos de vértices con m vehículos (Laporte, 1991).

2.5.1.2 Programación entera

El método de partición y generación de columnas se considera un conjunto factible de rutas y un coeficiente binario que es igual a uno si, y solo si, determinado depósito pertenece a una ruta. También se tiene en cuenta el costo óptimo de una ruta y una variable binaria que es igual a uno si, y solo si, esa ruta es utilizada en la solución óptima (Yepes Piqueras, 2002).

2.6 SEGURIDAD EN LA CADENA LOGÍSTICA

Seguridad de la Cadena de Suministro (SCS) es el concepto que abarca las normas, programas, sistemas, procedimientos, tecnologías y soluciones aplicadas por las organizaciones para hacer frente a las amenazas que ponen en riesgo el logro de los objetivos de la cadena de suministro (Donner, 2009).

La interrupción de una cadena logística, ya sea producto de una falla administrativa, actos delictivos o terroristas tiene enormes repercusiones para la competitividad de la economía nacional, donde a las pérdidas directas producidas por el

sinistro, se deben agregar sus efectos de propagación en el resto de la cadena de suministro, tales como retrasos e incumplimientos con los clientes, pérdidas de contratos o aumento en los niveles de inventario necesarios para hacer frente la mayor variabilidad en los tiempos de entrega entre otros factores, que en definitiva terminan agravando los costos logísticos nacionales (Cepal, 2013).

El robo y su crecimiento son una problemática global que afecta a una gran cantidad de regiones en el mundo; México no es una excepción. La delincuencia está presente en muchos sectores que, por la naturaleza de sus giros, son puntos de atención por los altos índices de robo. Entre los sectores más afectados a nivel nacional se encuentra el transporte de mercancías.

2.6.1 NIVEL DE RIESGO SOBRE LAS CADENAS LOGÍSTICAS TERRESTRES

De acuerdo con SensiGuard (2019) una compañía líder en servicios de seguridad en logística revela que México está dentro de los 7 países con más riesgo a nivel mundial para el transporte terrestre de mercancías en función del número de siniestros denunciados ante la autoridad.

Los riesgos de robo de mercancías a nivel mundial, como se observa en la Figura 2.2, varían mucho de un país a otro. Incluso dentro de cada país, los riesgos pueden variar de una región a otra. En cada país, las amenazas de robo de carga, como la mayoría de las actividades delictivas, suelen estar arraigadas en las condiciones sociales, económicas y culturales.

La prevención del robo de carga a escala mundial requiere un conocimiento profundo de las tendencias de los incidentes a escala regional, ya que los programas de seguridad y la mitigación de los riesgos pueden variar de región a región.

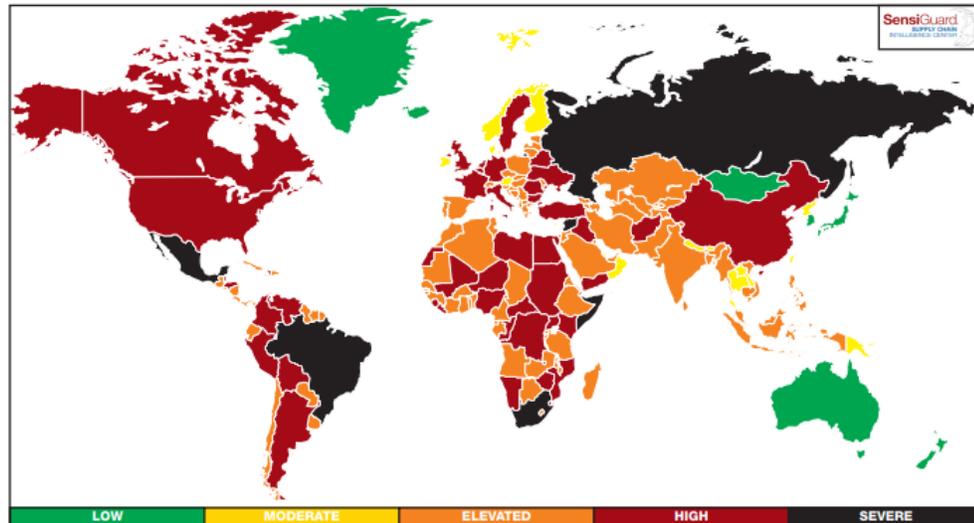


FIGURA 2.2: Evaluación del riesgo global de robo de mercancías

Fuente: CANACAR (2019).

2.6.2 ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD DE LAS CADENAS LOGÍSTICAS TERRESTRES DE MÉXICO

De acuerdo De la Torre *et al.* (2013), la alta incidencia de robos carreteros de carga en México reduce la competitividad del país en el sector logístico, genera pérdidas económicas, tiempos de entrega más largos e indirectamente agrava la situación de falta de operadores de transporte calificados, lo anterior debido a que los robos se comenten cada vez con más violencia hacia ellos lo que amenaza su integridad física y los motiva a buscar otras fuentes de ingresos menos riesgosas.

Las zonas de alto riesgo de robo de carga se concentran en las regiones occidental y central de México, principalmente en los estados de Puebla, Michoacán, Nuevo León y Estado de México. En la Figura 2.3 se muestran las zonas de alto riesgo de robo de carga en México, donde se destacan el estado de México, Puebla, Michoacán, Nuevo León, San Luis Potosí entre otros estados.

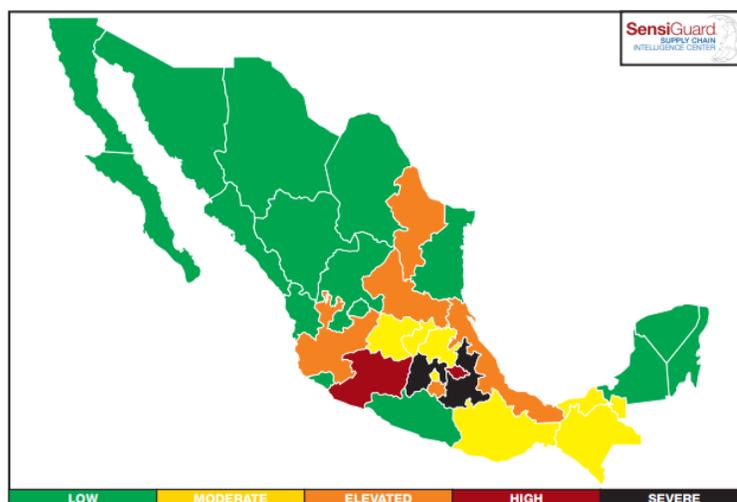


FIGURA 2.3: Zonas de alto riesgo de robo de carga en México

Fuente:(SensiGuard, 2019)

En la Tabla 2.1 se muestra los estados con mayor índice de robo de carga durante el 2019, en la columna (**Entidad**) se puede visualizar el estado donde se han presentando siniestro, en la columna (**Robos**) se reporta la cantidad de incidente de robo al transporte de carga y finalmente, en la columna (**%Total**) se asigna el porcentaje total de robos.

TABLA 2.1: Robo de carga en México por estado

Entidad	Robos	% Total
Estado de México	5896	35
Puebla	4111	24
Michoacán	1718	10
Nuevo León	673	4
San Luis Potosí	630	4
Tlaxcala	597	4
Veracruz	537	3
Jalisco	533	3
Morelos	508	3
Guanajuato	414	2

Sin embargo, durante el año 2019 los alimentos y bebidas se mantuvieron como la mercancía más robada en el país, así como la construcción industrial, los químicos y el alcohol que se mantuvieron dentro de los 5 productos más robados abarcando más del 60% de los robos únicamente en estas cuatro mercancías. El porcentaje restante se divide principalmente en mercancía robada de autopartes, electrónicos, combustible, ropa y zapatos y hogar y jardín.

Como se puede observar en la Figura 2.4 las mercancías más sensibles a robo se concentran principalmente en ciertos sectores de interés y que además son de vital importancia dentro de la economía mexicana.

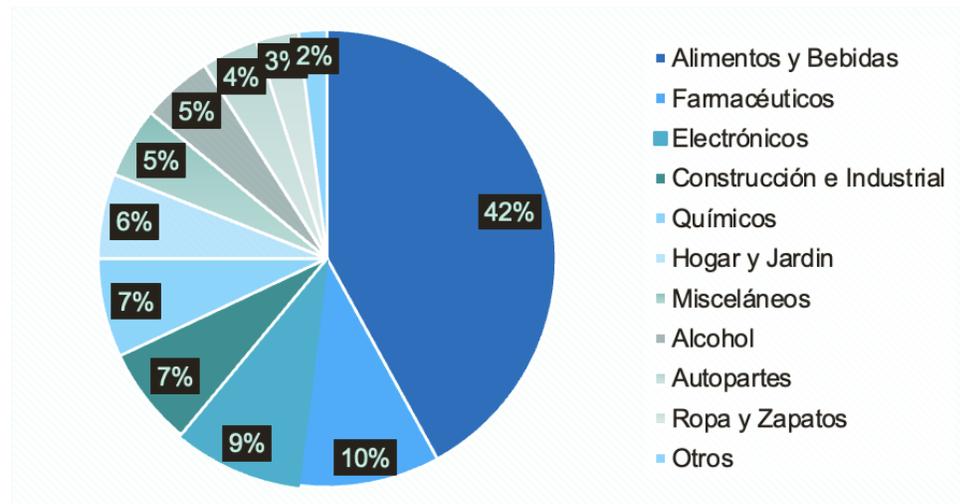


FIGURA 2.4: Robo de carga en México por producto

Fuente: (SensiGuard, 2019)

2.7 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

2.7.1 INDICADORES DE DESEMPEÑO EN SEGURIDAD

Los indicadores de desempeño de seguridad o mejor conocidos como (SPI, por sus siglas en inglés, *Safety Performance Indicators*) son aquellos que evalúan el desempeño de seguridad operacional, estos indicadores generalmente están relacionados con los Vehículos, la Infraestructura y los Usuarios de la carretera.

Shalom y Gitelman (2007) de la Universidad de Loughborough, sustenta el desarrollo de los indicadores en cada una de las siete áreas de seguridad (vehículos, sistemas de protección, infraestructura, circulación diurna, manejo de traumas, alcohol y drogas, velocidad) en donde define los SPI cuantitativos, demostrando los procedimientos necesarios para recoger y procesar los datos requeridos.

Por otro lado, Stigson (2009), del Instituto de Karolinska, a través de su tesis: “*A safe road transport system factors influencing injury outcome for car occupants*”, contempla una investigación basado en choques reales en Suecia, el cual se utilizaron tres tipos de datos: datos de accidentes mortales, accidentes automovilísticos con coches equipados con una grabadora de impulsos de accidentes, y datos de observación.

El estudio establece como conclusiones que en la mayoría de los accidentes de tráfico están relacionados con una interacción entre la carretera, el vehículo y el usuario de la carretera, es posible una combinación de SPI (conductor libre de drogas y/o alcohol, velocidad no excesiva, uso del cinturón de seguridad y carreteras) pueda dar lugar a muy pocas fatalidades y por último que las carreteras constituyen una de las medidas de seguridad vial más importantes para los ocupantes de los automóviles.

Años más tarde Davidović *et al.* (2020) hace mención que la fatiga debería incluirse en el conjunto de indicadores básicos de rendimiento de la seguridad vial

para el usuario, ya que no se han desarrollado modelos que puedan determinar de forma fácil, rápida y directa la cantidad y la calidad de la fatiga como un factor de riesgo en la carretera.

2.7.2 VEHÍCULOS

Según Gitelman *et al.* (2014), este indicador está relacionado con la precisión del registro de la flota nacional de vehículos que se encuentran realmente en las carreteras de un país en un momento determinado. Para hacer posible el cálculo de los SPI para vehículos, se necesita por lo menos:

- Obtener las descripciones detalladas y precisas de las marcas y modelos de vehículos.
- Clasificar los vehículos según los tipos correspondientes con el gobierno.
- Distinguir los vehículos de mercancías pequeños (menos de 3.5 toneladas) y grandes, ya que estos son significativamente diferentes cuando se evalúa su compatibilidad en colisiones con vehículos de pasajeros o usuarios vulnerables de la carretera.
- La seguridad depende del tipo de colisión y la velocidad a la que viaja el vehículo.

2.7.3 INFRAESTRUCTURA

De acuerdo con Gitelman *et al.* (2014) la disposición y el diseño de la infraestructura tienen un fuerte impacto en el desempeño de la seguridad del sistema de transporte por carretera, por lo cual, se debe considerar las características geométricas que tiene una carretera, la ubicación y los dispositivos de la carretera, tipo y

condiciones de los señalamientos horizontal y vertical, si existe suficiente distancia de visibilidad de parada o de rebase, tipo de iluminación, los dispositivos que controla el tránsito vehicular, etc. El desempeño de seguridad del sistema de transporte por carretera es el resultado de la combinación de la funcionalidad, homogeneidad y previsibilidad de la red, el entorno de la carretera y el tráfico involucrado.

2.7.4 USUARIOS

Treat (1980) realizó un estudio en donde identificó que el usuario era el único factor contribuyente en aproximadamente el 95 % de todos los accidentes.

Por otra parte algunas de las principales causas de accidentes entre los usuarios son: el exceso de velocidad. Algunos de los factores que influyen en el usuario al momento de estar manejando son: el estrés, el alcohol, las drogas, el sueño y la fatiga.

2.8 SELECCIÓN DE HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE RIESGO EN CARRETERAS

Para esta investigación es necesario primero elegir los criterios que mejor nos ayuden a evaluar cada ruta y después calcular el impacto de cada uno de esos criterios, por lo que es importante elegir los métodos más adecuados a nuestro problema para lograr estos dos pasos. En la Tabla 2.2 se mencionan algunos métodos encontrados en la literatura utilizados por diversos autores y se ilustran algunos de los criterios como lo son; infraestructura, vehículos y usuarios.

