

PROPUESTA PARA LA PROGRAMACIÓN DE RUTAS CON BACKHAULS Y
VENTANAS DE TIEMPO EN UNA EMPRESA DEL SECTOR ALIMENTICIO

MAURICIO ANDRÉS SÁNCHEZ ARISMENDI
PAULA ANDREA TIGREROS CÁRDENAS

UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE BUGA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2018

PROPUESTA PARA LA PROGRAMACIÓN DE RUTAS CON BACKHAULS Y
VENTANAS DE TIEMPO PARA UNA EMPRESA DEL SECTOR ALIMENTICIO

MAURICIO ANDRÉS SÁNCHEZ ARISMENDI
PAULA ANDREA TIGREROS CÁRDENAS

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial

Director:
MSc. JULIO CÉSAR LONDOÑO

UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE BUGA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por habernos acompañado y guiado en este proceso de crecimiento personal y profesional, por darnos fortaleza y privilegiarnos con una vida llena de aprendizaje y experiencias.

Agradecemos a nuestros padres por su esfuerzo, compromiso y dedicación, dándonos la oportunidad de estudiar nuestra carrera profesional. Por su constante apoyo y recomendaciones para no darnos por vencidos y dar lo mejor de nosotros mismos. Por sus enseñanzas que nos han permitido ser las personas que hoy en día somos.

Gracias a nuestro director de trabajo de grado por cada minuto de su tiempo dedicado a resolver inquietudes y dudas en cada etapa del proyecto. Gracias profesor por la orientación técnica y estratégica durante cada una de las asesorías prestadas para nuestro desarrollo y crecimiento académico.

Gracias por habernos permitido desarrollar nuestro trabajo de grado bajo su orientación, por compartir su vasto conocimiento en logística con nosotros. Hoy nos sentimos plenamente afortunados de haber compartido con usted este proceso de desarrollo, crecimiento y culminación de nuestros estudios profesionales bajo su tutoría. Gracias profesor Julio Cesar Londoño.

Agradecemos a nuestros maestros quienes con toda su disposición nos brindaron su conocimiento, experiencias y consejos adquiridos a lo largo de su trayectoria. Les damos gracias por dar lo mejor de sí para instruirnos y dejar en nosotros las enseñanzas para afrontar la vida como personas integrales y capaces.

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE GRÁFICOS.....	9
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	13
2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
2.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	16
4. MARCO TEÓRICO	18
4.1 PROBLEMA DE RUTEO CON BACKHAULS Y VENTANAS DE TIEMPO	18
4.2 ESTRATEGIA METODOLÓGICA DE SOLUCIÓN.....	19
4.2.1 Método de ahorros como heurístico de solución	19
4.2.2. Problema de ruteo con ventanas de tiempo planteado por Cordeau	21
5. REVISIÓN DE LA LITERATURA	23
5.1 ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE RUTEO CON VENTANAS DE TIEMPO	23
5.2 ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN PARA PROBLEMAS DE RUTEO CON BACKHAUL.....	23
5.3 ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON BACKHAUL Y VENTANAS DE TIEMPO	24

6. PROCESO METODOLÓGICO	26
6.1 CARACTERIZACIÓN	26
6.1.1 Características del producto a transportar	26
6.1.2 Información de los clientes	26
6.1.3 Características del proceso de ruteo	26
6.1.4 Características de la flota de vehículos	27
6.2 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	28
6.2.1 Cálculo de distancias	28
6.2.2 Asignación de clientes a rutas	30
6.2.3 Modelación matemática para el TSPBTW	32
6.3 EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL MODELO PROPUESTO	34
6.3.1 Desarrollo del modelo propuesto TSPBTW	35
6.3.2 Alternativa al modelo propuesto TSPBTW	42
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	57
8. CONCLUSIONES	60
9. BIBLIOGRAFIA	62
ANEXOS	65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Características del medio de transporte.....	27
Tabla 2 Calculo de distancia mediante la ley esférica de los cosenos. Ejemplo.....	30
Tabla 3 Ejemplo de cálculo de ahorro entre dos nodos	30
Tabla 4 Ejemplo asignación de clientes a rutas por el método de ahorros	31
Tabla 5 Continuación ejemplo de asignación de rutas por método de ahorros.....	32
Tabla 6 Distribución de los clientes en cada ruta del primer escenario.	35
Tabla 7 Resultados obtenidos aplicando tspbtw bajo escenario de demanda 1	36
Tabla 8 Secuencia asociada a la ruta 1 escenario 1.....	36
Tabla 9 Secuencia asociada a la ruta 3 escenario 1.....	37
Tabla 10 Secuencia asociada a la ruta 4 escenario 1.....	38
Tabla 11 Distribución de los clientes en cada ruta escenario 2	39
Tabla 12 Resultados obtenidos por ruta con el modelo TSPBTW	40
Tabla 13 Secuencia asociada a la ruta 1, escenario 2.....	40
Tabla 14 Secuencia asociada a la ruta 3, escenario 2.....	41
Tabla 15 Secuencia asociada a la ruta 4, escenario 2.....	42
Tabla 16 Distribución de los clientes en cada ruta del primer escenario	44
Tabla 17 Resultados obtenidos aplicando TSPTW – TSPB escenario 1	44
Tabla 18 Secuencia asociada a la ruta 1 escenario 1.....	44
Tabla 19 Secuencia asociada a la ruta 2 escenario 1.....	46
Tabla 20 Secuencia asociada a la ruta 3 escenario 1.....	48
Tabla 21 Secuencia asociada a la ruta 4 escenario 1.....	49
Tabla 22 Distribución de los clientes en cada ruta escenario 2	51
Tabla 23 Resultados obtenidos con modelo TSPB - TSPTW.	51
Tabla 24 Secuencia asociada a la ruta 1, escenario 2.....	51
Tabla 25 Secuencia asociada a la ruta 2, escenario 2.....	53
Tabla 26 Secuencia asociada a la ruta 3, escenario 2.....	54

Tabla 27 Secuencia asociada a la ruta 4, escenario 2.....	56
Tabla 28 Secuencia asociada método tradicional escenario 1	57
Tabla 29 Secuencia asociada método tradicional escenario 2	58
Tabla 30 Comparación de los resultados método empresa y TSPBTW	58
Tabla 31 Comparación de los resultados método empresa y TSPB-TSPTW	58

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1 Representación de VRPBTW.	13
Gráfico 2 Principio básico del método de ahorros	20
Gráfico 3 Calculo del factor de circuito.....	29
Gráfico 4 Secuencia ruta 1 implementando modelo TSPBTW.....	37
Gráfico 5 Secuencia ruta 3 implementando modelo TSPBTW.....	38
Gráfico 6 Secuencia ruta 4 implementando modelo TSPBTW.....	39
Gráfico 7 Secuencia ruta 1 implementando modelo TSPBTW.....	40
Gráfico 8 Secuencia ruta 3 implementando modelo TSPBTW.....	41
Gráfico 9 Secuencia ruta 4 implementando modelo TSPBTW.....	42
Gráfico 10 Clientes linehaul ruta 1	45
Gráfico 11 Clientes backhaul ruta 1.	46
Gráfico 12 Clientes linehaul ruta 2.	47
Gráfico 13 Clientes backhaul ruta 2	47
Gráfico 14 Clientes linehaul ruta 3.	48
Gráfico 15 Clientes backhaul ruta 3	49
Gráfico 16 Clientes linehaul ruta 4	50
Gráfico 17 Clientes backhaul ruta 4	50
Gráfico 18 Clientes linehaul ruta 1	52
Gráfico 19 Clientes backhaul ruta 1	52
Gráfico 20 Clientes linehaul ruta 2.	53
Gráfico 21 Clientes linehaul ruta 2	54
Gráfico 22 Clientes linehaul ruta 3.	55
Gráfico 23 Clientes backhaul ruta 3	55
Gráfico 24 Clientes linehaul ruta 4.	56
Gráfico 25 Clientes backhaul ruta 4.	56

RESUMEN

En este documento se presenta un caso de estudio que abarca la problemática de ruteo de vehículos con Backhauls y ventanas de tiempo VRPBTW (Vehicule Routing Problem with Backhaul and time Windows), mediante una metodología TSP con Backhauls y ventanas de tiempo TSPBTW, aplicado a una empresa del sector alimenticio de la ciudad de Cali. Las características principales del modelo buscan dar una ruta optima que cumpla con las franjas horarias impuestas por los clientes Linehauls y la necesidad de secuenciar los clientes de retorno (Backhaul) al finalizar la entrega logrando minimizar el costo del ruteo. La aplicación de este modelo en el caso de estudio permitió una reducción del 47% al 64% en la distancia total recorrida de los casos estudiados en comparación con el método de ruteo de la compañía.

Palabras clave: Backhaul, Linehaul, TSPBTW, VRPBTW, ruteo, ventanas de tiempo.

INTRODUCCIÓN

Los problemas de ruteo de vehículos han sido ampliamente tratados en la literatura. En estos se asignan a cada componente de la flota vehicular un conjunto de clientes con diferentes demandas conocidas, buscando minimizar los tiempos y distancias recorridas.

En el planteamiento de variantes al problema clásico, los medios de transporte parten de un punto central y terminan en este una vez visitados cada uno de los clientes asignados al vehículo, ya sean clientes linehails (quienes requieren de la entrega de mercancía) y backhails (quienes mandan mercancía de retorno). Además, pueden considerarse otras características adicionales al problema como lo son las franjas horarias pactadas con el cliente para la entrega del producto, generando los problemas de ruteo de vehículos con backhails y ventanas de tiempo.

Para abordar la temática del trabajo de grado se lleva a cabo un estudio de caso aplicado a una empresa del sector alimenticio ubicada en la ciudad de Tuluá sirviendo a 100 clientes de la ciudad de Cali. Esta cuenta con una flota de camiones y clientes que requieren ser servidos en una franja horaria determinada. Los productos son transportados en canastillas para facilitar su transporte.

El propósito de abarcar esta problemática consiste en plantear una metodología que permita minimizar las distancias recorridas en las rutas que actualmente elige cada transportista, logrando a su vez satisfacer los horarios en los que son requeridos los pedidos de los clientes .

La solución a este problema de ruteo de vehículos (VRP) se obtiene mediante la asignación y secuenciación de una cantidad de clientes a cada vehículo que cumpla con las restricciones de capacidad mediante la implementación del método de ahorros. Una vez generados estos clústeres, se aplica un modelo matemático que optimiza la ruta de cada transportista tomando en cuenta las ventanas de tiempo y la recolección de los RTIs para lo cual se implementó un TSP. Para validar su funcionamiento se presentan dos situaciones en un día típico de ruteo donde se utilizan dos variantes del modelo propuesto lo que permitió observar su desempeño y las limitaciones que presenta.

En la sección 1, se describe el problema a analizar. La sección 2, plantea los objetivos de la propuesta de investigación. La sección 3, presenta la justificación de la realización del trabajo. La sección 4, contiene el marco teórico. La sección 5, presenta el estado del arte que abarca el problema de ruteo de vehículos y sus generalidades. La sección 6, presenta la metodología propuesta implementada para abordar el problema. Finalmente, la sección 7, muestra las conclusiones obtenidas del desarrollo de la propuesta.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La deficiente programación de ruteo en un sistema de entrega y recolección representa una proporción considerable en los precios de los productos debido a los costos elevados del sistema logístico [1]. Esta situación toma complejidad al considerar las características propias y el contexto en el que se desarrolla el proceso de ruteo, debido al incremento de los tiempos de actividad y la expansión del mercado a servir.

Actualmente, el proceso de transporte para la entrega y recolección en esta organización es deficiente, pues los costos de transporte han llegado a representar más del 11% de las ventas según los datos proporcionados por la empresa. Esta cifra es equivalente al doble del promedio nacional según los datos del Sintec para el 2016, acercándose a su vez, al total de los costos logísticos que corresponden al 14,9% para Colombia. Los costos logísticos mencionados abarcan la distribución, almacenamiento, administración logística, manejo de pedidos, entre otros. [2]

Por otro lado, la empresa se encuentra desarrollando un sistema integrado de información que entre sus funciones genera los consolidados para cargue de los camiones por orden alfabético. Con esta información, el encargado de la ruta determina el orden de distribución de los pedidos según su experiencia, asignándole a cada transportista los clientes a servir tanto de entrega como de recolección.

Con la descripción del sistema anterior, el problema se convierte en una variante del ruteo convencional (VRP) tomando en cuenta la devolución a la empresa de los RTIs (VRPB: vehicle routing problem with backhaul) puesto que se encarga de generar las rutas tomando en cuenta la capacidad del vehículo. Para el modelo, se contempla a los clientes linehauls (quienes reciben los alimentos) y los backhauls (quienes retornan las canastillas nuevamente a la empresa).

Por último, al considerar restricciones en las franjas horarias determinadas con los clientes para la recepción de mercancías, se genera un grado más de complejidad al problema de asignación adecuada de rutas que minimicen las distancias y con esto los costos que conlleva.

En el Gráfico 1 se presenta la descripción realizada de forma gráfica del problema de ruteo de vehículos con entregas que incluyen ventanas de tiempo y recogidas.

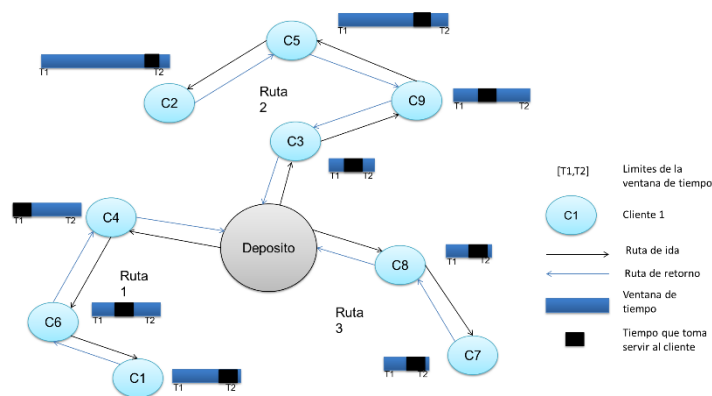


Gráfico 1 Representación de VRPBTW.

Fuente: Elaboración propia

Debido a esta situación, la asignación de rutas es un punto clave para eliminar la problemática interna pues una vez asignada la ruta se podrá cargar el camión en el orden de entrega, permitiendo satisfacer al cliente con entregas en óptimas condiciones, en el tiempo estimado y en las cantidades solicitadas. Además, se espera poder contribuir a mejorar las rutas que empíricamente cada transportista realiza a diario, minimizando las distancias recorridas.

El problema es recurrente, pues se realiza de forma empírica ocasionando los diferentes problemas mencionados. Su posible solución parte de un modelo combinatorio, implicando un conjunto de datos muy grande que difícilmente puede ser resuelto en un tiempo polinomial aceptable, considerándose los VRP como problemas NP-Hard y que hacen uso de heurísticas y metaheurísticas para llegar a una solución cercana a la óptima [3] siendo por este motivo que se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo programar la asignación de rutas de vehículos con Backhaul considerando ventanas de tiempo que permita minimizar las distancias recorridas para el caso de estudio?

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para el análisis de esta problemática, se plantea un caso de estudio en una planta localizada en la ciudad de Tuluá que se encarga de la producción y comercialización de productos lácteos distribuidos a diferentes ciudades del país. Su aplicación al tema se fundamenta en la falta de un sistema que permita programar las rutas de los vehículos y con esto, realizar la entrega y posterior recolección de las canastillas donde se transporta el producto, contribuyendo a minimizar los costos y distancias recorridas.

Se toma como referencia las rutas realizadas a la ciudad de Cali en un día cotidiano, con un total de 100 clientes con demanda determinística. Para responder a la demanda, la empresa cuenta con una flota de 4 camiones, con capacidad de 6 toneladas cada uno, donde se transporta productos acomodados en canastillas para facilitar la entrega. Cada camión tiene la capacidad de transportar 368 canastillas, que son consideradas como RTIs (Returnable Items Transport) y su tratamiento abarca el método tradicional que realiza primero las entregas de todos los pedidos (ruteo hacia adelante) y luego se encarga de las recolecciones (ruteo hacia atrás).

Respecto a las características del problema de ruteo de vehículos en el caso de estudio, se considera que la flota es homogénea, y su recorrido inicia y termina en el punto de origen (centro de distribución). Las rutas cuentan con la posibilidad de realizarse en cualquier orden, siempre y cuando cumplan con las restricciones de tiempo de los clientes que han pedido ser servidos en un horario específico. Es de aclarar, que a cada vehículo le compete una sola ruta en el periodo de planificación, por lo que el número de rutas estará dado por la cantidad de vehículos a programar.

Cada ruta tendrá que servir m clientes, teniendo en cuenta que la demanda total correspondiente a dicha ruta no podrá exceder la capacidad de cada vehículo y cada pedido deberá entregarse completo. Por último, todas las cantidades a entregar deberán ser cargadas en el centro de distribución, al igual que las cantidades a recolectar deben llegar a este. Las velocidades de los vehículos son promedio en la ciudad y cada cliente visitado para entrega, deberá visitarse nuevamente para recolectar las canastas.

2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una metodología para la asignación de rutas en el problema de ruteo de vehículos para entrega y recolección, considerando ventanas de tiempo en las entregas, para una empresa del sector alimenticio que permita minimizar las distancias recorridas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el proceso de ruteo de vehículos que actualmente maneja la empresa, para la determinación de las variables y parámetros a tener en cuenta en el problema de entregas de productos y recogidas de RTIs.
- Formular un modelo matemático que se adapte a las características del problema, con el fin de representar la situación real de la distribución y recogida de RTIs
- Evaluar el desempeño del modelo propuesto mediante un caso de estudio bajo diferentes escenarios de demanda.

3. JUSTIFICACIÓN

La realización de este trabajo se fundamenta en los problemas que las compañías suelen presentar para determinar las mejores rutas de entrega de sus productos, generando que la satisfacción de los clientes se vea afectada por la disminución del nivel de servicio y los altos costos para la organización [4]. Adicional, la complejidad de los procesos logísticos que se ha visto incrementada debido a los nuevos desafíos en la industria del sector alimenticio. Principalmente se toman en cuenta los desafíos relacionados con la seguridad alimentaria e inocuidad de los productos, y es por esta razón que abordar un VRPB tiene como objetivo evitar la contaminación cruzada, eliminar la pérdida de los RTIs y asegurar su disponibilidad, ya que se consideran clientes de entrega y recolección. Las características mencionadas restringen aún más el conjunto solución, debido a la naturaleza NP-hard del problema que debe ser abordado por métodos heurístico para encontrar una aproximación a la mejor solución. [5]

Según el Sintec (Customer and operation strategy), a través de un informe sobre el transporte como verdadero reto para Latinoamérica y Colombia, se menciona que los costos logísticos pueden llegar a constituir el 17,6% de las ventas para las empresas pequeñas. De este porcentaje, el correspondiente al transporte terrestre equivale a 37%, concluyendo que el costo de transporte es más importante ya que representa al menos una tercera parte de los costos logísticos [2]. Es aquí donde toma importancia la planeación y ejecución del proceso logístico a través de la metodología que se plantea en este trabajo de grado, ya que conllevará a mejorar las condiciones de la organización en términos económicos y la fidelidad de los clientes pues permitirá minimizar las distancias recorridas y cumplir con las entregas en el momento solicitado. [6]

La creación de una metodología que permite modelar un escenario y dar solución al problema de ruteo con estas características es de gran importancia para la optimización de los recursos disponibles en una empresa ya que logra bajo ciertas condiciones simular el entorno. Los escenarios planteados en este trabajo de grado no han sido ampliamente estudiados en la literatura relacionada, al igual que la metodología propuesta la cual es producto de este trabajo y no hay evidencia de que se estudiara con anterioridad. El modelo matemático es fácil de implementar y requiere de información básica característica del proceso por lo que puede ser adaptado de forma rápida a otro contexto. En este sentido, la metodología contribuye a la planificación y ejecución del proceso de ruteo en la práctica y en el ámbito teórico a través de la formulación realizada que no ha sido referenciada.

En el ámbito teórico, además de los pocos estudios encontrados asociados a este tipo de problemas, el modelo toma importancia debido a la naturaleza Np-hard de los

problemas de ruteo de vehículos que difícilmente pueden ser resueltos mediante algoritmos o métodos exactos para encontrar una solución óptima en un tiempo de cálculo razonable. Por tanto, la metodología propuesta que permite subdividir el conjunto de clientes por medio de clústeres, de acuerdo con la posición geográfica de los clientes como el método de ahorros y posteriormente determinar la secuencia a seguir por cada ruta considerando un problema de agente viajero (TSPBTW), logran disminuir la complejidad de este tipo de problemas. Frente a esta situación.