TABLA 2.2: Revisión de literatura

Referencia	Criterios de decisión			Herramienta
	Infraestructura	Vehículos	Usuarios	
Tarantilis y Kiranoudis (2004)	x	x		Método metaheurístico.
Zografos y Androutsopoulos (2004)	x	x		Ruteo de vehículos bi-objetivo.
Pierre,P.,Sagaspe,N.(2005)			x	Regresión binomial.
Sattayaprasert,W (2008)	x			Modelo AHP.
Holló <i>et al.</i> (2010)	x	x	x	Modelo SRA.
Bao <i>et al.</i> (2012)	x	x	x	Método TOPSIS.
Branko Milovanović (2012)	x	x		AHP
Tešić <i>et al.</i> (2018)	x	x	x	Método de ponderación
Sahnoon <i>et al.</i> (2018) .	x	x		Modelo AHP.
Radojičić <i>et al.</i> (2018)		x	x	(RCTVRP)

2.8.1 MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Según (Martínez Rodríguez, 2007), los métodos de decisión multicriterio sirven para la evaluación y decisión respecto de problemas que admiten un número finito de alternativas de decisión, a través de:

- Un conjunto de alternativas identificadas cuyas consecuencias cuantitativas y cualitativas no son conocidas en forma exacta ni completa.
- Un conjunto de criterios de evaluación que permiten evaluar cada una de las alternativas de decisión según ponderaciones o pesos asignados por el decisor y que reflejan la importancia o preferencia relativa de cada criterio.
- Una matriz de decisión que resume la evaluación de cada alternativa respecto a cada criterio; una escala de medida que puede ser cuantitativa o cualitativa, cuya medida puede estar expresada en escala cardinal, nominal o probabilística.
- Una metodología para jerarquizar juicios que contribuya a la determinación de la solución que recibe las mejores evaluaciones.

- Un proceso de toma de decisiones en la cual se lleva a cabo una negociación entre los interesados.

Los principales métodos de decisión multicriterio son: utilidad multiatributo (MAUT), método TOPSIS y el proceso analítico Jerárquico (AHP).

2.8.2 UTILIDAD MULTIATRIBUTO (MAUT)

El modelo de utilidad multiatributo está diseñado para obtener la utilidad de alternativas a través de los atributos considerados valiosos, que deben ser evaluados como componentes de los criterios. Para cada uno de los atributos es necesario definir una función de utilidad (parcial), y luego se agregan a una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa para conseguir una ordenación completa del conjunto finito de alternativas (Peñañiel-Nivela *et al.*, 2017)

2.8.3 MÉTODO TOPSIS

La técnica de TOPSIS (Por sus siglas en inglés, *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) es un método desarrollado por Hwang y Yoon en 1981, el cual se define como un índice llamado similitud o proximidad relativa combinando valores de la proximidad a la solución ideal positiva y la lejanía respecto a la solución ideal negativa. La idea es seleccionar la alternativa que tenga la máxima similitud con respecto a la solución ideal positiva.

Mejor – peor método, utiliza una estructura comprensible de reunir los datos necesarios cuando se presenta una situación de elección, ya sea con tres o más alternativas, en donde los individuos deben elegir la mejor (*best*) y peor (*worst*) alternativa que da resultados, según Camila Tanhnuz (2013) Este método tiene resultados fiables y fáciles de entender por el evaluador y puede ser fácilmente revisada

para aumentar la consistencia.

2.8.4 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

El Proceso de Análisis Jerárquico o AHP (por sus siglas en inglés *Analytic Hierarchy Process*), fue desarrollado por Saaty (1980). El AHP es un lógico y estructurado método de trabajo que optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios o atributos, mediante la descomposición del problema en una estructura jerárquica.

Esto permite subdividir un atributo complejo en un conjunto de atributos más sencillos y determinar cómo influyen cada uno de esos atributos individuales en el objetivo de la decisión. Esa influencia está representada por la asignación de los valores (prioridad o “peso”) a cada uno de los factores intervinientes, de acuerdo a una escala de preferencia ver la Tabla 2.3 que permite incorporar al proceso de toma de decisiones la subjetividad, la experiencia y los conocimientos de forma intuitiva (Hurtado y Bruno, 2005).

TABLA 2.3: Escala de preferencia

Fuente: Saaty Vargas, 2012

Planteamiento verbal de la preferencia	Asignación numérica
Igual importancia	1
El elemento es moderadamente más importante respecto al otro	3
El elemento es fuertemente más importante respecto al otro	5
La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro	7
La importancia del elemento es extrema respecto al otro	9
Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	2,4,6,8

El método AHP establece dichos valores a través de comparaciones pareadas (uno a uno), en determinadas circunstancias esto facilita la objetividad del proceso y permite reducir sustancialmente el uso de la intuición en la toma de decisiones.

(Vaidya y Kumar, 2006).

El AHP es usado en muchos trabajos de investigación por ser una herramienta confiable de apoyo para la toma de decisiones, Beyca et al. (2016) utiliza este método para la selección de un proveedor 3PL (*Third Party Logistics*) ya que toma en cuenta criterios tanto tangibles como intangibles. En su caso tiene 4 criterios principales de evaluación que son importantes para la empresa cliente y al realizar la ponderación de estos criterios de acuerdo con la importancia que esta empresa les otorga obtiene como resultado la empresa 3PL ideal para ellos.

Huang *et al.* (2003), Utiliza el método AHP para determinar la ponderación de los criterios que considera importantes al dirigir el envío con materiales peligrosos en áreas urbanas y suburbanas para reducir el riesgo de exposición de la población, y este trabajo es muy similar al trabajo que se realizará en este estudio con diferentes aproximaciones a los materiales peligrosos. Donde priorizaron cinco criterios importantes a considerar al crear una hoja de ruta para esta categoría de productos.

También Guze *et al.* (2017) utiliza el AHP para priorizar los criterios que se toman en cuenta al momento de querer mover mercancía líquida vía marítima, si bien es la forma más económica de mover mercancía en distancias largas, el menciona que es necesario tomar en cuenta las características del barco, del tipo de tanque que almacena de las sustancias, las condiciones climáticas previstas de la ruta, el conocimiento técnico de la tripulación y sin perder de vista el tiempo y costo de la ruta.

Como en los trabajos anteriormente mencionados, los factores que influyen en el riesgo del robo al autotransporte pueden ser varios y muy diversos, por lo que se intentará con este método ponderarlos para estimar la importancia de cada uno de ellos y obtener una herramienta más confiable.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En esta sección se propone la metodología para dar solución a la problemática de estudio. Se busca que la metodología propuesta obtenga una solución eficiente para la selección de rutas en el auto transporte de carga, misma que permita una ventaja competitiva para las organizaciones.

Como primera fase para el desarrollo de la metodología en este estudio, se deben identificar los factores que influyen en la seguridad del auto transporte de carga, para lograr la selección de dichos indicadores se usará el método AHP. Un método cualitativo y cuantitativo, flexible, aplicable en toma de decisiones individuales y en equipo, que permite reducir sustancialmente el uso de la intuición en la toma de decisiones. Seguido, definimos un problema de ruteo de vehículos que además de minimizar el costo de ruta, también reduce el nivel de riesgo de la distribución, considerando los factores medibles en base a información histórica de la actividad logística del país. En particular, formulamos nuestro problema llamado *Safety Vehicle Routing Problem* mediante un programa Entero-Mixto.

3.1 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

El proceso de jerarquía analítica (AHP) se utiliza para evaluar parámetros y calcular sus pesos. El AHP es un enfoque de toma de decisiones multicriterio que puede jerarquizar un sistema que involucra múltiples objetivos, criterios o factores. Saaty (2008) proporcionó una formulación teórica para el AHP, que lo explica como una herramienta de apoyo a la decisión para resolver problemas de decisión complejos. El AHP descompone el problema de decisión en elementos más simples en función de sus características y los organiza en una jerarquía para incorporar cantidades significativas de información.

El procedimiento del AHP consta de los siguientes pasos:

3.1.1 IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS

El primer paso en esta investigación es la identificación de los criterios, para nuestro estudio los criterios de riesgo en el autotransporte de carga se obtuvieron de la literatura de estudios previos con temática similares como se puede observar en la Tabla 3.1. La revisión de dichos factores se estudió y modificó en función de los objetivos, el enfoque y las limitaciones de este estudio.

TABLA 3.1: Factores relevantes encontrados en literatura

	Autor	Tipo de carretera	Factor humano	Características de la carretera	Tipo de vehículo	Categoría del producto	Velocidad	Peligrosidad de la carretera
1	Adolf Hakkert (2007)	✓			✓			
2	Kanuganti dkk.(2013)			✓				
3	De la Torre E. et al (2013)		✓	✓	✓	✓		✓
4	Najib dkk., (2012)	✓					✓	
5	Gitelman,V&Hakkert,S.(2014)		✓					
6	Ekwall, D. & Lantz,B(2017)					✓		
7	Justs,M. et al. (2018)			✓		✓		✓

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 ESTABLECER UN MODELO DE JERARQUÍA

Como segundo punto de la primera fase se debe de establecer un modelo de jerarquía para poder definirlos el cual consiste en el objetivo general en la parte superior de la jerarquía, los criterios y los subcriterios en los niveles inferiores como se puede observar en la Figura 3.1.

A continuación, se presenta la conceptualización de los criterios definidos

- Vehículo: Medio por el cual el usuario puede circular en infraestructura vial según su variación en los siguientes indicadores.
- Tipo de vehículo: Vehículo automotor de seis o más llantas, destinado al transporte de carga con peso bruto vehicular mayor a 4 toneladas.
- Características de operación: Velocidad máxima alcanzada por el vehículo en kilometro por hora.
- Categoría del producto: Se refiere al tipo de producto que se transporta. Ejemplos: alimentos, electrónicos, auto pares, combustibles, etc
- Usuario: Persona física o moral que contrate con un transportista el traslado de personas o el transporte de carga, o que transporte su propia carga.
- Bitácora de horas de servicio del conductor: Registro diario que contiene los datos necesarios para conocer los periodos efectivos de conducción y los periodos de descanso, con registros por viaje.
- Influencia de drogas y alcohol: Consumo de sustancias estupefacientes en horario laboral.
- Infraestructura: Vía de comunicación, generalmente interurbana, proyectada y construida fundamentalmente para la circulación de vehículos automóviles.

- Tipo de carretera: Distribución porcentual de la longitud para cada tipo de carretera según: o La clasificación del reglamento (carreteras tipo “ET”, “A”, “B”, “C” y “D”) o La clasificación de la Subsecretaría de Infraestructura DGCC (carreteras tipo corredor, básica y secundaria)
- Peligrosidad de la carretera: Hace referencia a la inseguridad ante delitos, robos y actos terroristas a los transportistas

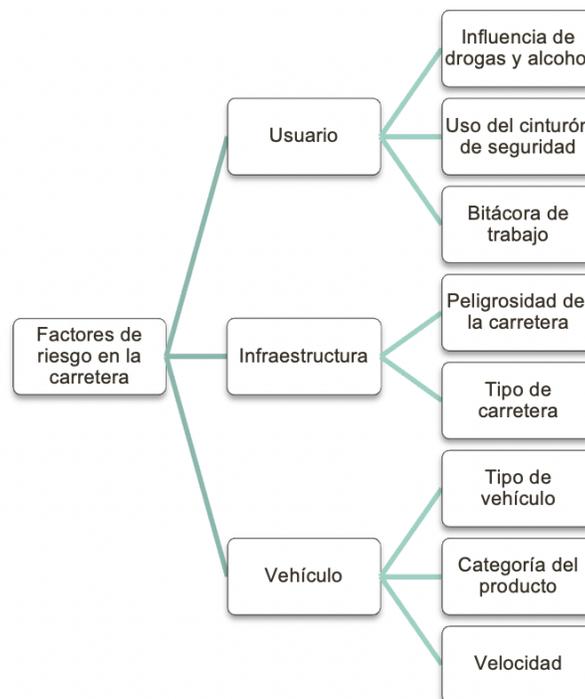


FIGURA 3.1: Árbol jerárquico con objetivo, criterios y Subcriterios

Fuente: Elaboración propia

En (Goepel, 2013) y (Hui-li *et al.*, 2009) se describe el proceso para para priorizar y categorizar los factores con éxito.

3.1.3 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

Debido a que el propósito de la aplicación del método AHP en este trabajo es obtener los criterios que los expertos consideran incrementan el riesgo de robo, se

realizó una encuesta a través de la plataforma “onlineencuesta” donde se recolectan los datos. Se utiliza esta plataforma debido a su entorno amigable, su flexibilidad en el diseño y por su proyección de resultados. En la encuesta se incluye las comparaciones por pares de los atributos entre sí, es decir, peligrosidad de la carretera se compara con los otros siete atributos, luego tipo de vehículos con otros seis y así sucesivamente.

3.1.4 PERFIL DEL ENCUESTADO

Para este estudio se desea tener heterogeneidad entre los participantes y puntos de vista desde diferentes enfoques, por lo cual se eligieron a 10 expertos representados en la Figura 3.2 y con el siguiente perfil: más de 5 años de experiencia en puestos relacionados con logística, tráfico, distribución y almacén.