La presentación de este tipo de problemas es recurrente en muchas compañías, por lo que brindar una propuesta para su solución consigue mejorar la eficiencia de estas, dado que es un aspecto indispensable para competir en la industrial pues influye en los costos logísticos y tiempos de entrega. De igual forma, el desarrollo de este caso de estudio comprende una oportunidad para reforzar los conocimientos adquiridos durante la carrera a través de la combinación de diferentes técnicas de la investigación de operaciones, aprendiendo a enfrentar problemas cotidianos y complejos que pueden ser resueltos con las herramientas de la Ingeniería Industrial.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 PROBLEMA DE RUTEO CON BACKHAULS Y VENTANAS DE TIEMPO

El VRP clásico se encarga de la programación de rutas para entregas que generen el menor costo total de cada viaje. En este, cada vehículo con las mismas características tiene asignado un conjunto de clientes distribuidos geográficamente y una secuencia de servicio partiendo desde un punto o depósito. La organización de estas rutas se encuentra limitada por las capacidades de cada vehículo y la necesidad de llegar al punto nuevamente de partida al acabar la ruta [7]. Diferente al VRP, el TSP (Traveling Salesman Problem) se encarga de encontrar la ruta más corta de un solo vehículo, el cual debe recorrer varios puntos por una vez y posteriormente volver al lugar de partida [8], por la consideración de la capacidad del vehículo se encuentra implícita en el problema.

De este planteamiento inicial han surgido diversas restricciones adicionales que han sido ampliamente estudiadas por su posible aplicabilidad a las actividades logísticas de transporte. Entre estas características se encuentran las ventanas de tiempo y el tratamiento de ítems transportables de retorno.

En el caso de los problemas de ruteo de vehículos con backhauls donde la entrega y la recolección es obligatoria, se pueden encontrar tres tipos de situaciones: Servir las entregas y posteriormente realizar la recolección de RTIs; realizar la entrega y recolección de forma aleatoria, y por último atender la entrega y recolección de forma simultánea [9].

Los RTIs mencionados hacen referencia a materiales que son implementados para embalaje secundario y terciario en el transporte, almacenamiento, manipulación y protección de productos en la cadena de suministro sin tener contacto directo con este que luego retornan para ser nuevamente utilizados [10].

Este tipo de embalaje para transporte ha sido incorporado en gran variedad de industrias gracias a los beneficios operacionales de protección, seguridad, manejo y consumo que tiene con respecto al embalaje tradicional, disminuyendo el desperdicio de material y contribuyendo a reducir los gastos logísticos [11]. Como RTIs pueden considerarse contenedores, recipientes, cajas plásticas, bandejas, etc.

La programación de rutas tomando en cuenta ventanas de tiempo consiste en asumir que las entregas deberán servirse en un determinado intervalo de tiempo sugerido por cada cliente. Bajo esta premisa, se guardan las características del problema clásico tal como lo muestra [12] donde parten de un único depósito donde deberá comenzar y terminar cada ruta, la flota de vehículos sigue considerándose homogénea y cada cliente tiene asociada una distancia d_{ij} y un tiempo de viaje t_{ij} . El conjunto de clientes al que se deberá atender $N = \{1, \dots, n\}$ tendrá una demanda q_i , un tiempo de servicio s_i y una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ que condiciona el momento desde el cual se podrá servir al cliente y hasta qué momento estará disponible para recibir el producto.

Finalmente, un problema de ruteo que tome en cuenta la recolección de ítems de retorno transportables y las ventanas de tiempo, consiste en un conjunto de clientes con demanda y ventanas de tiempo determinísticas que deben ser atendidos en un horizonte de tiempo [5]. El objetivo de esta programación de rutas con backhauls y ventanas de tiempo consiste en minimizar el número de rutas y minimizar la distancia total de todas las rutas.

Cada cliente se asigna a un solo vehículo y puede ocupar a dos tipos de clientes, aquellos cuya demanda necesita ser entregada y clientes backhaul quienes requieren que la demanda sea retirada. El cliente solo puede ser atendido cuando se abre la ventana de tiempo y si requiere de los dos servicios de entrega y recolección deberán tomarse las actividades por separado.

4.2 ESTRATEGIA METODOLÓGICA DE SOLUCIÓN

Los fundamentos teóricos que abarca la propuesta de investigación parten del planteamiento formulado por [13] los cuales han presentado en varias publicaciones sus estudios sobre el problema de ruteo de vehículos. Estos aportes han logrado abarcar desde el estudio del problema tradicional que solo cuenta con un único depósito, limitaciones de capacidad y longitud de ruta, hasta el estudio de metodologías de solución planteadas por otros autores y variantes del problema como la inclusión de ventanas de tiempo. De igual forma, se toma como referente a [14] que en su artículo presenta el análisis de diferentes heurísticos para resolver el problema de ruteo, los cuales se recomiendan cuando se requiere el tratamiento de grandes cantidades de datos en un problema, pues su característica Np-hard hace que difícilmente sean optimizables sin el uso de estas herramientas.

4.2.1 Método de ahorros como heurístico de solución

En el capítulo 6 de la publicación "*Handbooks in operations research and management*", [13] realizan la descripción de diferentes algoritmos partiendo de los métodos exactos para el problema clásico hasta llegar a heurísticas y metaheurísticas. En este sentido y debido a que la propuesta se enfoca en la implementación de heurísticos como método para la agrupación de clientes y su enrutamiento se buscó implementar una de las metodologías recomendadas como lo es el método de ahorros.

La heurística mencionada abarca el algoritmo de construcción de rutas, el cual, a partir de una solución de vacío y de forma iterativa construye la ruta a través de la inserción de uno o más clientes en cada iteración, hasta que todos los clientes son asignados. Entre estos se conoce la propuesta de [14] donde a través de los costos se realiza la secuencia de las rutas considerando todos los pares de clientes y ordenando los ahorros en orden no creciente (Método de ahorros).

Según lo explicado por Clarke & Wright, el método de ahorros se encarga de buscar en cada paso del algoritmo dos puntos (P_a , P_b) de todos los posibles a visitar (P_1 , $P_2, \dots$, P_n).

El recorrido entre los dos puntos seleccionados genera el mayor ahorro en tiempo y distancia, por lo cual se unen a la demanda a servir de la ruta. De esta forma se obtienen las rutas más cortas entre cada dos puntos en el sistema estudiado (Ver Gráfico 2).

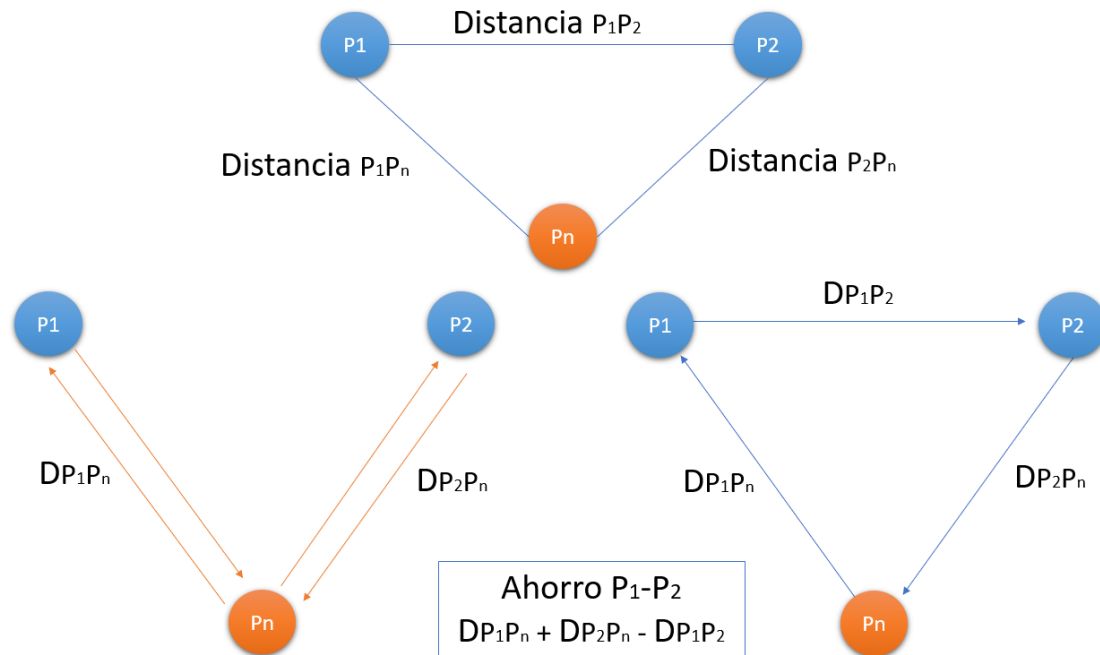


Gráfico 2 Principio básico del método de ahorros

Fuente: Elaboración propia. Información tomada [15]

En este modelo los clientes que generen mayor ahorro (distancias) podrán unirse a la ruta si no excede la capacidad del camión c_i correspondiente, por lo que es permitido en cada etapa unir dos puntos cualquiera cuya carga total no exceda la capacidad c_i .

El procedimiento de cálculo consiste en obtener las distancias entre cada dos puntos $d(P_1, P_n)$, obteniendo una matriz de distancias que relaciona las filas y columnas.

Para determinar la matriz de ahorros se calcula la suma de las distancias de cada punto (P_1, P_2) al punto de origen (P_o) restándole la distancia entre los dos puntos iniciales, siguiendo este cálculo para todas las combinaciones posibles entre los clientes a servir. Terminada la matriz, la relación entre dos puntos que den el mayor ahorro serán los primeros integrantes de la ruta a definir, empezando a integrar a la ruta aquellos puntos con el siguiente mayor ahorro que tengan relación con los ya pertenecientes a la ruta.

El procedimiento se repite hasta que no hay más enlaces posibles o la capacidad de dicha ruta será superada por la siguiente demanda a cumplir.

Este método también es considerado en los aportes de [14] el cual en su publicación "Algoritmos para el problema de ruteo y programación de vehículos con restricciones de

ventanas de tiempo” describe algunos heurísticos y realiza un estudio computacional para enrutamiento y programación. Entre los métodos analizados se menciona el nuevamente el heurístico de ahorros, el heurístico del vecino más cercano orientado en tiempo, el heurístico de inserción y el heurístico de barrido orientada en el tiempo.

4.2.2. Problema de ruteo con ventanas de tiempo planteado por Cordeau

De igual forma, el planteamiento de [13] relacionado con la formulación de problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, se fundamenta como base teórica para la propuesta de investigación, esperando adaptarlo al problema con Backhauls para lograr minimizar las distancias recorridas.

En este modelo, se parte de una variante al VRP clásico donde el servicio de cada cliente se debe realizar conforme al cumplimiento de una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$, donde se permite que este sea servido a partir del momento a_i , hasta b_i . Cada cliente cuenta con un tiempo de servicio asociado representado por s_i , además del tiempo de viaje i hacia j que se simboliza con T_{ij} .