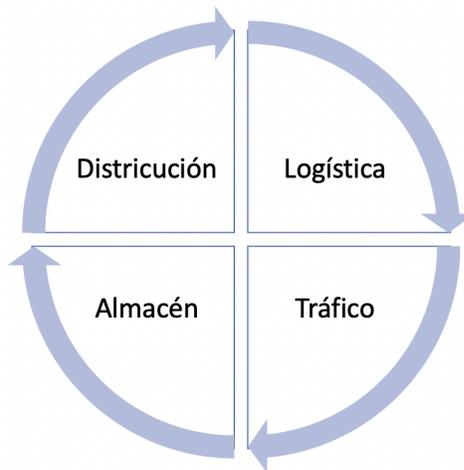


FIGURA 3.2: Perfil de expertos

Fuente: Elaboración propia

3.1.5 ESTABLECER UNA MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES

Una vez completado el modelo de estructura jerárquica, el siguiente paso en el análisis de ponderación AHP fue establecer una matriz de comparación por pares. Las comparaciones por pares generadas en el paso anterior se organizaron en una matriz cuadrada, utilizando la pantalla de Excel de (Goepel, 2013) donde se calculo:

- Las ponderaciones de los criterios, subcriterios y alternativas.
- El índice de consistencia, CI: este paso garantiza que existan pocas contradicciones entre la comparación por pares de la matriz. La importancia de esta etapa radica en que una gran incoherencia puede mostrar una falta de comprensión del problema (Liu *et al.*, 2020). Para controlar los resultados de este método se calcula el ratio de consistencia de cada una de las matrices y la inconsistencia global de la jerarquía. El CI puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{\lambda Max - N}{N - 3} \quad (3.1)$$

Donde es λ max es el valor propio máximo y N es el número de los elementos que se comparan. La radio de consistencia, CR, se calculado mediante la formula.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.2)$$

donde el valor de RI se toma de la tabla del índice de consistencia aleatoria como se muestra a continuación en la Tabla 3.2 para n número de expertos.

TABLA 3.2: Índice de consistencia aleatoria (RI) para (n) criterios

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	..
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	...

Fuente: Al-Harbi (2001)

Se considero que una matriz de comparación por pares es consistente si CR es inferior a 10%(Goepel, 2013). Si el valor de CR es superior a 10%, el responsable de la toma de decisiones debe reevaluar las comparaciones por pares debido a las incoherencias.

Una vez establecidos los criterios que afectan la seguridad en la ruta mediante la opinión de un panel de expertos en seguridad de la cadena de suministro. Las ponderaciones logradas generan un ordenamiento racional de los factores que refleja su importancia relativa en el riesgo de robo, y que es la base que se usará en el problema de ruteo de vehículos para determinar que alternativas son las más adecuadas para el problema.

3.2 SAFETY VEHICLE ROUTING PROBLEM

Como segunda fase en esta metodología definimos un problema de ruteo de vehículos que además de minimizar el costo de ruta, también reduce el nivel de riesgo de la distribución, considerando los factores medibles en base a información histórica de la actividad logística del país. En particular, formulamos nuestro problema llamado *Safety Vehicle Routing Problem* mediante una problema entero-mixto.

3.2.1 DEFINIR PARÁMETROS

Los parámetros, es decir, los valores conocidos dentro del problema son:

- $i=0,1,2,3,\dots$: Clientes. (0 es el depósito).
- $v=0,1,2,3,4$: Vehículos.
- $k=0,1,2$: Tipo de camino entre arcos.
- $l=0,1,2$: Característica de la carretera.

- t_{ijk} : Tiempo de ir de i a j usando el camino k .
- C_{ijk}^l : Nivel de riesgo de las características l en la carretera k de ir de i a j .
- a_{ij}^v : 1 si el segmento (i, j) es compatible v y 0 si no.
- $p1$: Es la ponderación asignada a λ riesgo.
- $p2$: Es la ponderación asignada a λ tiempo.

3.2.2 DEFINIR VARIABLES

Las variables declaradas para la modelación del problema son las siguientes:

- X_{ijk}^v : 1 si el vehículo v visita i y justo después visita j y 0 en otro caso.
- Y_i = Tiempo en que se visita al cliente i .

Nota:

- X_{i0}^v : 1 denota que i es la primera vista de v

3.2.3 DEFINIR FUNCIÓN OBJETIVO

Minimizar:

$$Z = p1 * \sum_{i,j,k,v} \left(\sum_L C_{ijkl} \right) X_{ijkv} + p2 * \sum_{i,j,k,v} C * t_{ijk} X_{ijkv} \quad (3.3)$$

Nota:

- $p1+p2=1$

3.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

3.2.4.1 DEFINIR LAS RESTRICCIONES

Las restricciones necesarias para la modelación del problema son las siguientes:

$$X_{ijk}^v \leq a_{ijk}^v \quad \forall v, (ij), k \quad (3.4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{j \in I - \{i\}} X_{jik}^v = 1 \quad \forall i \in I - \{0\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in I \setminus \{i\}} \sum_{k \in K(i,j)} X_{ij}^v - \sum_{j \in I \setminus \{i\}} \sum_{k \in K(j,i)} X_{ji}^v = 0 \quad \forall v \in V, i \in I \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in I \setminus \{0\}} \sum_{k \in K\{0,i\}} X_{0i}^v \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (3.7)$$

$$Y_i + T_{ij} \leq Y_j + M \left(1 - \sum_{v \in V} \sum_{k \in K} X_{jik}^v \right) \quad \forall i, j \neq i, i \neq 0, j \neq 0 \quad (3.8)$$

La función objetivo 3.3 busca minimizar el riesgo y el tiempo de servicio de la ruta. La restricción 3.4 establece la compatibilidad del vehículo y el tipo de camino; es decir puedes ir de i a j utilizando k con el vehículo v , que estará limitado por la compatibilidad del camino k de i a j con el vehículo. La restricción 3.5 permite que todos los clientes sean visitados solo una única vez. La restricción 3.6 establece que si un vehículo visita a un cliente debe realizar la entrega y posteriormente abandonarlo partiendo hacia otro cliente, o bien regresar al depósito. La restricción 3.7 establece que un vehículo puede salir a lo mucho una única vez para tener un primer viaje. La restricción 3.8 evita la formación de n sub-rutas.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

El objetivo principal del capítulo es ejemplificar el paso a paso del desarrollo del modelo, para obtener los principales factores que incrementan el riesgo al momento de mover mercancías por las carreteras del país implementando el proceso analítico jerárquico para identificar los criterios o factores de riesgo en el autotransporte de carga como lo son iluminación, carga de trabajo, tipo de vehículo, entre otros y seguido definir dichos factores en los parámetros del problema de ruteo de vehículos para poder minimizar el costo de ruta y reducir el riesgo de la distribución de mercancías.

4.1 APLICACIÓN DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

Para la aplicación del método AHP utilizamos una herramienta de software en línea del *Business Performance Management Singapore* (Goepel, 2013), en el cual definimos la jerarquía de decisión presentada en la Figura 4.1

Jerarquía de decisiones		
Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2
Factores de riesgo en el autotransporte	Usuario	Influencia de drogas y alcohol
		Uso del cinturón de seguridad
		Bitácora de trabajo
	Infraestructura	Peligrosidad de la carretera
		Tipo de carretera
	Vehículos	Tipo de vehículo
		Categoría de producto
		Velocidad

FIGURA 4.1: Jerarquía de decisiones

Fuente: Elaboración propia

Es necesario diseñar e implementar un cuestionario para recolectar información de entrada. Gracias a una encuesta realizada en la plataforma “onlineencuesta” se recolectan los datos. Se utiliza esta plataforma debido a su entorno amigable, su flexibilidad en el diseño y por su proyección de resultados. Por la cantidad de criterios o niveles en la encuesta se obtuvieron 28 comparaciones por pares de los atributos entre sí, es decir influencia de drogas y alcohol se compara con los otros 7 atributos, luego uso del cinturón de seguridad contra los siguientes seis y así sucesivamente. La Figura 4.2 presenta la comparativa por pares, se utiliza la escala mencionada en la Tabla 2.3 que nos permite dar valores numéricos a los juicios de acuerdo a los términos de preferencias o importancia, con la intención de reducir las decisiones subjetivas. En esta escala numérica el 1 representa igual importancia y 9 que representa extrema importancia. El Apéndice A1 muestra la información detallada del cuestionario.

	Cuál prefiere A - AHP priorities - o B?		Igual	¿Cuánto más?
1	<input checked="" type="radio"/> Bitácora de trabajo	<input type="radio"/> Influencia de drogas y alcohol	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input checked="" type="radio"/> Bitácora de trabajo	<input type="radio"/> Uso del cinturón de seguridad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input checked="" type="radio"/> Bitácora de trabajo	<input type="radio"/> Peligrosidad de la carretera	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	<input checked="" type="radio"/> Bitácora de trabajo	<input type="radio"/> Tipo de carretera	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	<input checked="" type="radio"/> Bitácora de trabajo	<input type="radio"/> Tipo de vehículos	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	<input checked="" type="radio"/> Bitácora de trabajo	<input type="radio"/> Categoría del producto	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7	<input checked="" type="radio"/> Bitácora de trabajo	<input type="radio"/> Velocidad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8	<input checked="" type="radio"/> Influencia de drogas y alcohol	<input type="radio"/> Uso del cinturón de seguridad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9	<input checked="" type="radio"/> Influencia de drogas y alcohol	<input type="radio"/> Peligrosidad de la carretera	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
10	<input checked="" type="radio"/> Influencia de drogas y alcohol	<input type="radio"/> Tipo de carretera	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
11	<input checked="" type="radio"/> Influencia de drogas y alcohol	<input type="radio"/> Tipo de vehículos	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
12	<input checked="" type="radio"/> Influencia de drogas y alcohol	<input type="radio"/> Categoría del producto	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
13	<input checked="" type="radio"/> Influencia de drogas y alcohol	<input type="radio"/> Velocidad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
14	<input checked="" type="radio"/> Uso del cinturón de seguridad	<input type="radio"/> Peligrosidad de la carretera	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
15	<input checked="" type="radio"/> Uso del cinturón de seguridad	<input type="radio"/> Tipo de carretera	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
16	<input checked="" type="radio"/> Uso del cinturón de seguridad	<input type="radio"/> Tipo de vehículos	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
17	<input checked="" type="radio"/> Uso del cinturón de seguridad	<input type="radio"/> Categoría del producto	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
18	<input checked="" type="radio"/> Uso del cinturón de seguridad	<input type="radio"/> Velocidad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
19	<input checked="" type="radio"/> Peligrosidad de la carretera	<input type="radio"/> Tipo de carretera	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
20	<input checked="" type="radio"/> Peligrosidad de la carretera	<input type="radio"/> Tipo de vehículos	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
21	<input checked="" type="radio"/> Peligrosidad de la carretera	<input type="radio"/> Categoría del producto	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
22	<input checked="" type="radio"/> Peligrosidad de la carretera	<input type="radio"/> Velocidad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
23	<input checked="" type="radio"/> Tipo de carretera	<input type="radio"/> Tipo de vehículos	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
24	<input checked="" type="radio"/> Tipo de carretera	<input type="radio"/> Categoría del producto	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
25	<input checked="" type="radio"/> Tipo de carretera	<input type="radio"/> Velocidad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
26	<input checked="" type="radio"/> Tipo de vehículos	<input type="radio"/> Categoría del producto	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
27	<input checked="" type="radio"/> Tipo de vehículos	<input type="radio"/> Velocidad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
28	<input checked="" type="radio"/> Categoría del producto	<input type="radio"/> Velocidad	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

CR = 0% Por favor, inicie la comparación de pares

FIGURA 4.2: Comparación por pares factores de riesgo en el autotransporte

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 RESULTADOS DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

Una vez obtenidos los resultados de la encuesta, para consolidar la información recolectada y realizar los cálculos para el AHP se utiliza la pantalla Excel de (Goepel, 2013). Especialistas en esta técnica consideran que este programa es ideal dado que proporciona algunos beneficios como facilidad de uso, menor tiempo de ejecución, mayor exactitud y la opción de realizar cambios a valores introducidos sin necesidad de modificar las formas de cálculo. En el Apéndice A.2 se encuentran las matrices de comparación por pares cada experto para los criterios principales.

En la Figura 4.3 se muestra la matriz consolidada de la comparación por pares y el vector principal normalizado; cabe mencionar que se obtuvo un índice de consistencia del 1.1 % que por encontrarse debajo del 10 % se considera un índice razonable.

Matrix	Bitácora de trabajo	Influencia de drogas y alcohol	Uso del cinturón de seguridad	Tipo de vehículo	Peligrosidad de la carretera	Tipo de carretera	Velocidad	Categoría del producto	0	0	normalized principal Eigenvector
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Bitácora de trabajo	1	1/2	2/3	1	2/3	4/5	1 1/5	1	-	-	9.75%
Influencia de drogas y alcohol	2	1	2	2 1/3	1 5/9	2 3/4	3 2/7	2 1/6	-	-	23.36%
Uso del cinturón de seguridad	3	1 1/2	1	1 2/7	2/3	1	1 6/7	1 1/3	-	-	12.16%
Tipo de vehículo	4	1	3/7	7/9	1	7/9	2/3	1 6/7	1	-	9.89%
Peligrosidad de la carretera	5	1 1/2	2/3	1 1/2	1 2/7	1	2 2/7	3 1/3	2	-	17.73%
Tipo de carretera	6	1 1/4	3/8	1	1 4/9	3/7	1	2 1/2	1	-	11.39%
Velocidad	7	5/6	1/3	1/2	1/2	1/3	2/5	1	5/8	-	6.06%
Categoría del producto	8	1	1/2	3/4	1	1/2	1	1 3/5	1	-	9.66%
0	9	-	-	-	-	-	-	-	1	-	0.00%
0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.00%

FIGURA 4.3: Matriz consolidada de la comparación por pares

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de ponderación utilizando AHP indicaron que la clasificación prioritaria de los riesgos en el autotransporte de mayor a menor son la influencia de drogas y alcohol, la peligrosidad de la carretera, la falta de uso del cinturón de seguridad, tipo de carretera, categoría del producto, tipo de vehículo. La Figura 4.4 muestra los factores más influyentes en los riesgos del transporte de mercancías.