El modelo presentado por [13], implica dos tipos de variables, x_{ij}^k que representa una variable binaria, donde tomará el valor de uno en caso de que el arco ij sea atendido por el vehículo k , cero en caso contrario. Por otro lado, está la variable w_i^k , que establece el tiempo en el que el vehículo k inicia el servicio del cliente i .

El desarrollo del problema consiste en una función objetivo que busca minimizar el costo total de enrutamiento, la cual está sujeta a restricciones como una sola visita por cliente en el periodo de planificación y la conservación del flujo para que se cumpla en cada cliente visitado, limitado a la capacidad del vehículo. Además, el modelo permite tener en cuenta una restricción para la consistencia de las variables de tiempo partiendo de una función no lineal, pero que puede eliminarse a partir de otra restricción con la cual no contaba la formulación original.

Sin embargo, en la literatura también se han encontrado trabajos relacionados con el problema de ruteo de vehículos con Backhauls y ventanas de tiempo (VRPBTW) el cual incluye restricciones de retorno, capacidad de cargue de los camiones y ventanas de tiempo.

Para el problema que se desea abarcar, al igual que en el VRPB se consideran dos clases de clientes los Linehauls y Backhauls, donde la flota de vehículos debe partir desde la planta y una vez atendidos a todos los clientes regresar al punto de partida con los RTIs [16].

Partiendo del modelo explicado, se realizó la adaptación del modelo para implementar el método de ahorros anteriormente mencionado y simplificar el modelo de programación convirtiéndolo en un TSP ya que se parte de una solución previa de segmentación de los

clientes donde el cumplimiento de la restricción de capacidad del vehículo ya se tiene en cuenta.

El TSPBTW estudiado, se caracteriza por incluir una gama de características específicas como lo son la demanda determinística y ventanas de tiempo que son establecidas por los clientes, así mismo el proceso de distribución debe llevarse a cabo por medio de una flota vehículos de transporte homogénea. En este, cada cliente debe ser asignado de acuerdo al servicio que requiere (entrega o recolección), si este necesita de ambos servicios se programa como si fueran 2 clientes distintos, y de igual manera este modelo conserva el objetivo general del VRP, minimizar las distancias totales recorridas cumpliendo con la totalidad de las restricciones [5].

5. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El análisis del VRP fue propuesto inicialmente por Dantzig & Ramser [8] luego de trabajar y plantear metodologías de solución al problema TSP [8]. En el primero se encargaron de la asignación de rutas para una flota homogénea. Su objetivo consistió en distribuir la mercancía entre los depósitos y las ubicaciones geográficas de los clientes para reducir las distancias y el tiempo total de entrega, todo esto bajo unas restricciones de capacidad de los vehículos y de la demanda de los clientes. La diferencia entre estos dos consiste en la consideración de la capacidad del vehículo.

5.1 ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE RUTEO CON VENTANAS DE TIEMPO

Desde entonces, el diseño de metodologías que abarcan el problema de ruteo de vehículos y sus variantes han sido estudiadas ampliamente por la literatura, buscando optimizar los diferentes recursos que se ven involucrados en cada caso. Entre estas variantes podemos encontrar los VRP con ventanas de tiempo (VRPTW) que han sido abordados por autores como [12], donde proponen un algoritmo iterativo en un modelo de red pseudo-polinomio donde los nodos representan instantes de tiempo asociados al cliente y los arcos representan las rutas factibles.

Otra metodología es propuesta por [17], donde incluyen un enfoque híbrido multi-objetivo que vincula la optimización por enjambre de partículas y la búsqueda de entorno variable multiobjetivo, resultando más eficiente que otros enfoques y siendo competitivo con la implementación de algoritmos genéticos en los 12 casos analizados.

Las entregas divididas como variante al problema clásico (SDVRP) se presentan en el artículo publicado por [18] donde implementan algoritmos exactos de ramificación para obtener la solución óptima el cual permitió mejorar en 30% de los casos analizados. Por otro lado, en [19] implementaron la posibilidad de que la flota pueda ser asignada a múltiples rutas, la primera considerando recolección y un método de barrido para generar las rutas para un conjunto de datos pequeños, y algoritmos de búsqueda de vecindad variable a dos niveles y de entornos descendientes para manejar gran cantidad de clientes.

5.2 ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN PARA PROBLEMAS DE RUTEO CON BACKHAUL

Diversos autores han estudiado problemas de asignación de rutas de entrega y recolección (VRPB). En [20] implementaron la programación multiobjetivo difusa para reducir la distancia y maximizar el valor de ahorro total a través de la agrupación de clientes, el encaminamiento de cada vehículo y la búsqueda local, mientras que [21] tomando la característica adicional de la carga tridimensional aplicaron 2 heurísticas, la búsqueda adaptativa de vecindario y la búsqueda de vecindad variable, los cuales generaron mejores resultados en la asignación de rutas.

El sistema de colonias de hormigas múltiples también ha contribuido a resolver problemas de ruteo para entrega y recolección, abarcando soluciones a partir de información feromona y la búsqueda local multi-ruta como se observa en [22]. Por último y para esta variante al VRP con recolección se han considerado heurísticas generadas por métodos de inserción de conjunto, el cual es aplicado por [23] donde combinan las rutas, aplicando heurísticas constructivas y genera penalizaciones para favorecer la asignación de los backhauls al final de la ruta.

5.3 ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON BACKHAUL Y VENTANAS DE TIEMPO

En relación con la propuesta de investigación planteada que abarca tanto la recolección como las ventanas de tiempo se han desarrollado modelos híbridos, como lo es el caso de [24] donde implementan la programación entera mixta para minimizar los costos y recocido simulado como heurístico de inserción, obteniendo mejores resultados en comparación con los algoritmos genéticos. Otra propuesta con base en heurísticas de inserción es abarcada por [25] para la solución inicial, además de dos heurísticas de intercambio, generando soluciones dentro del 2,5% del promedio de las óptimas. En [5], presentan un algoritmo de barrido adaptado para generar una solución factible inicial y una búsqueda local guiada es utilizada, en el cual logran disminuir el número de rutas y las distancias recorridas.

Otras características han sido estudiadas para complementar el VRPBTW como la flota heterogénea por [26] donde utilizan la programación lineal y el algoritmo de optimización de colonia de hormigas. En [27] para backhauls con recolección mixta emplean una metaheurística GRAMPS para la solución clásica y posteriormente a través de herramientas interactivas guían al usuario a insertar un cliente Backhaul frente a uno Linehaul. Para múltiples rutas, en [28] desarrollan una metodología haciendo uso de un algoritmo de agrupamiento para realizar la ramificación y la programación lineal entera mixta del enrutamiento, sin embargo, fueron probados con casos pequeños debido a las complicaciones de optimización para gran cantidad de datos.

En [29] implementan un enfoque de evolución diferencial para solucionar el problema de ruteo que se encarga del cruce, mutación y selección, el cual logró mejorar el ruteo existente. Para el mismo problema, en [30] proponen en una primera publicación la programación lineal entera y un algoritmo de optimización de colonia de hormigas, posteriormente [26] solucionan un nuevo caso a través de la optimización por enjambre de partículas con búsqueda local logrando mejorar sus resultados con respecto a otras herramientas. En [31] utilizan el problema de biogeografía mediante la integración de un algoritmo de recocido simulado para cada iteración.

Referente a las metodologías de solución y como se ha mencionado con anterioridad, diversos autores como [32] han implementado metodologías exactas de programación lineal entera mixta, donde en un caso aplicado al sector alimenticio a través de

procedimientos de agrupamiento logran una solución próxima a la óptima. En [32], por el contrario, hace uso de diferentes heurísticas para abarcar el problema de ruteo con ventanas de tiempo donde se estudian la heurística de ahorro, del vecino más cercano orientado en el tiempo, de inserción y barrido orientada en el tiempo, obteniéndose como resultado que el híbrido de las dos últimas mencionadas podrían generar excelentes soluciones en poco tiempo.

En [16] han considerado metaheurístico híbrido de recocido simulado y búsqueda tabú, trabajando cada modelo y luego combinándolos para llegar a una tercera solución donde se observa mejores soluciones en 34 de los 45 casos analizados. [32], desarrolla un nuevo método de búsqueda tabú, el cual a través de soluciones iniciales y relajación de Lagrange se proporciona la información para el algoritmo permitiendo mejorar o igualar el método tradicional de búsqueda. En este sentido, un metaheurístico intenta mejorar las heurísticas simples mediante la relajación de la restricción de tiempo de cálculo, por lo que requiere más tiempo para dar soluciones de calidad y puede llegar a tornarse más complejo [22].

6. PROCESO METODOLÓGICO

6.1 CARACTERIZACIÓN

A continuación, se contextualiza la organización y el proceso de ruteo para el problema de enrutamiento de vehículos con backhauls y ventanas de tiempo. En este, se toma en cuenta los factores que intervienen y condicionan la solución del caso como lo son el producto, los clientes y las características propias del proceso actual de ruteo (vehículos, planeación, programación y asignación de rutas).

6.1.1 Características del producto a transportar

La organización se ha dedicado a la producción y la comercialización de productos lácteos, más específicamente la distribución de bolsas de leche de 1000ml, los cuales son transportados y entregados a los clientes en canastillas de (39x28x25) cm, estas canastas son entregados a los clientes, las cuales posteriormente serán recolectadas una vez finalizada la distribución de los productos, en el proceso de retorno de la ruta.

6.1.2 Información de los clientes

La empresa ubicada en la ciudad de Tuluá se encarga de atender 100 clientes diariamente en la ciudad de Cali. De cada cliente se tiene conocimiento de la demanda requerida por cada uno. **Anexo 1.**

6.1.3 Características del proceso de ruteo

En el proceso de ruteo, la asignación a cada vehículo se realiza con base en un listado ordenado alfabéticamente. A cada transportista le es asignado una cantidad de clientes tomando sólo como restricción que no sobrepasen la capacidad de cada camión. Posterior a la asignación, el encargado de cada ruta carga en el vehículo cada demanda a servir de acuerdo con su experiencia y la información que presenta la orden de cargue, decidiendo empíricamente a qué cliente servir primero.