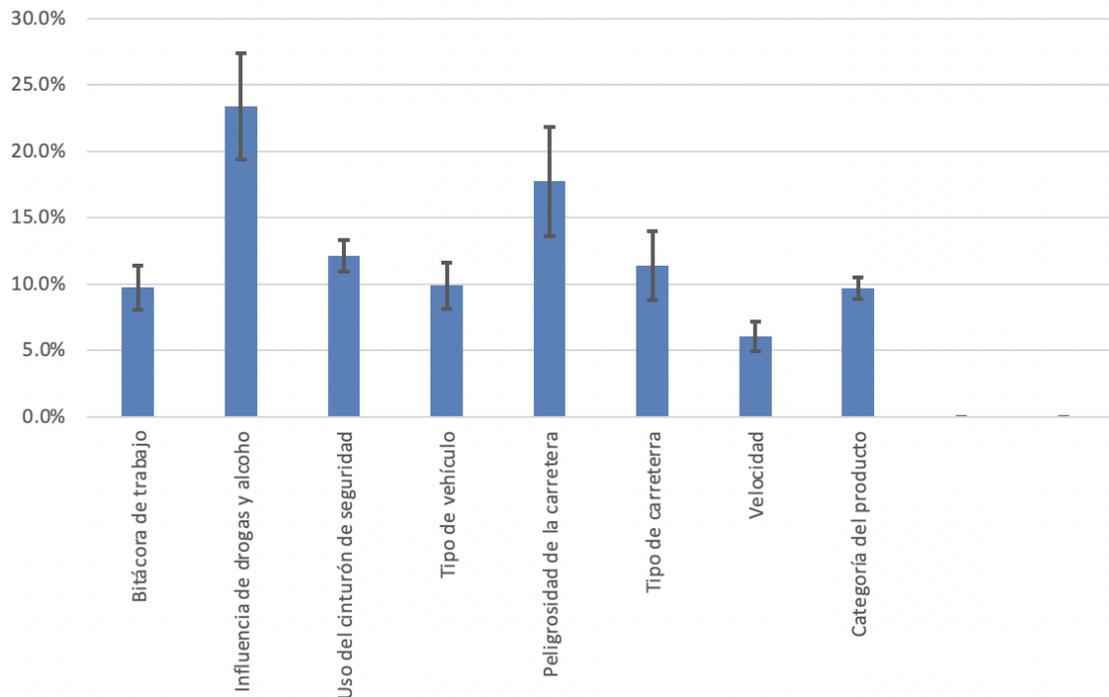


FIGURA 4.4: Factores más influyentes en los riesgos del transporte de mercancías

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, no todos los indicadores de riesgo antes mencionados por los expertos pueden ser considerados al momento de establecer el problema de ruteo de vehículos ya que necesitan de una operacionalización cuantitativa que permita comparaciones en el tiempo y en el espacio y la determinación de patrones que consientan la identificación de fallos o logros.

Se utilizarán siguientes factores de riesgo:

- Peligrosidad de la carretera.
- Características de la carretera.
- Tipo de camión.

Con estos resultados pasaremos a realizar la evaluación de algunas rutas para experimentar con los valores obtenidos por medio de un problema Entero-Mixto.

4.2 SAFETY VEHICLE ROUTING PROBLEM

En esta sección se muestra la parte experimental del modelo matemático para analizar los resultados, es decir, minimizar el costo de ruta y reducir el nivel de riesgo de la distribución. Una vez analizados estos resultados se estipula el beneficio aportado por el modelo propuesto.

4.2.1 CREACIÓN DE INSTANCIAS

Se crearon instancias de experimentación con un perfil semejante a una instancia real; las características de estas instancias fueron:

- Las localizaciones se ubican geográficamente en diversas poblaciones del país específicamente en los estado de Nuevo León, Coahuila, Veracruz, Puebla y Yucatán.
- Se cuenta con solo un depósito.
- La cantidad de los vehículos utilizados se fija en $V = 4$.
- El número de clientes i van desde 7 clientes hasta 30 clientes.

- El índice de riesgo asignado a cada ruta varia de un cliente a otro.
- Existen diferentes tipo de caminos(k) para llegar al destino como lo son la (red federal libre, red federal de cuota & red estatal libre).

4.2.2 IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Las instancias se han ejecutado en una DESKTOP-CL3QHB6 con las siguientes características:

- **Procesador:** Intel(R) Xeon(R) CPU ES-2620 v3 2.40 GHz 2.40GHz
- **RAM instalada:** 64 GB
- **Tipo de sistema:** 64bits

Se implementó un modelo de programación lineal entera mixta en ILOG CPLEX en su versión 20.1, mediante el uso de el lenguaje de programación C++.

4.2.3 EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Para la experimentación inicial del modelo matemático se fijaron parámetros en CPLEX, de tal manera que se utilizaron los siguientes criterios de paro, una hora como tiempo de ejecución máximo o alcanzar el óptimo (GAP 0%).

La configuración que se utilizó en CPLEX para la ejecución de las instancias fue la siguiente:

- Tiempo Límite: 1 hora
- Hilos utilizados: 1 hilo

- GAP: 0% Memoria de Trabajo(WorkMem): 1250 Megabytes

En la Tabla 4.1 se da más información acerca de las instancias, en la columna **Tamaño** indica el numero de nodos de la instancia, **Tiempo** es el tiempo total de procesamiento en segundos, el **GAP** representa la calidad de la solución reportada, el cual nos provee el optimizador CPLEX 20.1 al terminar su ejecución. Un GAP de 0% indica que la solución que se encontró es óptima, el **Vehículo** indicara el numero de vehículos utilizados para satisfacer las demandas de los clientes, el **objetivo** representa el costo asociado por el transporte de la mercancía y finalmente, $P1$ representa las ponderaciones asignada a λ riesgo. y $P2$ representa las ponderaciones asignada a λ tiempo.

En la misma Tabla 4.1, podemos observar las instancias TIPO A que están caracterizadas por desarrollarse en la parte norte del país(Monterrey- Coahuila), los resultados ofrecidos por el solver para este tipo de instancia ofrecen un GAP del 0%, es decir, llega a la solución óptima del problema para cada una de las combinaciones de riesgo y tiempo con un tiempo total de procesamiento menor a 1.10 segundos.

TABLA 4.1: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A 7 clientes

INSTANCIA A

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
7	1.226	0	3	0.8036	0.9	0.1
	1.100	0	3	0.7573	0.8	0.2
	1.084	0	3	0.7109	0.7	0.3
	1.112	0	3	0.6640	0.6	0.4
	1.132	0	3	0.6179	0.5	0.5
	1.034	0	3	0.8933	0.1	0.9
	0.917	0	3	0.4264	0.2	0.8
	0.913	0	3	0.4918	0.3	0.7
	1.047	0	3	0.5573	0.4	0.6
	1.005	0	3	0.6179	0.5	0.5

La representación gráfica de las rutas en el norte del país cuando el riesgo y el tiempo tiene el mismo peso, se puede observar en la Figura 4.5, donde se utilizaron solo 3 de los 4 vehículos asignados, ejecutándose en 1.005 segundos, haciendo el siguiente recorrido, el vehículos 1 partirá del depósito [0] visitando a los siguientes clientes, [0,5,2,0] con un tiempo de ejecución de 6 horas, sin embargo, el vehículo 2 realizará la siguiente ruta [0,7,4,1,0] con un tiempo de 4 horas & finalmente el vehículo 3 visitará al cliente [0,6,3,0] en 7 horas.

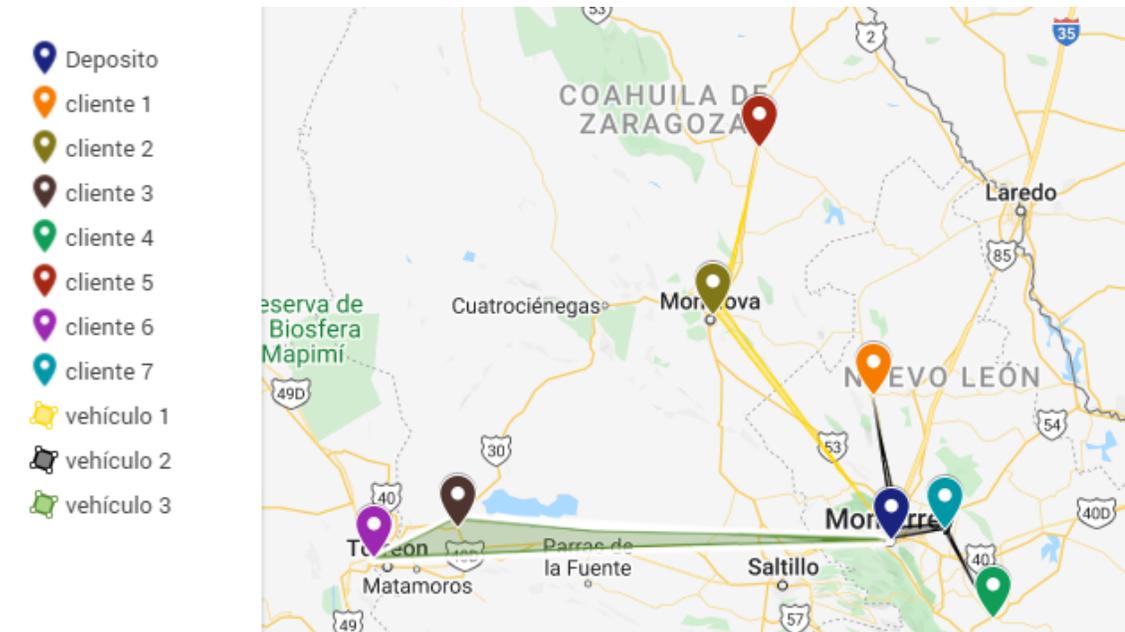


FIGURA 4.5: Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

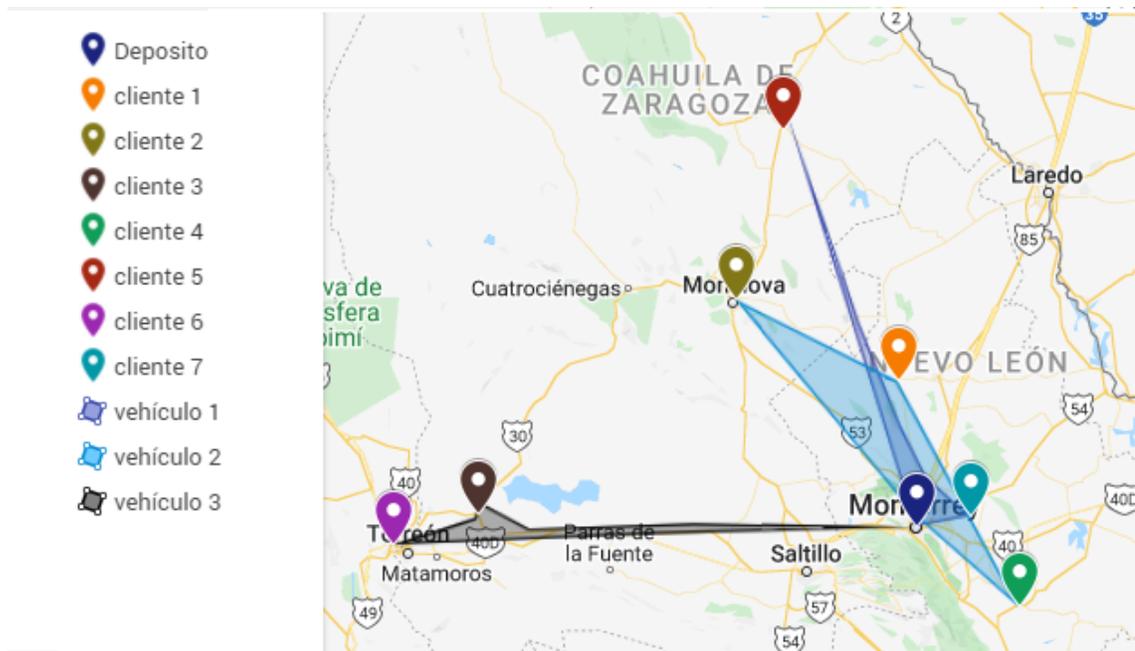


FIGURA 4.6: Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.9, lambda tiempo 0.1

Fuente: Elaboración propia

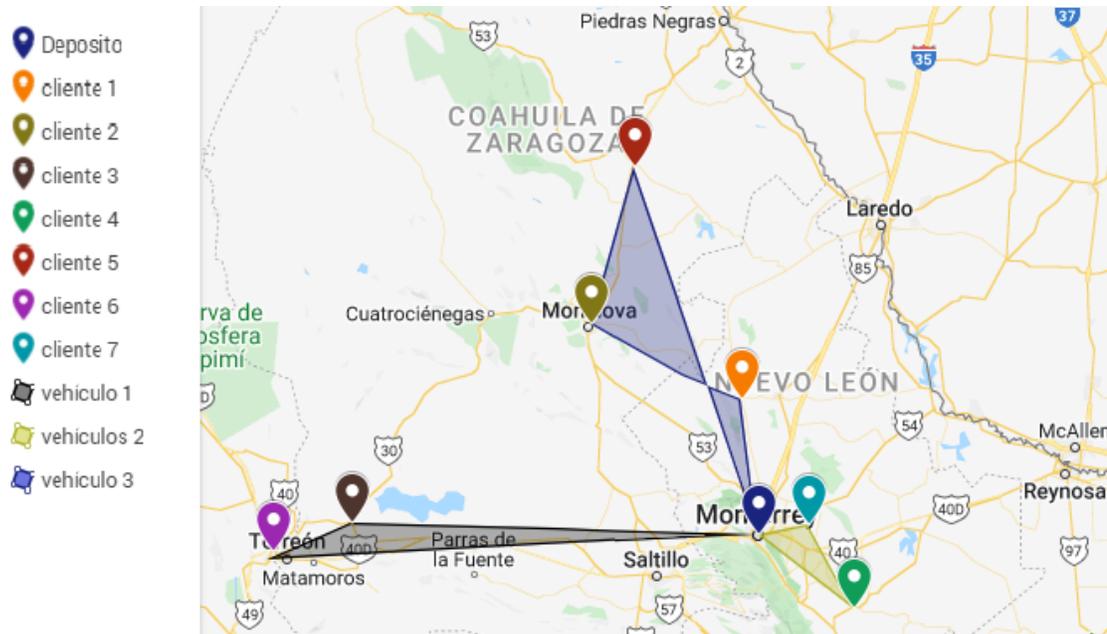


FIGURA 4.7: Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.3, lambda tiempo 0.7

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.7 se muestra la representación gráfica de los resultados alcanzados para cuando el tiempo tiene mayor importancia que el riesgo, se puede observar que para satisfacer a los 7 clientes en la parte norte del país solo se utilizaron 3 vehículos (v) para poder cumplir las entrega.

En la Tabla 4.2, podemos observar las instancias TIPO B que están caracterizadas por desarrollarse en la parte centro del país (Veracruz- Puebla), los resultados ofrecidos por el solver para este tipo de instancia donde solo se cuenta con 7 clientes y un depósito, ofrecen un GAP óptimo del 0% para cada una de las combinaciones de riesgo y tiempo.

La representación gráfica de las rutas en el centro el país cuando el riesgo y el tiempo tiene el mismo peso, se puede observar en la Figura 4.8, donde se utilizaron solo 3 de los 4 vehículos asignados.

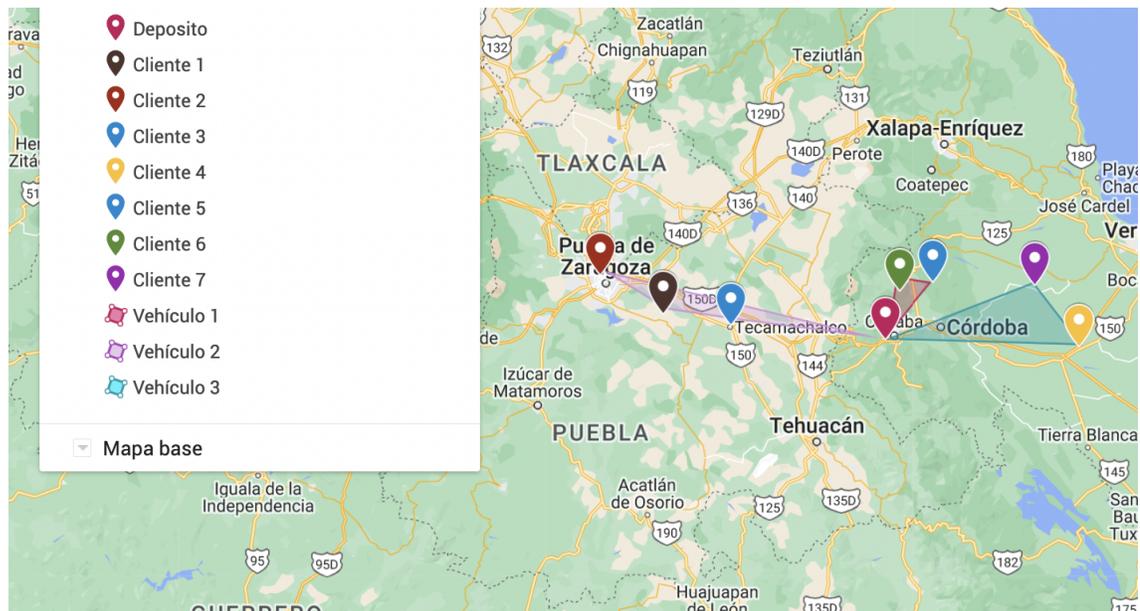


FIGURA 4.8: Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.2: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B 7 clientes

INSTANCIA B						
Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
7	1.120	0	4	0.58989	0.9	0.1
	1.000	0	4	0.57937	0.8	0.2
	1.084	0	4	0.55650	0.7	0.3
	1.112	0	4	0.52767	0.6	0.4
	1.400	0	4	0.48994	0.5	0.5
	1.034	0	4	0.42644	0.1	0.9
	0.917	0	4	0.49186	0.2	0.8
	1.988	0	4	0.55733	0.3	0.7
	1.047	0	4	0.91798	0.4	0.6

TABLA 4.3: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C 7 clientes

INSTANCIA C						
Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
7	1.130	0	4	0.6028	0.9	0.1
	1.224	0	4	0.3592	0.8	0.2
	1.145	0	4	0.4052	0.7	0.3
	1.222	0	4	0.4512	0.6	0.4
	1.450	0	4	0.5793	0.5	0.5
	1.034	0	4	0.8457	0.1	0.9
	1.000	0	4	0.9733	0.2	0.8
	1.120	0	4	0.8900	0.3	0.7
	0.968	0	4	0.3449	0.4	0.6

En la Tabla 4.3, podemos observar las instancias TIPO C que están caracterizadas por desarrollarse en la parte sur de país (Mérida), los resultados ofrecidos por el solver para este tipo de instancia se generan en un tiempo de ejecución menor a 1.450 segundos, ofreciendo un GAP óptimo del 0% para cada una de las combinaciones de riesgo y tiempo.

La representación gráfica de las rutas en la parte sur del país específicamente en la ciudad de Mérida, Yucatán cuando el riesgo y el tiempo tiene el mismo peso, se puede observar en la Figura 4.9, donde se utilizaron solo 3 de los 4 vehículos asignados. Sin embargo, como se puede observar en las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, los resultados en la calidad de las soluciones muestran que el desempeño del optimizador es bueno en las instancias pequeñas, ya que se encuentran los óptimos para todas las instancias de este conjunto, obteniendo un GAP 0%. Dicho de otra manera, CPLEX encontró optimalidad para el 100% de las instancias pequeñas.

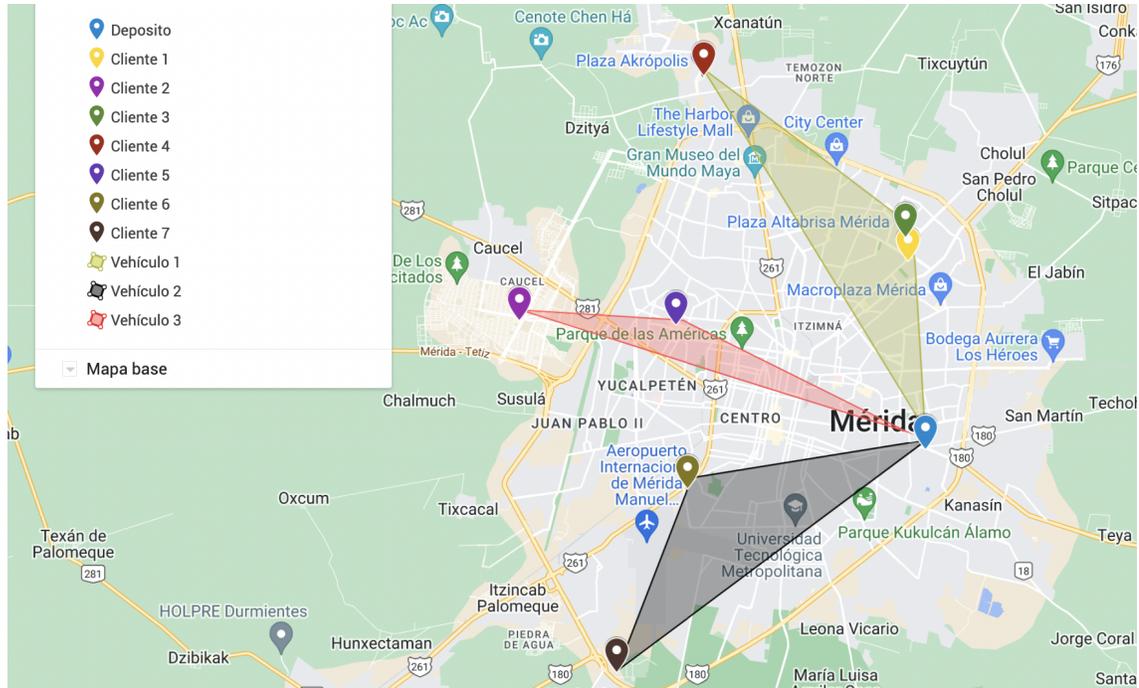


FIGURA 4.9: Resultados 7 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.4: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A con 10 clientes

INSTANCIAS A

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
10	2.123	0	3	0.6799	0.9	0,1
	2.056	0	4	0.7898	0.8	0.2
	2.499	0	4	0.4359	0.7	0.3
	2.309	0	4	0.2920	0.6	0.4
	2.989	0	4	0.1910	0.5	0,5
	1.604	0	4	0.4559	0.1	0,9
	1.773	0	4	0.2347	0.2	0,8
	1.942	0	4	0.8514	0.3	0,7
	2.111	0	4	0.6898	0.4	0,6
	2.28	0	4	0.8789	0.5	0.5

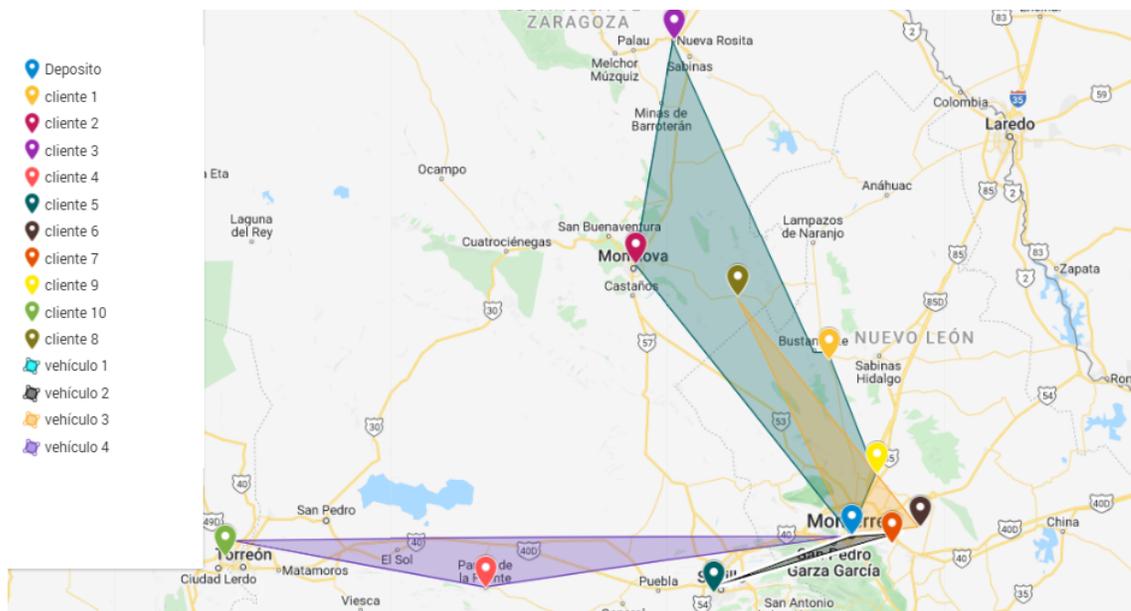


FIGURA 4.10: Resultados 10 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.5: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B con 10 clientes

INSTANCIAS B						
Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
10	2.432	0	4	0.6799	0.9	0.1
	2.123	0	4	0.789	0.8	0.2
	2.567	0	4	0.4359	0.7	0.3
	2.309	0	4	0.29202	0.6	0.4
	2.567	0	4	0.191	0.5	0.5
	1.566	0	4	0.4559	0.1	0.9
	1.999	0	4	0.23479	0.2	0.8
	1.432	0	4	0.851479	0.3	0.7
	1.209	0	4	0.6898	0.4	0.6

TABLA 4.6: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C con 10 clientes

INSTANCIAS C

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
10	2.109	0	4	0.21162172	0.9	0.1
	2.111	0	4	0.41733436	0.8	0.2
	2.288	0	4	0.11721575	0.7	0.3
	2.449	0	4	0.58936335	0.6	0.4
	2.618	0	4	0.03151517	0.5	0.5
	2.449	0	4	0.34194988	0.1	0.9
	2.449	0	4	0.28980149	0.2	0.8
	2.449	0	4	0.14295114	0.3	0.7
	2.449	0	4	0.905877047	0.4	0.6

TABLA 4.7: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A con 15 clientes

INSTANCIA A

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
15	220.035	0	4	0.531743	0.9	0.1
	135.517	0	4	0.502083	0.8	0.2
	58.362	0	4	0.46564	0.7	0.3
	48.267	0	4	0.427871	0.6	0.4
	8.329	0	4	0.390102	0.5	0.5
	18.997	0	4	0.206068	0.1	0.9
	51.072	0	4	0.276794	0.2	0.8
	37.012	0	4	0.314563	0.3	0.7
	17.584	0	4	0.352332	0.4	0.6
	10.490	0	4	0.390102	0.5	0.5