Se inicia el recorrido desde la ciudad de **Tuluá** donde se ubica la organización. Sin embargo, dado que es el mismo recorrido para los 4 vehículos en el trayecto Tuluá-Cali, se tomará como punto de partida la entrada a **Cali (Punto 0)** iniciando el proceso de distribución a las 8:00 am en la ciudad. De igual manera en el proceso de ruteo toma en cuenta las ventanas de inicio y cierre en las que pueden ser visitados cada uno de los clientes Linehauls, para lo cual se considera el tiempo 0 como la hora de inicio de la distribución a partir de las 8:00 am. Desde este punto se toma cada unidad de tiempo como un minuto después de iniciada la distribución, para mayor detalle las restricciones por ventanas de tiempo para entrega se presentan en el **Anexo 2.**

La compañía cuenta con 100 clientes, localizados en distintas zonas de Cali. Con base en estas ubicaciones los transportistas desempeñan su labor de determinar la forma de distribuir los pedidos, de acuerdo con su juicio en el proceso de entrega. Durante este proceso de distribución el proceso de descargue de canastillas y atención al cliente tiene una duración de 10 minutos en promedio por cada cliente.

Una vez terminada la entrega a todos los clientes de la ruta se hace el recorrido para recolectar los RTIs (canastillas) determinando el orden de recaudación de forma empírica igualmente.

Con este método actual de ruteo, no se toman en cuenta factores como las distancias recorridas, la posición de los clientes, ni el momento en el día en el cual cada cliente puede recibir su pedido.

Para dar solución al caso de estudio se conoce la ubicación geográfica, presentada en el **Anexo 2**, las ventanas de tiempo establecidas para la atención de cada cliente y se presentan las coordenadas asociada a cada uno de los nodos en el **Anexo 3**.

6.1.4 Características de la flota de vehículos

Para llevar a cabo el proceso de ruteo la empresa cuenta con 4 vehículos para realizar las diferentes rutas a la ciudad de Cali. Cada vehículo presenta las mismas características con capacidad para transportar 368 canastillas equivalentes a 6 toneladas que corresponden al peso que legalmente pueden llevar (Ver Tabla 1). En cada camión se movilizan dos trabajadores de la empresa.

Se trabaja bajo el supuesto de que la velocidad promedio en la que se transporta cada vehículo en la ciudad es de 60 Km/h.

Con los cuatro camiones es posible garantizar el cumplimiento de la demanda total de 100 clientes que no sobrepasen la demanda respecto a la capacidad anteriormente mencionada.

Tabla 1 Características del medio de transporte

Cantidad de camiones	• 4 camiones
Capacidad de camión	• 368 canastas • 6 toneladas
Dimensiones del camión	• Largo: 4.5 m • Ancho: 2 m • Alto: 1.5 m

Con base a la información mencionada, se implementa el proceso metodológico para la asignación de rutas utilizando en primera instancia el método de ahorros para generar la

solución inicial de clústeres. Una vez se tenga este resultado se podrá implementar la segunda fase que consiste en implementar un modelo matemático que determine la secuencia en la que se visitaran los clientes.

6.2 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para la solución del problema anteriormente planteado, se implementa la estrategia “Asignar ahora y determinar la secuencia de ruteo después”. Para lograrlo, se toma como base el trabajo presentado por Clarke & Wright [33] para la asignación de los clientes a las rutas implementando el método de ahorros, estableciendo los grupos de clientes para cada ruta (clústeres). En la primera fase, se convierten las coordenadas a distancias en el plano cartesiano y a través del método de ahorros se procede a realizar la asignación de los clientes en cada ruta. Finalmente, para asignar la secuencia de ruteo se toma como referencia el modelo propuesto por Cordeau [13] adaptándolo al modelo TSP con ventanas de tiempo para entregas y recogidas.

6.2.1 Cálculo de distancias

Para determinar las distancias entre nodos se utilizaron las direcciones de los 100 clientes de un día cotidiano a servir, conociendo también la demanda de cada uno y su respectiva ventana de tiempo.

Con estos datos, se procedió a convertir las direcciones a coordenadas de latitud y longitud mediante la aplicación de la página web coordenadas GPS y a su vez a coordenadas UTM utilizando una calculadora geodésica de coordenadas, siendo insumo para determinar las distancias entre clientes y graficar su ubicación. Adicional, se implementaron resultados obtenidos en Google Maps y Google Earth para determinar las distancias reales y las distancias rectilíneas respectivamente, que fueron consideradas para el cálculo del factor de circuito del caso de estudio.

El factor de circuito mencionado se encarga de convertir u aproximar la distancia rectilínea o euclidiana en distancias reales. Este factor se comporta como un término de proporcionalidad al incluirlo en el modelo, permitiendo convertir distancias en línea recta a distancias reales kilómetros aproximados, el cual varía según la ubicación.

En la literatura existen factores de circuitos recomendados para algunas ubicaciones, sin embargo, para determinar un factor de circuito más preciso en una región en particular se toma una muestra de las distancias entre los puntos seleccionados y se promedia la razón de las distancias reales a las calculadas.

Tomando en cuenta esto, se ubicó en un plano cartesiano las distancias reales respecto a las distancias rectilíneas formando un diagrama de dispersión. Con los puntos ubicados

se determina la ecuación de la recta donde la pendiente es el factor de circuito para el caso de estudio.

Realizando lo descrito anteriormente, el factor de circuito resultante fue de 1,33 que significa un incremento del 33% de las distancias que serán implementadas en el caso de estudio. En el Gráfico 3, se presenta el diagrama de dispersión implementado para el calculo del factor de circuito.

Para el cálculo de las distancias entre los puntos se consideró la implementación de la formula basada en la ley esférica de los cosenos debido al contexto de la codificación utilizada en Excel, siendo una alternativa razonable para el desarrollo de la solución [13].

$$d = 6371 * \text{acos}((\sin la1) * (\sin la2) * \cos(lo1 - lo2) + (\cos la1) * (\cos la2)) * 1,33 \quad (1)$$

En esta ecuación se requiere la información de latitud y longitud de dos puntos en radianes y del radio de la tierra para su cálculo que es de 6371 km. Además, se toma en cuenta el factor de circuito para realizar el ajuste al resultado.

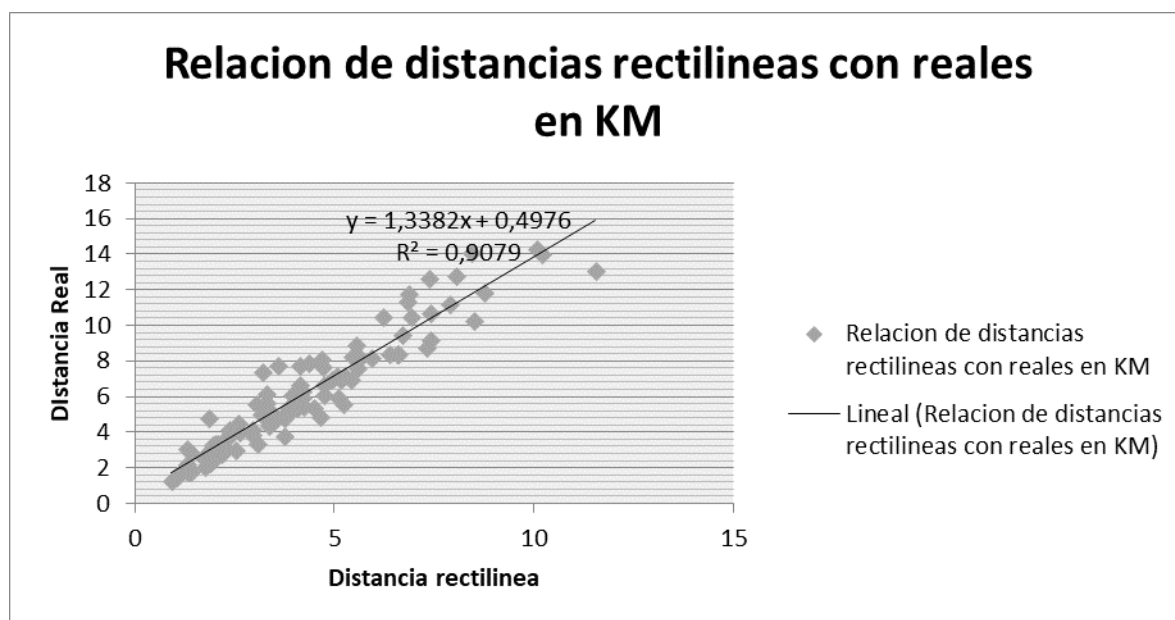


Gráfico 3 Calculo del factor de circuito

Fuente: Elaboración propia.

A manera de ejemplo, se presenta el cálculo de la distancia entre el depósito y el cliente 1. Este mismo procedimiento se realiza en todas las posibles combinaciones de clientes en la matriz (Ver Tabla 2).

Tabla 2 Cálculo de distancia mediante la ley esférica de los cosenos. Ejemplo.

N	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
0	3,493727	-76,509056
1	3,423146	-76,538224

Fuente: Elaboración propia.

$$d = 6371 * \text{acos}((\sin 3,4937) * (\sin 3,4231) * \cos(-75,5091 + 76,5382) + (\cos 3,4937) * (\cos 3,4231)) * 1,33 = 11,29 \text{ km}$$

6.2.2 Asignación de clientes a rutas

Mediante las distancias encontradas con la ecuación de la ley esférica de los cosenos se procedió a implementar el método de ahorros para asignar las rutas.

El método de ahorros se encarga de buscar que el par de puntos (nodos o clientes) con mayor “ahorro” se unan a una misma ruta. En este sentido, se espera que los puntos comunes a una ruta se encuentren validados por la proximidad entre ellos, siempre que no exceda la capacidad del camión.

Para lograrlo, se implementa la ecuación 2 que define el ahorro posible entre la ubicación de dos puntos y el punto de partida (deposito). La ecuación toma las distancias de cada ubicación desde el centro de distribución restándole la distancia entre los dos puntos.

$$\text{Ahorro} = d_{i0} + d_{j0} - d_{ij} \quad (2)$$

A modo de ilustración, en la Tabla 3, si se toman los resultados obtenidos en la matriz de distancia con la ley esférica de los cosenos, se procede a calcular el ahorro entre el cliente 1 y 2 de la siguiente forma:

Tabla 3 Ejemplo de cálculo de ahorro entre dos nodos

MATRIZ DE DISTANCIAS			0	1	2
			3,49	3,48	3,47
			-76,51	-76,52	-76,53
0	3,49	-76,51	0,00	2,57	4,79
1	3,48	-76,52	2,57	0,00	2,27
2	3,47	-76,53	4,79	2,27	0,00
3	3,42	-76,48	12,34	11,69	10,95

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la matriz

$$d_{10} = 2,57 \quad d_{20} = 4,79 \quad d_{12} = 2,27$$

Aplicación de la ecuación de ahorro

$$\text{Ahorro} = 2,57 + 4,79 - 2,27 = 5,08 \text{ km}$$

Dado que se cuenta con cuatro camiones, se dispone a armar cuatro rutas implementando la matriz de ahorros que relaciona dos puntos con respecto al origen, determinando en distancia el ahorro posible en cada combinación. Los resultados de la matriz de distancias se encuentran en el **Anexo 4**.