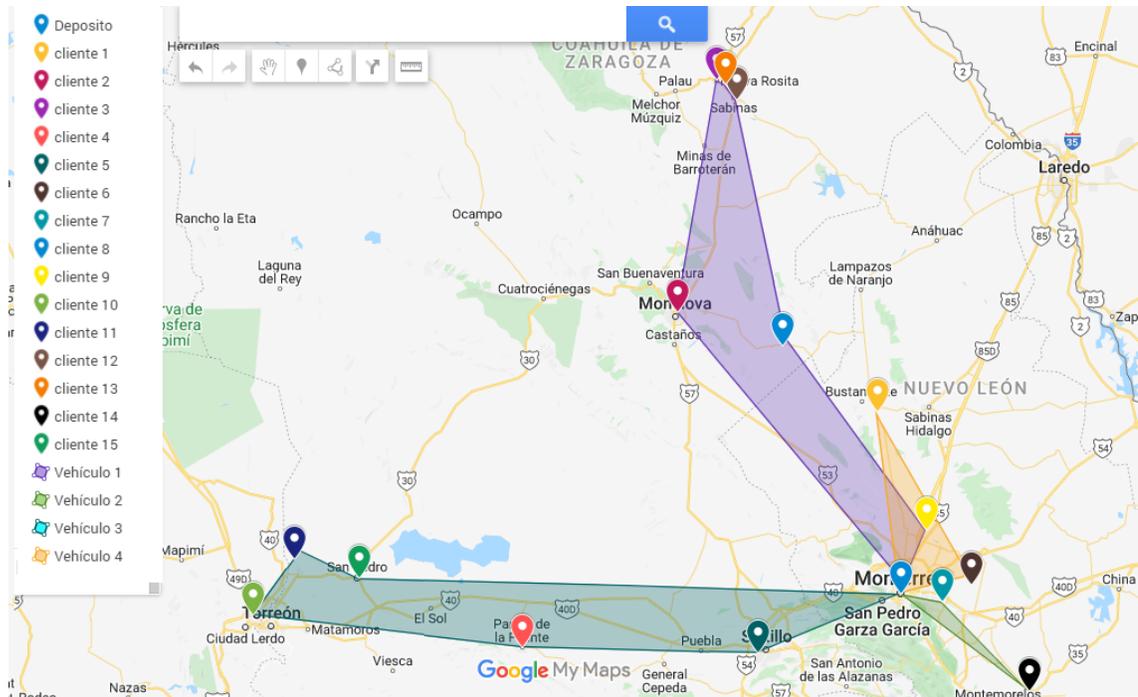


FIGURA 4.11: Resultados 15 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.7 se puede observar que todas las instancias obtuvieron soluciones óptimas y los tiempos en los cuales se obtuvo la solución de cada una de las instancias oscilan en segundos. En la Figura 4.11 se muestra la representación gráfica para instancias con 15 clientes y un depósito en la parte norte del país, donde las ponderaciones de tiempo y riesgo tienen el mismo peso.

La representación gráfica de las rutas en el centro del país cuando el riesgo y el tiempo tiene el mismo peso, se puede observar en la Figura 4.12, donde se utilizaron los 4 vehículos asignados, ejecutándose en 230.90 segundos.

En la Tabla 4.9 se puede observar que todas las instancias obtuvieron soluciones óptimas y los tiempos en los cuales se obtuvo la solución de cada una de las instancias oscilan en segundos. En la Figura 4.13 se muestra la representación gráfica de las instancias en la parte sur del país, donde las ponderaciones de tiempo y riesgo tienen el mismo peso.

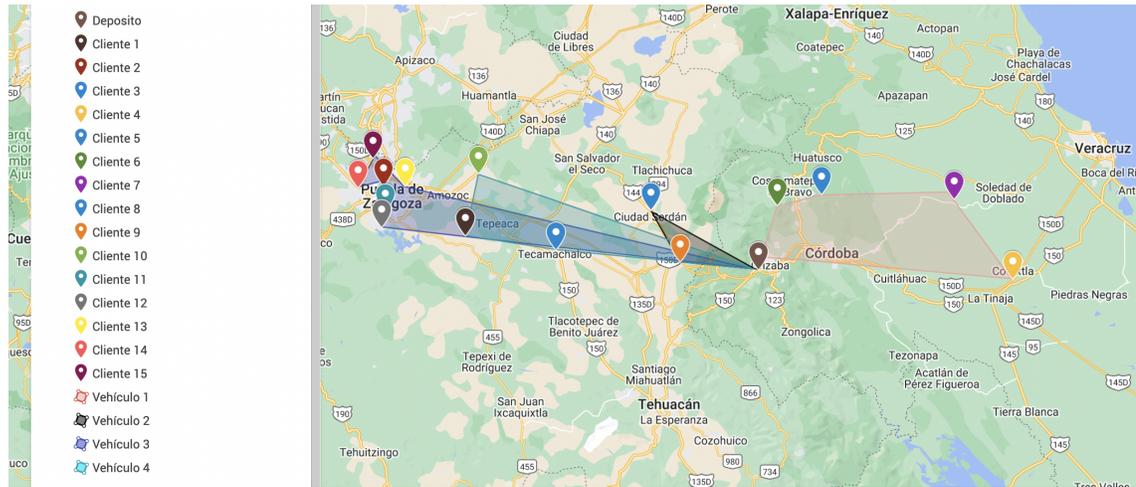


FIGURA 4.12: Resultados 15 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.8: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B con 15 clientes

INSTANCIA B						
Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
15	238.457	0	4	0.531743	0.9	0.1
	134.762	0	4	0.502083	0.8	0.2
	134.578	0	4	0.502083	0.7	0.3
	120.623	0	4	0.502083	0.6	0.4
	230.904	0	4	0.390102	0.5	0.5
	51.442	0	4	0.922460	0.1	0.9
	54.490	0	4	0.276794	0.2	0.8
	32.839	0	4	0.314563	0.3	0.7
	16.965	0	4	0.352332	0.4	0.6

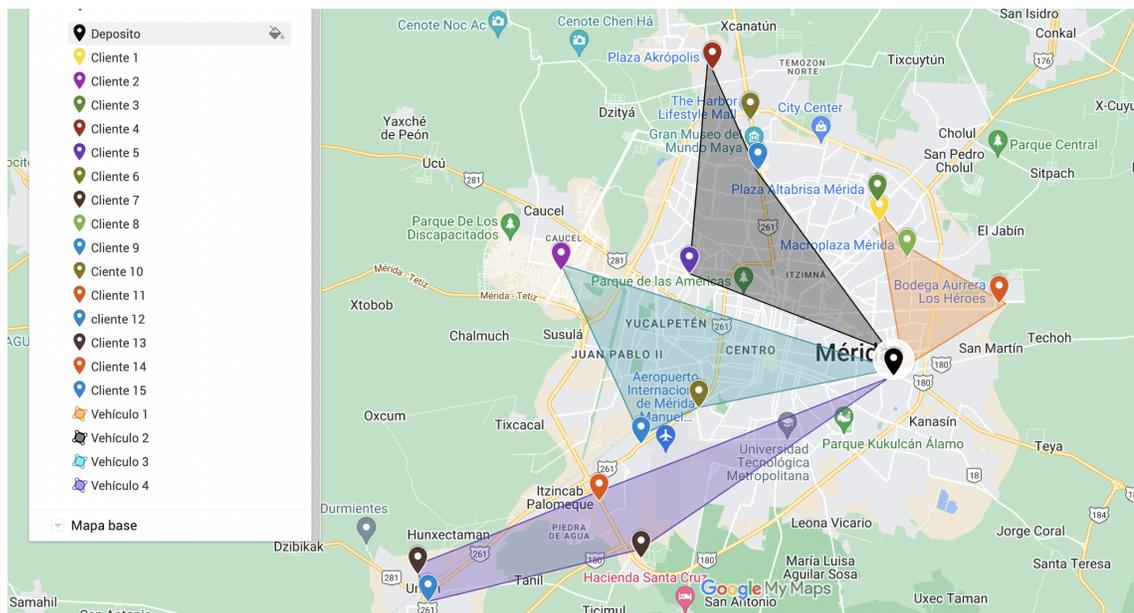


FIGURA 4.13: Resultados 15 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.9: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C con 15 clientes

INSTANCIA C						
Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
15	51.072	0	4	0.372586	0.9	0.1
	30.072	0	4	0.717429	0.8	0.2
	34..072	0	4	0.318547	0.7	0.3
	51.072	0	4	0.49070	0.6	0.4
	10.712	0	4	0.53629	0.5	0.5
	50.196	0	4	0.34776	0.1	0.9
	51.442	0	4	0.27679	0.2	0.8
	32.839	0	4	0.31456	0.3	0.7
	53.88	0	4	0.27679	0.4	0.6

TABLA 4.10: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A con 20 clientes

INSTANCIA A

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
20	3604.67	38.83	4	0.474416	0.9	0.1
	3605.48	37.23	4	0.448832	0.8	0.2
	3607.21	37.98	4	0.423247	0.7	0.3
	3607.34	38.00	4	0.423247	0.6	0.4
	3604.11	35.36	4	0.893247	0.5	0.5
	3608.95	37.89	4	0.0833186	0.1	0.9
	3605.46	35.89	4	0.2615996	0.2	0.8
	3605.58	35.89	4	0.8004221	0.3	0.7
	3600.09	35.76	4	0.4845949	0.4	0.6

TABLA 4.11: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B con 20 clientes

INSTANCIA B

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
20	28809.47	24.98	4	0.025569	0.9	0.1
	28809.73	22.45	4	0.448832	0.8	0.2
	28807.80	22.34	4	0.448832	0.7	0.3
	28809.56	20.98	4	0.448832	0.6	0.4
	28809.53	21.34	4	0.448832	0.5	0.5
	10969.21	21.89	4	0.474416	0.1	0.9
	288907.40	22	4	0.474416	0.2	0.8
	28804.95	21.98	4	0.474416	0.3	0.7
	28804.97	18.67	4	0.308704	0.4	0.6

TABLA 4.12: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C con 20 clientes

INSTANCIA C						
Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
20	86402	0.142996	4	0.289308	0.9	0.1
	83487	0.129241	4	0.81274	0.8	0.2
	86450	0.129241	4	0.556808	0.7	0.3
	82340	0.148997	4	0.5043633	0.6	0.4
	85789	0.152282	4	0.794375	0.5	0.5
	86400	0.129241	4	0.022617	0.1	0.9
	82020.3	0.139241	4	0.269906	0.2	0.8
	84579	0.129241	4	0.269906	0.3	0.7
	86400	0.149241	4	0.269906	0.4	0.6

En la Figura 4.15 se muestran los resultados obtenidos para instancias con 30 clientes en el norte del país, asignando la misma ponderación al riesgo y al tiempo. Sin embargo, en la Tabla 4.13, se puede observar que las instancias TIPO A se ejecutaron con un máximo de tiempo de recorrido de (3600 segundos), en dicha instancia al modelo le cuesta más trabajo probar la optimalidad de la solución encontrada. Esto quiere decir que entre más grandes sean las instancias (con un mayor número de nodos) mayor es la posibilidad de que al solver le lleve más tiempo llegar a un mejor resultado, tomando en cuenta que este tal vez no sea el óptimo.

Debido a la complejidad combinatoria de este problema, es necesario recurrir a un método de solución alternativo. En los diferentes trabajos de investigación la manera más eficiente de solucionar esta clase de problemas, en términos de tiempo y costo, es el uso de metaheurísticas, las cuales no aseguran la solución óptima pero normalmente si generan una solución factible y de buena calidad.

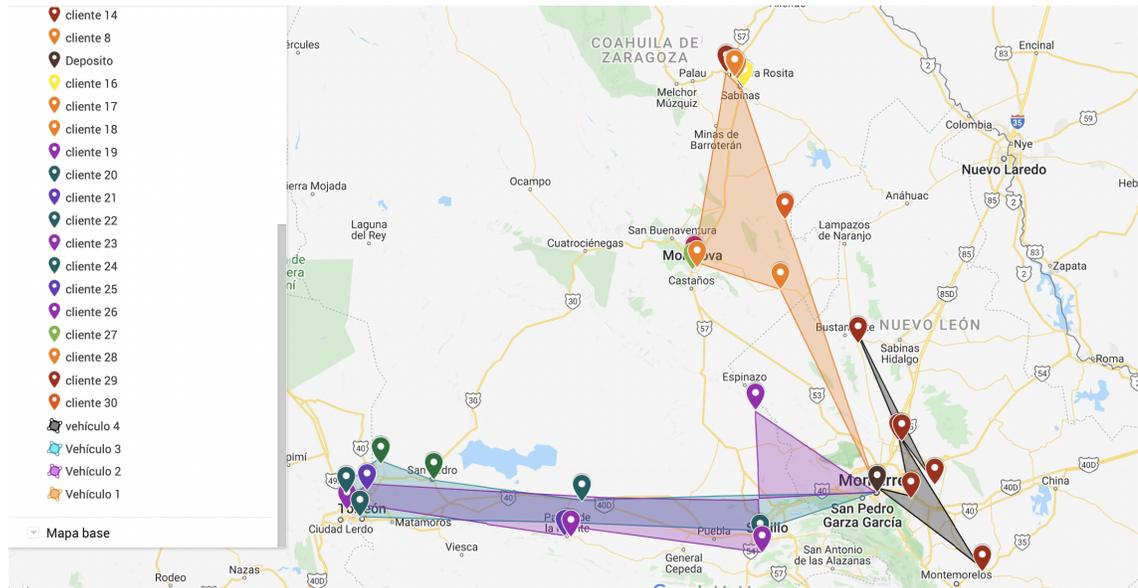


FIGURA 4.15: Resultados 30 clientes lambda riesgo 0.5, lambda tiempo 0.5

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.13: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO A 30 clientes

INSTANCIA A

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
30	3604.67	38.83	4	0.474416	0.9	0.1
	3605.48	37.23	4	0.448832	0.8	0.2
	3607.21	37.98	4	0.423247	0.7	0.3
	3607.34	38.00	4	0.423247	0.6	0.4
	3604.11	35.36	4	0.893247	0.5	0.5
	3608.93	37.89	4	0.083318611	0.1	0.9
	3605.46	35.89	4	0.261599634	0.2	0.8
	3605.52	35.89	4	0.800422162	0.3	0.7
	3600.09	35.76	4	0.484594905	0.4	0.6