El máximo ahorro entre dos puntos obtenido en la matriz lleva a dos clientes a ser parte de una misma ruta, y los clientes que relacionados directamente a ellos logren obtener máximos ahorros van formando parte ella. Este procedimiento se evalúa entre dos nodos hasta que se llegue al límite de la capacidad de la ruta o tengan mayor proporción de ahorro con otro grupo de clientes creando una nueva asignación a otro vehículo.

A modo de ejemplo, los primeros clientes asociados a la ruta 1 se definieron buscando el máximo de los resultados presentados en la matriz como se presenta a continuación.

Tabla 4 Ejemplo asignación de clientes a rutas por el método de ahorros

33,91	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
41	10,62											
42	15,09	10,50										
43	15,71	10,54	15,40									
44	15,94	10,56	15,38	16,00								
45	18,14	10,39	15,33	15,82	16,00							
46	14,31	9,75	13,95	14,10	14,14	16,29						
47	16,08	9,77	14,41	14,74	14,85	19,73	16,63					
48	11,10	8,18	11,15	11,18	11,18	13,14	13,38	14,32				
49	17,23	10,26	13,61	14,14	14,34	15,63	12,29	13,61	9,32			
50	17,50	10,28	13,73	14,27	14,47	15,92	12,45	13,85	9,44	19,17		
51	19,67	10,61	15,41	16,00	16,21	21,66	15,87	20,11	12,77	18,23	18,65	
52	5,41	5,37	5,27	5,30	5,31	5,18	4,88	4,83	4,20	5,45	5,45	5,37
53	19,67	10,61	15,41	16,00	16,21	21,68	15,89	20,17	12,80	18,23	18,65	33,91

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se puede observar que los clientes 51 y 53 hacen parte de la primera ruta a asignar pues aplicando la fórmula 2 logran obtener el mayor ahorro de toda la matriz, lo que significa que se encuentran en ubicaciones aproximadas, generando un ahorro de 33,91 con respecto al depósito.

Si se elimina este valor de la matriz, se podrá seguir buscando los máximos ahorros luego de este que permita seguir uniendo más clientes a la ruta. En este caso, el tercer cliente integrante de la ruta 1 es el cliente 86, ya que se relaciona con mayor ahorro de acuerdo

a la matriz de distancias entre nodos con el 53, dando como resultado un ahorro de 33,01 km (Ver Tabla 5).

Tabla 5 Continuación ejemplo de asignación de rutas implementando método de ahorros

33,01	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
84	19,32	10,45	14,67	15,29	15,52	19,55	14,21	17,33	10,92	19,16	19,59	28,59	5,46	28,71
85	7,97	6,34	8,25	8,23	8,21	9,59	9,95	10,69	11,25	6,56	6,64	9,19	3,42	9,22
86	19,66	10,61	15,41	16,00	16,22	21,67	15,88	20,10	12,78	18,17	18,58	33,00	5,36	33,01

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 Modelación matemática para el TSPBTW

Determinada la asignación de los clientes en cada ruta, se planteó un modelo matemático que representa el problema TSP para la entrega con ventanas de tiempo (TW) y la recogida de Backhaul de los RTIs. El modelo base utilizado para la resolver el problema se plantea por Cordeau en [13] en el cual se presentan varios escenarios y variantes al problema de ruteo.

El objetivo del modelo consiste en minimizar las distancias recorridas entre los clientes, cumpliendo las restricciones duras de TW generando la hora en la que se debe atender a cada cliente que a su vez me determina el orden de servicio.

El punto de partida de los vehículos para iniciar el ruteo esta dado en el depósito y el servicio se realizará con la atención de los clientes linehails y posteriormente los backhails.

6.2.3.1 Modelo propuesto TSPBTW

- **Conjuntos**

Los conjuntos implementados en el TSPBTW se presentan a continuación.

NODOS: Comprende todos los clientes a visitar en el ruteo incluido con el depósito. Se indexa por i, j donde $i \neq j$.

ARCOS: Comprende todos las conexiones entre nodos a visitar en el ruteo incluido el depósito. Se indexa por i, j donde $i \neq j$.

CLIENTES: Incluye los puntos a los cuales debe hacerse entrega y recolección, sin incluir el depósito.

NODOSL: Subconjunto de nodos que no incluye los clientes Backhaul.

NODOSB: Subconjunto de nodos que no incluye clientes Linehaul.

CLIENTESL: Subconjunto de nodos que no incluye clientes Backhaul ni el depósito.

CLIENTESB: Subconjunto de nodos que no incluye clientes Linehaul ni el depósito.

- **Parámetros**

A continuación, se presentan los parámetros asociados al modelo planteado.

C_{ij} = Costo de transporte del nodo i al nodo j

s_i = Tiempo duración de servicio para cada cliente i

T_{ij} = Tiempo de viaje del nodo i al nodo j

a_i = Hora de inicio de la ventana de tiempo (en minutos) con respecto a las 8:00 am para el cliente i

b_i = Hora de cierre de la ventana de tiempo (en minutos) con respecto a las 8:00 am para el nodo i

M = Número positivo muy grande

- **Variables de decisión**

Para el problema se plantean dos variables de decisión:

X_{ij} = Variable binaria igual a 1 si en la solución se realiza el recorrido desde i hasta j o cero (0) de lo contrario

w_i = Hora de inicio del servicio (en minutos) en el nodo i .

- **Función objetivo**

$$\sum_{i,j \in \text{ARCOS}} C_{ij} * X_{ij} \quad (3)$$

Sujeto a

Restricciones de transporte

$$\sum_{j \in \text{NODOSL}} X_{ij} = 1 \quad \forall j \neq i \quad j \in \text{CLIENTESL} \quad (4) \text{ Restricción 1}$$

$$\sum_{i \in \text{CLIENTES}} X_{ij} = 1 \quad \forall j \neq i \quad j \in \text{CLIENTESB} \quad (5) \text{ Restricción 2}$$

$$\sum_{j \in \text{NODOS}} X_{ij} = 1 \quad \forall j \neq 0, i \quad i \in \text{CLIENTESL} \quad (6) \text{ Restricción 3}$$

$$\sum_{j \in \text{NODOSB}} X_{ij} = 1 \quad \forall j \neq i, \quad i \in \text{CLIENTESB} \quad (7) \text{ Restricción 4}$$

$$\sum_{j \in \text{CLIENTESL}} X_{0j} = 1 \quad \forall j > 0 \quad (8) \text{ Restricción 5}$$

$$\sum_{i \in \text{CLIENTESB}} X_{i0} = 1 \quad \forall i > 0 \quad (9) \text{ Restricción 6}$$

Restricciones de ventanas de tiempo

$$w_i + s_i + T_{ij} - M * (1 - X_{ij}) \leq w_j \quad \forall i, j \in \text{ARCOS} \quad (10) \text{ Restricción 7}$$

$$w_i \geq a_j \quad \forall i \in \text{NODOS} \quad (11) \text{ Restricción 8}$$

$$w_i \leq b_i \quad \forall i \in \text{NODOS} \quad (12) \text{ Restricción 9}$$

$$w_i = 0 \quad i = 0 \quad (13) \text{ Restricción 10}$$

Las *restricciones 1 y 2* garantizan que la visita para una entrega y recolección respectivamente se realice sólo una vez ya sea desde otro cliente o el depósito, mientras que las *restricciones 3 y 4* aseguran la salida de un nodo luego de realizar dicha entrega o recolección desde un cliente o centro de distribución. Finalmente, en las restricciones de transporte, se presentan las *restricciones 5 y 6* que buscan la llegada o salida del depósito desde/hacia un solo cliente en la ruta.

La *restricción 7* garantiza el cumplimiento de la ventana de tiempo, donde el inicio de la ventana, el tiempo de servicio y el tiempo de llegada deben ser menor al tiempo de inicio del servicio del próximo cliente. Las *restricciones 8 y 9* aseguran que la hora de servicio se encuentre dentro de los límites de la ventana de tiempo. La *restricción 10* se asegura de que en cada ruta el depósito tenga una ventana de tiempo igual a 0 por lo que debe ser el punto de partida para las entregas a los clientes.

6.3 EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL MODELO PROPUESTO

En esta sección se presenta el desarrollo de la metodología propuesta ajustada a un caso de estudio, de una compañía que comercializa productos lácteos, inicialmente se presenta la información base del caso de estudio aplicado a las condiciones de la empresa, en una segunda instancia los resultados obtenidos mediante el modelo OTSPBTW el cual se realizó mediante lenguaje de Ampl y se solucionó con Solver Gurobi.

Para la evaluación del desempeño del modelo se presentan dos casos con variación en la demanda, en los cuales se mantiene la cantidad de clientes y las ventanas de tiempo, se varia la demanda, con el fin de modelar 2 escenarios y comparar el ahorro de distancias de cada uno frente a la metodología implementada por la compañía, por lo cual se lleva a cabo para cada uno de los escenarios la asignación por medio del método de ahorros y posteriormente la secuenciación mediante el modelo propuesto. Para lograr

aproximarnos a una solución a través del modelo se utilizaron diferentes estrategias para disminuir la capacidad computacional necesario de cada ruta.

Entre las estrategias implementadas se encuentra la unión de clientes que se encuentran geográficamente cercanos modificando la demanda y tiempo de servicio. La disminución de la cantidad de clientes permite reducir la complejidad del modelo y obtener de forma más rápida solución al problema.

Se tomaron en cuenta los clientes que se encuentran ubicados en direcciones próximas considerando que para atenderlos será poco el desplazamiento que realizará el vehículo. De esta forma, se logró reducir de 100 clientes a 80 clientes. En el **Anexo 1**, se encuentra la información asociada a la nueva distribución de clientes.

Cabe resaltar que, bajo las condiciones de cada una de las rutas para los 2 escenarios de demanda, el modelo TSPBTW, arrojó resultados para la ruta 1, 3 y 4 en ambos escenarios, no obstante, no fue posible solucionar la ruta 2 en ninguno de los casos, esto debido a la complejidad implícita de este tipo de problemas, como lo son el número de clientes y las ventanas de tiempo, para lo cual se establece una metodología alternativa con el fin de dar solución a esta ruta.

6.3.1 Desarrollo del modelo propuesto TSPBTW

Primer Escenario de Demanda

Para el primer escenario se manejó la demanda presentada en el **Anexo 1**. Con base a esta demanda y la formulación del método de ahorros se logran obtener las rutas como se presentan a continuación (Ver Tabla 6).

Tabla 6 Distribución de los clientes en cada ruta del primer escenario.

																								Total clientes	
Ruta 1	0	3	9	23	30	34	39	45	47	51	53	56	58	68	70	72	75	77	80	84	86		21		
Ruta 2	0	4	5	6	7	8	21	22	25	28	31	32	40	49	50	54	65	67	73	74			20		
Ruta 3	0	10	11	13	14	20	26	27	29	42	43	44	46	55	57	64	66	88					18		
Ruta 4	0	1	2	17	18	19	33	35	36	37	38	41	48	52	59	60	61	62	63	79	81	82	83	85	24

Fuente: Elaboración propia.

Con las rutas segmentadas se implementó el primer modelo TSPBTW. Dadas las condiciones del modelo cada cliente cuenta con dos nodos a visitar: el cliente Linehaul y el cliente Backhaul aumentando al doble el número de clientes mencionados.

Acorde a lo anterior se lograron los siguientes resultados para cada ruta. En estos resultados se observa que con el método completo la ruta número 2 no fue posible ser resuelta al exceder la capacidad computacional del modelo.

Tabla 7 Resultados obtenidos aplicando TSPBTW bajo escenario de demanda 1

Ruta 1	85,3
Ruta 2	Sin solución por capacidad computacional <pre> disclaimer: This information is provided without any express or implied warranty. In particular, there is no warranty of any kind concerning the fitness of this information for any particular purpose. ***** Job 6378335 has finished. File exists You are using the solver gurobi_ampl. %% YOUR COMMENTS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ruta 2 completa %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Executing AMPL. processing data. processing commands. Executing on prod-exec-5.neos-server.org Presolve eliminates 163 constraints and 59 variables. Adjusted problem: 1541 variables: 1502 binary variables 39 linear variables 1556 constraints, all linear; 6553 nonzeros 78 equality constraints 1478 inequality constraints 1 linear objective; 1429 nonzeros. Gurobi 7.5.1: Error: Your job was terminated because it exceeded the maximum allotted memory for a job. Please refer to the NEOS Server FAQ (https://neos-guide.org/content/FAQ) for more information regarding job termination conditions. </pre>
Ruta 3	42,6
Ruta 4	66,6

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos anteriormente se logran siguiendo la secuencia presentada a continuación. La solución propuesta por el modelo logra cumplir las ventanas de tiempo para los clientes Linehaul y eliminar los subtours para los clientes Backhaul.

- **Resultados Ruta 1**

La ruta 1 comprende un total de 20 clientes. La secuencia arrojada por el modelo que minimiza las distancias recorridas y que cumple con las ventanas de tiempo se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8 Secuencia asociada a la ruta 1 Escenario 1

TSPTWB	Linehaul	TW	0	60	73	83	106	120	139	150	174	186	207	218	228	240	270	400	413	424	473	462	439,1
		S	0	75	80	39	84	51	53	86	58	77	30	56	47	3	68	70	72	45	9	34	23
	Backhaul	S	23	80	39	84	53	51	86	58	70	3	68	47	56	30	72	77	45	9	75	34	0

Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente, los resultados de la secuenciación de las rutas se presentan a continuación (Ver Gráfico 4).

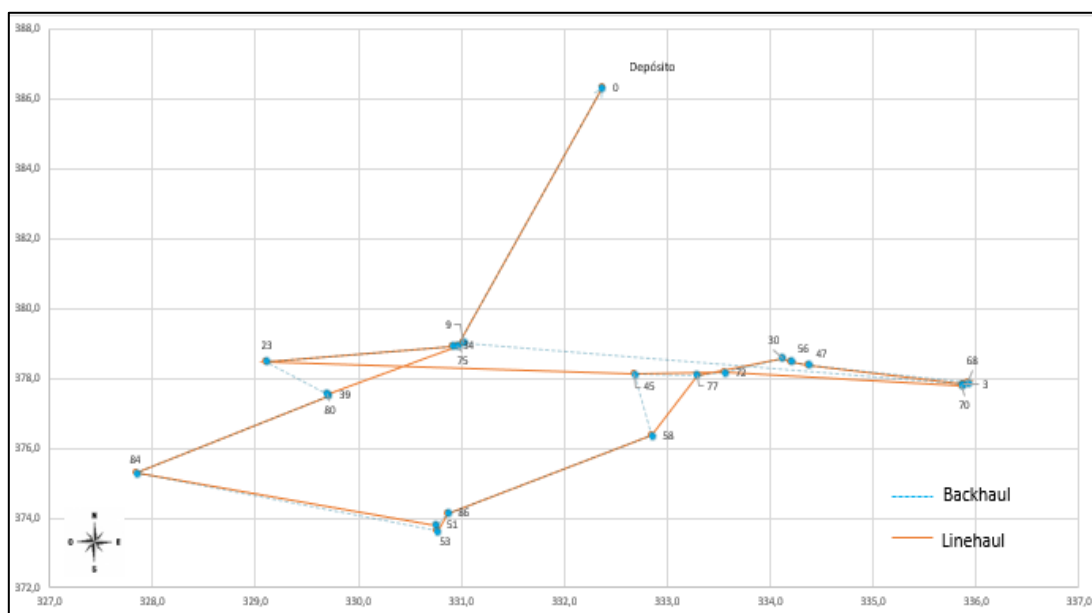


Gráfico 4 Secuencia Ruta 1 implementando modelo TSPBTW.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la capacidad computacional que se requiere para correr la ruta 2 no fue posible encontrar solución con esta metodología que lograra cumplir las restricciones asociadas a esta ruta.

• Resultados Ruta 3

A continuación se presenta en la Tabla 9, la secuenciación de la ruta 3 para el primer escenario. Esta ruta cuenta con 18 clientes.

Tabla 9 Secuencia asociada a la ruta 3 Escenario 1

TSPTWB		TW	0	15	39	120	151	162	173	185	196	206	216	226	236	248	258	289	300	311
		S	0	11	88	29	66	64	27	57	44	43	10	26	42	13	14	46	55	20
		S	20	55	46	14	13	42	26	43	10	44	57	27	64	66	29	88	11	0

Fuente: Elaboración propia.

De forma gráfica se observa que la secuencia de visita para los clientes Linehaul y Backhaul es la misma logrando el ahorro máximo de la ruta (Ver Gráfico 5).

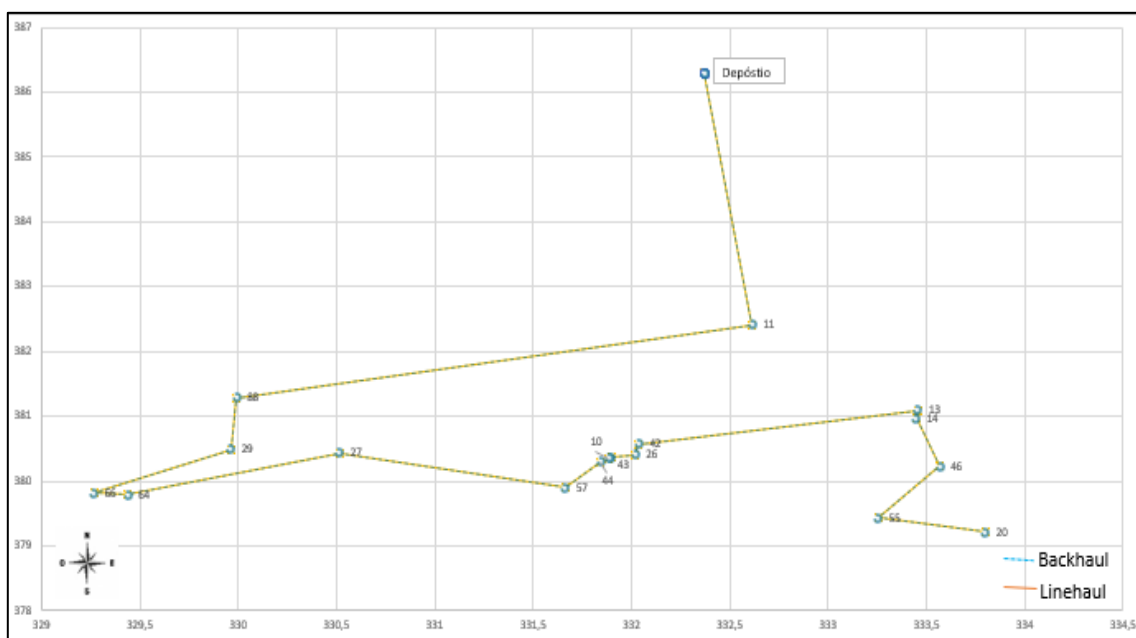


Gráfico 5 Secuencia Ruta 3 implementando modelo TSPBTW
Fuente: Elaboración propia.

• Resultados Ruta 4

La secuencia resultante para la ruta 4 presenta la siguiente secuencia. En este se atienden 24 clientes (ver Tabla 10).

Tabla 10 Secuencia asociada a la ruta 4 Escenario 1

TSPTWB	Linehaul	TW	0	2,7	15	40	53	63	75	88	109	120	156	166	176	187	199	210	330	346	358	370	381,1	391,8	402,1	416,7
		S	0	18	19	82	36	83	2	17	33	38	35	41	59	37	81	52	1	63	85	48	60	61	62	79
	Backhaul	S	79	17	33	2	1	52	83	36	81	41	38	35	59	37	62	61	60	48	85	63	19	18	82	0

Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico 6 se presenta el recorrido de entrega y recolección para la ruta 4 en el primer escenario de demanda.