TABLA 4.14: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO B 30 clientes

INSTANCIA B

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
30	28812.3	25.89	4	0.291735	0.9	0.1
	28809.4	22.73	4	0.279375	0.8	0.2
	28809.7	22.73	4	0.279375	0.7	0.3
	28807.8	23.87	4	0.279375	0.6	0.4
	28809.5	22.34	4	0.279375	0.5	0.5
	28938.6	22.73	4	0.300418	0.1	0.9
	28813.1	22.73	4	0.291735	0.2	0.8
	28809.9	22.73	4	0.194817	0.3	0.7
	28810.4	22.73	4	0.225442	0.4	0.6

TABLA 4.15: Resultados reportados por CPLEX en instancias TIPO C 30 clientes

INSTANCIA C

Tamaños	Tiempo(s)	Gap(%)	Vehículos (v)	Objetivo	$P1$	$P2$
30	86402	18.07	4	0.141856183	0.9	0.1
	83487	18.56	4	0.922515452	0.8	0.2
	86450	17.41	4	0.543351548	0.7	0.3
	82340	18.9	4	0.200387998	0.6	0.4
	85789	15.45	4	0.694933731	0.5	0.5
	82340	14.37	4	0.905866084	0.1	0.9
	83748	14.89	4	0.962402466	0.2	0.8
	86567	14.78	4	0.635530645	0.3	0.7
	86892	17.65	4	0.16639253	0.4	0.6

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El problema de optimización que estudiamos en esta tesis nos permitió visualizar cómo cambiaría la importancia del objetivo en función al peso que se le asigne a cada lambda(riesgo o tiempo), así como la programación de las rutas de entrega utilizadas para satisfacer las necesidades del cliente. Algunos de los hallazgos más importantes al final de la experimentación fueron:

- En cuanto a los tiempos de ejecución, para las instancias con 20 y 30 clientes se necesitan tiempos similares de ejecución sin embargo, el tiempo aumenta conforme aumenta el tamaño de las instancias.
- La ponderación asignada al riesgo tiene gran impacto en la solución que arroja nuestro modelo, ya que entre mayor sea el riesgo asignado sera más difícil para el SOLVER resolver la instancia.
- Cuando el tiempo tenga una mayor ponderación el solver lograr reducir considerablemente el GAP.
- Se pueden considerar una gran diversidad de factores que inciden en el riesgo al robo al autotransporte de carga para establecer una medida de seguridad, todo dependerá de que tan alcanzable sea el modelar las condiciones del problema que se busquen incluir .

El modelo que hemos desarrollado en este trabajo es fácilmente adaptable a cualquier caso que cumpla con las características bajo las cuales se trabajó este problema, sus parámetros solo deberán ser modificados e ingresar los datos requeridos.

Esta herramienta puede ser de mucha utilidad para los tomadores de decisiones de las empresas donde no solo busquen reducir los costos y el tiempo de transporte, sino que también busquen como objetivo principal el reducir el riesgo para el operador, la unidad y la mercancía.

5.1 APORTACIÓN CIENTÍFICA

La investigación introdujo una variante del problema de ruteo de vehículos, la cual, a nuestro conocimiento, no se había estudiado anteriormente en la literatura. Se implementó un modelo de programación lineal entera mixta & se propusieron dos procedimientos de solución, mismos que pueden usarse como base para resolver otros problemas de ruteo de vehículos. Como primera instancia se debe identificar los principales factores de riesgo que influyen en la seguridad del transporte de mercancías utilizando el método del proceso analítico jerárquico (AHP). El segundo procedimiento consistió en resolver, con CPLEX, un modelo de programación lineal entera para facilitar la toma de decisiones para elegir la mejor ruta de distribución.

5.2 TRABAJO A FUTURO

Como primera línea de investigación para mejorar el modelo actual propuesto se busca desarrollar el uso de heurísticas más compleja para lograr soluciones factibles. Además de Un trabajo futuro sería ampliar el modelo a un problema de ruteo de vehículos capacitado para determinar la capacidad máxima que pueden transportar sin exceder la capacidad de los vehículos.

APÉNDICE A

APÉNDICE

A.1 ESTRUCTURA Y RESULTADOS DEL CUESTIONARIO

- ¿Cuál es su puesto actualmente en la empresa?
- Buyer
 - Supervisor de Operaciones
 - Director Administrativo
 - Auxiliar de Tráfico y Distribución
 - Jefa de tráfico y logística
 - Coordinador de Tráfico
 - ML
 - SR Buyer
 - Responsable Técnico del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística
 - estudiante
- ¿A qué área pertenece?
- Compras
 - Logística
 - Administración
 - Logística
 - Logística
 - Logística y Almacenes
 - Tráfico
 - Procurement
 - Coordinación de Transporte Integrado y Logística
 - mlsc

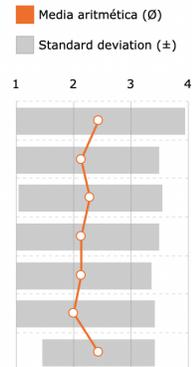
2. A continuación se presentan una serie de comparaciones, seleccione la casilla correspondiente al número de acuerdo con la importancia que considere basado en la Escala fundamental.

[.png](#) [.pdf](#) [.xls](#) [.csv](#)

Nota importante: Para realizar la comparación de criterios deberá seleccionar por ejemplo, en el primer cuestionamiento, si para usted la bitácora de trabajo es extremadamente más importante que la influencia de drogas y alcohol, se seleccionará la casilla del lado izquierdo con el número 9. Si en caso contrario, de los dos criterios considera que el de la derecha (influencia de drogas y alcohol) es igualmente importante que bitácora de trabajo, se seleccionará la casilla con el número 1.

Número de participantes: 7

a la izquierda	1 (1)		3 (2)		5 (3)		9 (4)		a la derecha	Ø	±
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%			
Bitácora de trabajo	3x	42,86	1x	14,29	-	-	3x	42,86	Influencia de drogas y alcohol	2,43	1,51
Bitácora de trabajo	3x	42,86	2x	28,57	-	-	2x	28,57	Uso del cinturón de seguridad	2,14	1,35
Bitácora de trabajo	3x	42,86	-	-	3x	42,86	1x	14,29	Tipo de carretera	2,29	1,25
Bitácora de trabajo	3x	42,86	2x	28,57	-	-	2x	28,57	Peligrosidad de la carretera	2,14	1,35
Bitácora de trabajo	3x	42,86	1x	14,29	2x	28,57	1x	14,29	Tipo de vehículo	2,14	1,21
Bitácora de trabajo	4x	57,14	1x	14,29	-	-	2x	28,57	Velocidad	2,00	1,41
Bitácora de trabajo	1x	14,29	3x	42,86	2x	28,57	1x	14,29	Categoría del producto	2,43	0,98

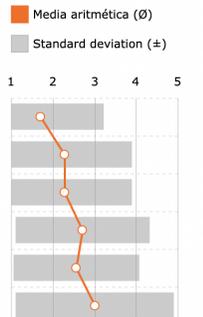


3. A continuación se presentan una serie de comparaciones, seleccione la casilla correspondiente al número de acuerdo con la importancia que considere basado en la Escala fundamental *

[.png](#) [.pdf](#) [.xls](#) [.csv](#)

Número de participantes: 7

a la izquierda	1 (1)		3 (2)		5 (3)		7 (4)		9 (5)		a la derecha	Ø	±
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%			
Influencia de drogas y alcohol	5x	71,43	1x	14,29	-	-	-	-	1x	14,29	Uso del cinturón de seguridad	1,71	1,50
Influencia de drogas y alcohol	3x	42,86	2x	28,57	-	-	1x	14,29	1x	14,29	Tipo de carretera	2,29	1,60
Influencia de drogas y alcohol	3x	42,86	2x	28,57	-	-	1x	14,29	1x	14,29	Peligrosidad de la carretera	2,29	1,60
Influencia de drogas y alcohol	2x	28,57	2x	28,57	-	-	2x	28,57	1x	14,29	Tipo de vehículo	2,71	1,60
Influencia de drogas y alcohol	2x	28,57	2x	28,57	1x	14,29	1x	14,29	1x	14,29	Velocidad	2,57	1,51
Influencia de drogas y alcohol	2x	28,57	2x	28,57	-	-	-	-	3x	42,86	Categoría del producto	3,00	1,91

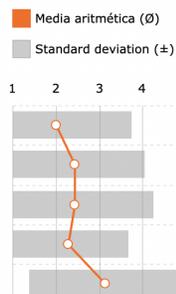


4. A continuación se presentan una serie de comparaciones, seleccione la casilla correspondiente al número de acuerdo con la importancia que considere basado en la Escala fundamental *

[.png](#) [.pdf](#) [.xls](#) [.csv](#)

Número de participantes: 7

a la izquierda	1 (1)		3 (2)		5 (3)		7 (4)		9 (5)		a la derecha	Ø	±
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%			
Uso del cinturón de seguridad	5x	71,43	-	-	-	-	1x	14,29	1x	14,29	Tipo de vehículo	2,00	1,73
Uso del cinturón de seguridad	3x	42,86	1x	14,29	1x	14,29	1x	14,29	1x	14,29	Peligrosidad de la carretera	2,43	1,62
Uso del cinturón de seguridad	3x	42,86	2x	28,57	-	-	-	-	2x	28,57	Tipo de carretera	2,43	1,81
Uso del cinturón de seguridad	2x	28,57	3x	42,86	1x	14,29	-	-	1x	14,29	Velocidad	2,29	1,38
Uso del cinturón de seguridad	2x	28,57	1x	14,29	-	-	2x	28,57	2x	28,57	Categoría del producto	3,14	1,77

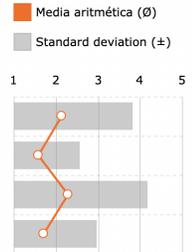


5. A continuación se presentan una serie de comparaciones, seleccione la casilla correspondiente al número de acuerdo con la importancia que considere basado en la Escala fundamental *

[.png](#) [.pdf](#) [.xls](#) [.csv](#)

Número de participantes: 7

a la izquierda	1 (1)		3 (2)		5 (3)		7 (4)		9 (5)		a la derecha	Ø	±
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%			
Tipo de vehículo	4x	57,14	1x	14,29	-	-	1x	14,29	1x	14,29	Peligrosidad de la carretera	2,14	1,68
Tipo de vehículo	5x	71,43	-	-	2x	28,57	-	-	-	-	Tipo de Carretera	1,57	0,98
Tipo de vehículo	4x	57,14	1x	14,29	-	-	-	-	2x	28,57	Velocidad	2,29	1,89
Tipo de vehículo	5x	71,43	-	-	1x	14,29	1x	14,29	-	-	Categoría del producto	1,71	1,25

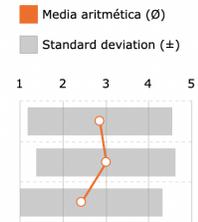


6. A continuación se presentan una serie de comparaciones, seleccione la casilla correspondiente al número de acuerdo con la importancia que considere basado en la Escala fundamental **

[.png](#) [.pdf](#) [.xls](#) [.csv](#)

Número de participantes: 7

a la izquierda	1 (1)		3 (2)		5 (3)		7 (4)		9 (5)		a la derecha	Ø	±
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%			
Peligrosidad de la carretera	2x	28,57	1x	14,29	2x	28,57	-	-	2x	28,57	Tipo de carretera	2,86	1,68
Peligrosidad de la carretera	2x	28,57	1x	14,29	-	-	3x	42,86	1x	14,29	Velocidad	3,00	1,63
Peligrosidad de la carretera	4x	57,14	-	-	1x	14,29	-	-	2x	28,57	Categoría del producto	2,43	1,90

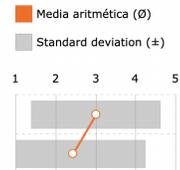


7. A continuación se presentan una serie de comparaciones, seleccione la casilla correspondiente al número de acuerdo con la importancia que considere basado en la Escala fundamental *

[.png](#) [.pdf](#) [.xls](#) [.csv](#)

Número de participantes: 7

a la izquierda	1 (1)		3 (2)		5 (3)		7 (4)		9 (5)		a la derecha	Ø	±
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%			
Tipo de carretera	1x	14,29	3x	42,86	-	-	1x	14,29	2x	28,57	Velocidad	3,00	1,63
Tipo de carretera	3x	42,86	2x	28,57	-	-	-	-	2x	28,57	Categoría del producto	2,43	1,81

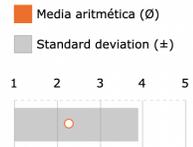


8. A continuación se presentan una serie de comparaciones, seleccione la casilla correspondiente al número de acuerdo con la importancia que considere basado en la Escala fundamental *

[.png](#) [.pdf](#) [.xls](#) [.csv](#)

Número de participantes: 7

a la izquierda	1 (1)		3 (2)		5 (3)		7 (4)		9 (5)		a la derecha	Ø	±
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%			
Velocidad	3x	42,86	2x	28,57	-	-	1x	14,29	1x	14,29	Categoría del producto	2,29	1,60



A.2 JUICIOS DE EXPERTOS

AHP		Analytic Hierarchy Process																								
bpmmsg.com		Multiple Input Summary Sheet																								
Consolidated = Weighted geometric mean off participants											10 = k number of participants	8 = n number of criteria														
C	Consolidated	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	Experto 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	00/01/00		
	1		0.5094	0.6608	1.0605	0.6782	0.8067	1.1962	1.0762	0	0	1	1	1/9	1/3	1/5	1/3	1/4	2	1/4	0	0	0	0		
	2	1.9632		1.9896	2.357	1.5518	2.7396	3.2746	2.1577	0	0	2	9	1	1	1	3	1/2	5	1	0	0	0	0		
	3	1.5133	0.5026		1.2821	0.6735	0.9603	1.8631	1.3559	0	0	3	3	1	1	1/3	1/3	1/3	4	1	0	0	0	0		
	4	0.9429	0.4243	0.78		0.7708	0.6906	1.8564	0.9195	0	0	4	5	1	3	1	2	1	9	5	0	0	0	0		
	5	1.4746	0.6444	1.4848	1.2973		2.2948	3.3281	2.0107	0	0	5	3	1/3	3	1/2	1	1	2	1	0	0	0	0		
	6	1.2397	0.365	1.0414	1.4479	0.4358		2.517	1.0718	0	0	6	4	2	3	1	1	1	4	1	0	0	0	0		
	7	0.836	0.3054	0.5367	0.5387	0.3005	0.3973		0.6284	0	0	7	1/2	1/5	1/4	1/9	1/2	1/4	1	1/9	0	0	0	0		
	8	0.9292	0.4635	0.7375	1.0875	0.4973	0.933	1.5913		0	0	8	4	1	1	1/5	1	1	9	1	0	0	0	0		
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
2	Experto 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	3	Experto 3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	00/01/00		
	1	1	4	2	9	5	7	9	9	0	0	1	1	1/3	1	1	1	1	1	5	0	0	0	0		
	2	1/4	1	1	1	1	9	3	3	0	0	2	3	1	4	7	3	7	7	9	0	0	0	0		
	3	1/2	1	1	1	2	2	9	3	0	0	3	1	1/4	1	1	1/3	1	1	9	0	0	0	0		
	4	1/9	1	1	1	1	1	9	3	0	0	4	1	1/7	1	1	1	1	1	7	0	0	0	0		
	5	1/5	1	1/2	1	1	3	7	2	0	0	5	1	1/3	3	1	1	5	7	9	0	0	0	0		
	6	1/7	1/9	1/2	1	1/3	1	9	1	0	0	6	1	1/7	1	1	1/5	1	1/3	9	0	0	0	0		
	7	1/9	1/3	1/9	1/9	1/7	1/9	1	1	0	0	7	1	1/7	1	1	1/7	3	1	7	0	0	0	0		
	8	1/9	1/3	1/9	1/3	1/2	1	1	1	0	0	8	1/5	1/9	1/9	1/7	1/9	1/9	1/7	1	0	0	0	0		
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	Experto 4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	5	Experto 5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	00/01/00		
	1	1	1/2	1/3	5	1/3	1	1	1/3	0	0	1	1	1/3	1/2	2	3	1/5	3	3	0	0	0	0		
	2	2	1	3	3	3	3	3	1	0	0	2	3	1	1	9	9	9	9	9	0	0	0	0		
	3	3	1/3	1	1	1	1	1	1/3	0	0	3	2	1	1	3	7	3	7	7	0	0	0	0		
	4	1/5	1/3	1	1	1	1	1	1/3	0	0	4	1/2	1/9	1/3	1	3	1	3	1	0	0	0	0		
	5	3	1/3	1	1	1	1	1	1/9	0	0	5	1/3	1/9	1/7	1/3	1	1	3	1	0	0	0	0		
	6	1	1/3	1	1	1	1	1	1/9	0	0	6	5	1/9	1/3	1	1	1	7	1	0	0	0	0		
	7	1	1/3	1	1	1	1	1	1/9	0	0	7	1/3	1/9	1/7	1/3	1/3	1/7	1	1	0	0	0	0		
	8	3	1	3	3	9	9	9	1	0	0	8	1/3	1/9	1/7	1	1	1	1	1	0	0	0	0		
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	Experto 6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	7	Experto 7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	00/01/00		
	1	1	3	2	1	1	3	1	3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	5	1	5	0	0	0	0	
	2	1/3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	2	1	1	1	1	1	1	7	1	9	0	0	0	0	
	3	1/2	1	1	1	1	3	3	3	0	0	3	1	1	1	3	1	1	1	9	0	0	0	0		
	4	1	1	1	1	1	2	1	1	0	0	4	1	1	1/3	1	1	1	1	1	0	0	0	0		
	5	1	1	1	1	1	3	7	3	0	0	5	1	1	1	1	1	1	5	1	5	0	0	0	0	
	6	1/3	1	1/3	1/2	1/3	1	3	3	0	0	6	1/5	1/7	1	1	1/5	1	1/2	1/3	0	0	0	0		
	7	1	1	1/3	1	1/7	1/3	1	3	0	0	7	1	1	1	1	1	2	1	3	0	0	0	0		
	8	1/3	1	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1	0	0	8	1/5	1/9	1/9	1	1/5	3	1/3	1	0	0	0	0		
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	Experto 8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	9	Experto 9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	00/01/00		
	1	1	1/9	1/7	1/5	1/9	1/5	1/3	1/9	0	0	1	1	1	1/7	1/2	1	1/9	1/9	1/3	1/9	0	0	0	0	
	2	9	1	9	7	1/3	2	5	1	0	0	2	7	1	9	4	1	2	5	1	0	0	0	0		
	3	7	1/9	1	2	1/9	1/3	1	1/9	0	0	3	2	1/9	1	2	1/9	1/3	1/3	1/9	0	0	0	0		
	4	5	1/7	1/2	1	1/9	1/9	2	1/9	0	0	4	1	1/4	1/2	1	1/9	1/9	1	1/9	0	0	0	0		
	5	9	3	9	9	1	3	9	2	0	0	5	9	1	9	9	1	3	9	2	0	0	0	0		
	6	5	1/2	3	9	1/3	1	9	1	0	0	6	9	1/2	3	9	1/3	1	9	1	0	0	0	0		
	7	3	1/5	1	1/2	1/9	1/9	1	1/9	0	0	7	3	1/5	3	1	1/9	1/9	1	1/9	0	0	0	0		
	8	9	1	9	9	1/2	1	9	1	0	0	8	9	1	9	9	1/2	1	9	1	0	0	0	0		
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

BIBLIOGRAFÍA

- AZI, N., M. GENDREAU y J. Y. POTVIN (2010), «An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles», *European Journal of Operational Research*, **202**(3), págs. 756–763.
- BAO, Q., D. RUAN, Y. SHEN, E. HERMANS y D. JANSSENS (2012), «Improved hierarchical fuzzy TOPSIS for road safety performance evaluation», *Knowledge-Based Systems*, **32**, págs. 84–90, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2011.08.014>.
- BRANKO MILOVANOVIĆ (2012), «Methodology for establishing the routes for transportation of dangerous goods on the basis of the risk level - Case study: City of Belgrade», *Scientific Research and Essays*, **7**(1).
- CANACAR (2019), «Agenda Ecoomica 2019», https://canacar.com.mx/app/uploads/2019/08/Agenda_Economica_2019.pdf.
- CEPAL (2013), «Seguridad de la cadena logística terrestre en América Latina», https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6365/LCL3604_es.pdf?sequence=1.
- CLARKE, G. y J. W. WRIGHT (1964), «Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points», *Operations Research*, **12**(4), págs. 568–581.
- DANTZIG, G. B. y J. H. RAMSER (1959), «The Truck Dispatching Problem», *Management Science*, **6**(1), págs. 80–91.

- DAVIDOVIĆ, J., D. PEŠIĆ, K. LIPOVAC y B. ANTIĆ (2020), «The Significance of the Development of Road Safety Performance Indicators Related to Driver Fatigue», *45*, págs. 333–342.
- DE LA TORRE, E., C. MARTNER, J. MARTÍNEZ, E. OLIVARES y E. MORENO (2013), «Analyzing risk factors for highway theft in Mexico», *WIT Transactions on the Built Environment*, **134**, págs. 437–446.
- DESAULNIERS, G., J. DESROSIERS, A. ERDMANN, M. M. SOLOMON y F. SOUMIS (2002), *VRP with Pickup and Delivery*, capítulo 9, primera edición, January, págs. 225–242.
- DONNER, M. (2009), *Supply Chain Security Guide*, primera edición, Washington, D.C: The World Bank,.
- GITELMAN, V., M. VIS, W. WEIJERMARS y S. HAKKERT (2014), «Development of Road Safety Performance Indicators for the European Countries», *Advances in Social Sciences Research Journal*, **1**(4), págs. 138–158.
- GOEPEL, K. D. (2013), «IMPLEMENTING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS AS A STANDARD METHOD FOR MULTI-CRITERIA DECISION MAKING IN CORPORATE ENTERPRISES – A NEW AHP EXCEL TEMPLATE WITH MULTIPLE INPUTS», *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, **2**(10), págs. 1–10.
- GOLDEN, B. y S. RAGHAVAN (2008), *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, primera edición, Springer US.
- GUZE, T., S., NEUMANN y P. WILCZYNSK (2017), «Multi-Criteria Optimization of Liquid Cargo Transport According to Linguistic Approach to the Route Selection Task», , págs. 89–96.
- HOLLÓ, P., V. EKSLER y J. ZUKOWSKA (2010), «Road safety performance indicators and their explanatory value: A critical view based on the experience of Central European countries», *Safety Science*, **48**(9), págs. 1142–1150.

- HUANG, C., B., LONG y Y. S. LIEW (2003), «GIS-AHP model for HAZMAT routing with security considerations», *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, **2**(1), págs. 1644–1649.
- HUI-LI, Y., L. CHUN-GUANG y L. SHI-ZHONG (2009), «Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in shipyard project investment Risk Recognition1/APPLICATION DU PROCÈSSUS HIÉRARCHIQUE ANALYTIQUE ...», *Canadian Social ...*, (August), págs. 17–25, URL <http://search.proquest.com/openview/35344093cef63b609effd5ad273ee6ce/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=40277>.
- HURTADO, T. y G. BRUNO (2005), «El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta par la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores», .
- KALLEHAUGE, B. y M. M. SOLOMON (2002), *VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS*, capítulo 3, SIAM, págs. 68–94.
- LAPORTE, G. (1991), «The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms», *European Journal of Operational Research*, **59**.
- LIU, Y., C. M. ECKERT y C. EARLK (2020), «A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgement», **161**.
- MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, E. (2007), «Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la loalización de una PYME», *Anuario jurídico y económico escorialense*, (40), págs. 523–542.
- PEÑAFIEL-NIVELA, G., R. NAVARRETE-ORTEGA, F. HOLGUÍN-DÍAZ y R. ORTEGA-NAVARRETE (2017), «Model Application Multiattribute (M.A.U) in decision-making processes for departmental charges in Education Technical University of Babahoyo, Quevedo Extension», *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, **2**(6), págs. 16–21, URL <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6118737>.

- RADOJIČIĆ, N., M. MARIĆ y A. TAKAČI (2018), «A new fuzzy version of the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem», *Information Technology and Control*, **47**(2), págs. 321–337.
- RESTREPO, J., P. MEDINA y T. CRUZ (2008), «UN PROBLEMA LOGÍSTICO DE PROGRAMACIÓN DE VEHÍCULOS CON VENAS DE TIEMPO(VRPTW)», *Scientia et Technica*, **39**, págs. 229–334.
- SAATY, T. L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill.
- SAHNOON, I., M. SHAWKY y A. AL-GHAFLI (2018), «Integrating traffic safety in vehicle routing solution», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, **597**, págs. 251–263.
- SENSIGUARD (2019), «Annual report cargo theft in México», file:///C:/Users/4PF62LA1909/Downloads/2018_{annual}_{mexico}_{eng}.pdf.
- SHALOM, H. y V. GITELMAN (2007), «Road Safety Performance Indicators», *Safety-Net D3.8*, **3**(8), págs. 45–100.
- STIGSON, H. (2009), «A SAFE ROAD TRANSPORT SYSTEM - FACTORS INFLUENCING INJURY OUTCOME FOR CAR OCCUPANTS», , págs. 50–60.
- TAN, K., C. CHEONG y GOH (2007), «Solving multiobjective vehicle routing problem with stochastic demand via evolutionary computation», *European Journal of Operational Research*, **177**(2), págs. 813–839.
- TARANTILIS, C. D. y C. T. KIRANOUDIS (2004), «An adaptive memory programming method for risk logistics operations», *International Journal of Systems Science*, **35**(10), págs. 579–590.
- TEŠIĆ, M., E. HERMANS, K. LIPOVAC y D. PEŠIĆ (2018), «Identifying the most significant indicators of the total road safety performance index», *Accident Analysis and Prevention*, **113**(February), págs. 263–278.

- TOTH, P. y D. VIGO (2002), *An Overview of Vehicle Routing Problems*, capítulo 1, primera edición, SIAM, págs. 1–26.
- TREAT, J. (1980), «A study of precrash factors involved in traffic accidents», .
- VAIDYA, O. S. y S. KUMAR (2006), «Analytic hierarchy process: An overview of applications», *European Journal of Operational Research*, **169**(1), págs. 1–29.
- YEPES PIQUERAS, V. (2002), «“Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW”», tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos», .
- ZHONG, Y. y M. H. COLE (2005), «A vehicle routing problem with backhauls and time windows: A guided local search solution», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **41**(2), págs. 131–144.
- ZOGRAFOS, K. G. y K. N. ANDROUTSOPOULOS (2004), «A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems», *European Journal of Operational Research*, **152**, págs. 507–519.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ing.Marilyn Roxana Lozada Dario

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CONSIDERANDO LA
SEGURIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO

Nació el 6 de mayo de 1996 en Nogales, Veracruz, Hija de Jose de Jesus Lozada Mondragon y Celia Maria Dario León. Ingeniera industrial egresada del Tecnológico Nacional de México campus Orizaba en 2019. Posee una certificación green belt por technische universität münchen. Se ha desempeñado en la planeación estratégica de la mejora continúa.