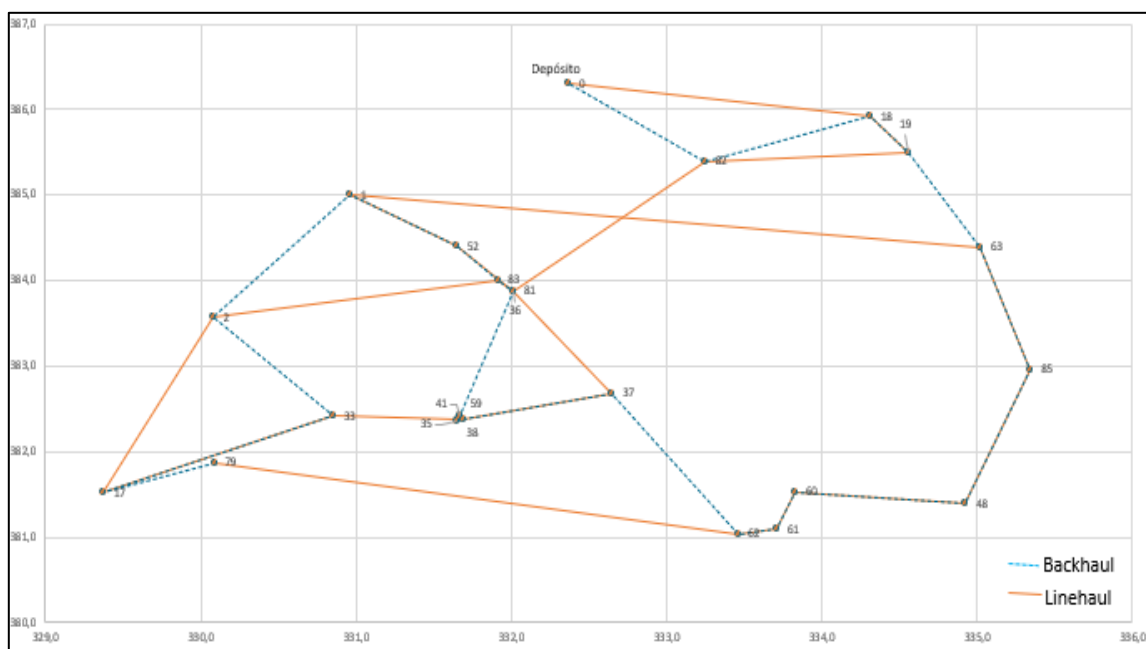


Gráfico 6 Secuencia Ruta 4 implementando modelo TSPBTW
Fuente: Elaboración propia.

Segundo Escenario de Demanda

Realizando la variación en la demanda el resultado de partida generado por el método de ahorros cambia condicionado a la capacidad de cada vehículo. Frente a esta situación, se obtienen la siguiente distribución (ver Tabla 11).

Tabla 11 Distribución de los clientes en cada ruta Escenario 2

																									Total clientes
Ruta 1	0	3	4	7	8	9	23	30	34	39	45	47	51	53	56	58	68	70	72	75	77	80	84	86	24
Ruta 2	0	5	6	10	21	22	25	26	27	28	29	31	32	40	42	43	44	49	50	54	57	64	65		23
Ruta 3	0	11	13	14	17	20	33	35	38	41	46	48	55	60	61	62	66	67	73	74	79	85	88		23
Ruta 4	0	1	2	18	19	36	37	52	59	63	81	82	83												13

Fuente: Elaboración propia.

Dada esta distribución, se obtienen los resultados por ruta como se observa en la . Sin embargo, se siguen presentando problemas con la ruta 2. Esto puede relacionarse a las características de la ruta considerando la cantidad de clientes y las ventanas de tiempo que se están manejando.

Para el segundo escenario, en el cual la ruta 2 no es posible solucionarse mediante este modelo, debido a la capacidad computacional limitada que ofrece Neos server. (Ver Tabla 12).

Tabla 12 Resultados obtenidos por ruta con el modelo TSPBTW

Ruta 1	81,3
Ruta 2	Sin solución por capacidad computacional
Ruta 3	60,4
Ruta 4	38,7

Fuente: Elaboración propia.

- Resultados Ruta 1**

Los datos asociados a la secuencia se presentan en la Tabla 13. Como se observa en los resultados.

Tabla 13 Secuencia asociada a la ruta 1, escenario 2.

TSPTWB	Linehaul	TW	0	50	60	70	83	105	120	139	150	174	186	207	218	228	240	270	400	413	424	435	457	467	479,9	504,5
		S	0	8	7	75	80	39	51	53	86	58	77	30	56	47	3	68	70	72	45	9	34	4	23	84
	Backhaul	S	84	53	51	86	58	70	3	68	47	56	30	72	77	45	9	7	8	4	75	34	39	80	23	0

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en él se presentan gráficamente los resultados de la ruta 1.

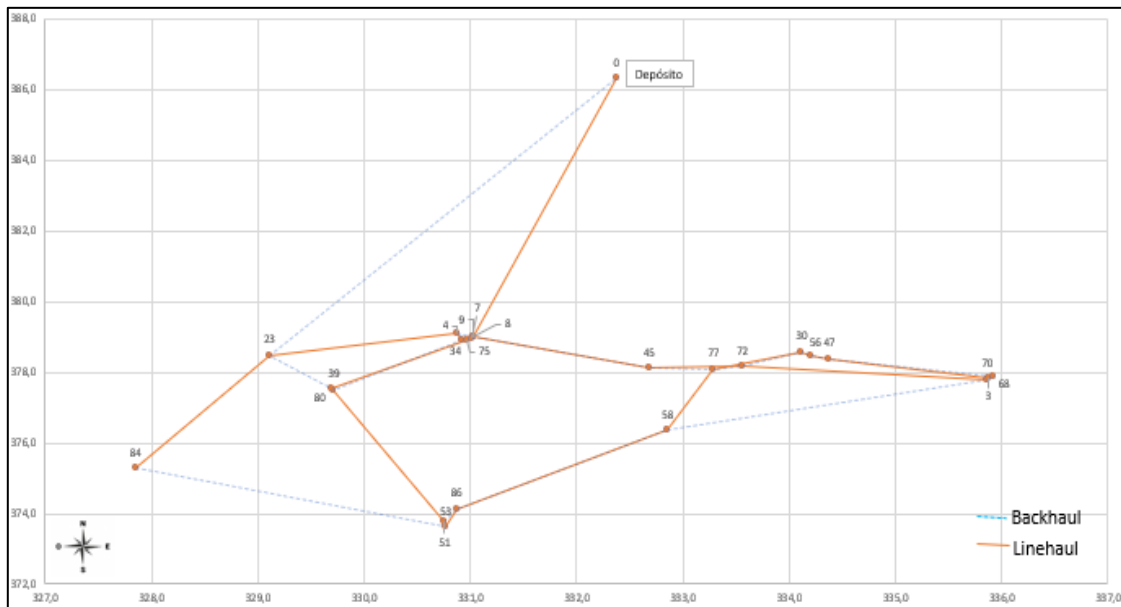


Gráfico 7 Secuencia Ruta 1 implementando modelo TSPBTW

Fuente: Elaboración propia.

En esta representación es fácil observar que las ventanas de tiempo condicionan la ruta Linehaul debido a que da prioridad al cumplimiento de la ventana de tiempo sobre la minimización de las distancias, caso contrario a lo que sucede con la ruta Backhaul.

De igual forma, para la segunda ruta no se logró obtener resultado bajo esta metodología.

• **Resultados Ruta 3**

En la ruta 3 se observa que logró disminuir la distancia recorrida el modelo TSPBTW en mayor proporción. A continuación, se presentan los resultados de secuenciación (Ver Tabla 14) y gráficamente las ubicaciones de los diferentes nodos que conforman la ruta en el Gráfico 8.

Tabla 14 Secuencia asociada a la ruta 3, escenario 2.

TSPTWB	Linehaul	TW	0	15	36	120	155	166	180	200	213	223	235	246	390	405	416	427	438	449	461	491	501	513	525,4
		S	0	11	38	35	41	33	74	73	67	66	17	88	79	60	61	46	20	55	14	62	13	48	85
		Backhaul	S	85	48	60	61	13	62	14	46	20	55	74	73	67	66	17	88	79	33	35	38	41	11

Fuente: Elaboración propia.

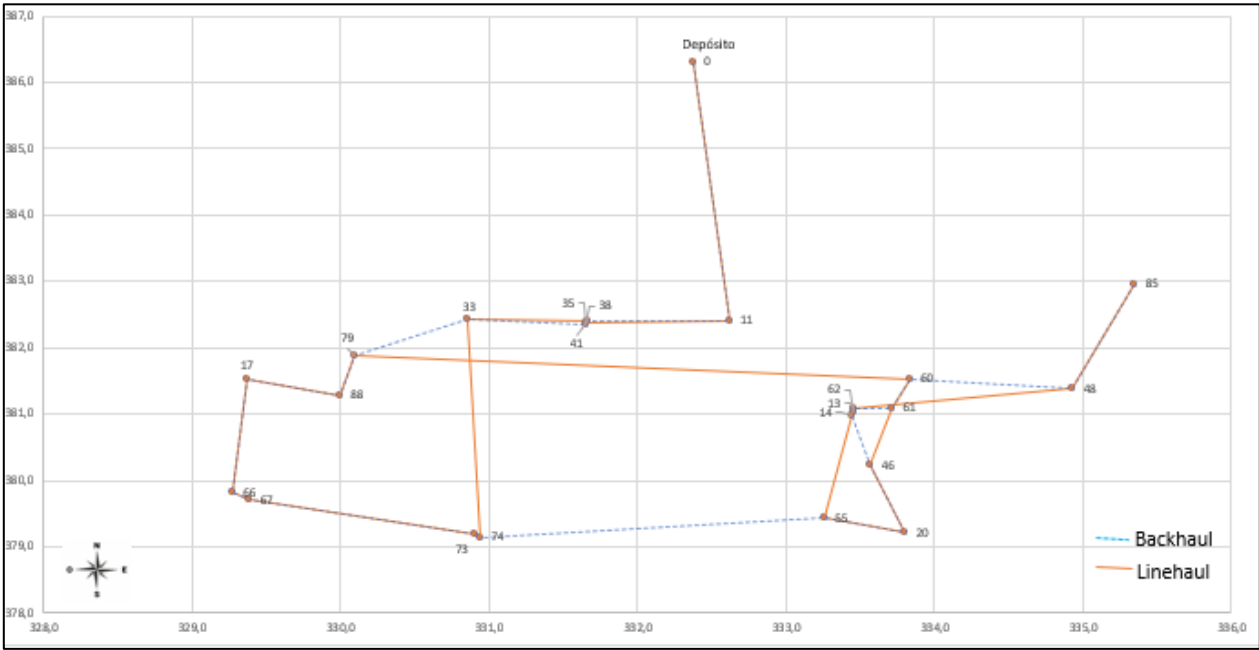


Gráfico 8 Secuencia Ruta 3 implementando modelo TSPBTW

Fuente: Elaboración propia.

• **Resultados Ruta 4**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la ruta 4 en el segundo escenario (Ver Tabla 15).

Como se observa en la secuencia, la ruta 4 de recolección es igual para los dos modelos implementados.

Tabla 15 Secuencia asociada a la ruta 4, escenario 2

TSPTWB	Linehaul	TW	0	50	60	73	84	98	109	120	132	195	210	330	342
		S	0	83	36	59	37	63	19	18	82	81	52	1	2
	Backhaul	S	2	1	52	83	81	36	59	37	63	19	18	82	0

Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente, el resultado obtenido para la ruta 4 se presenta en el Gráfico 9.

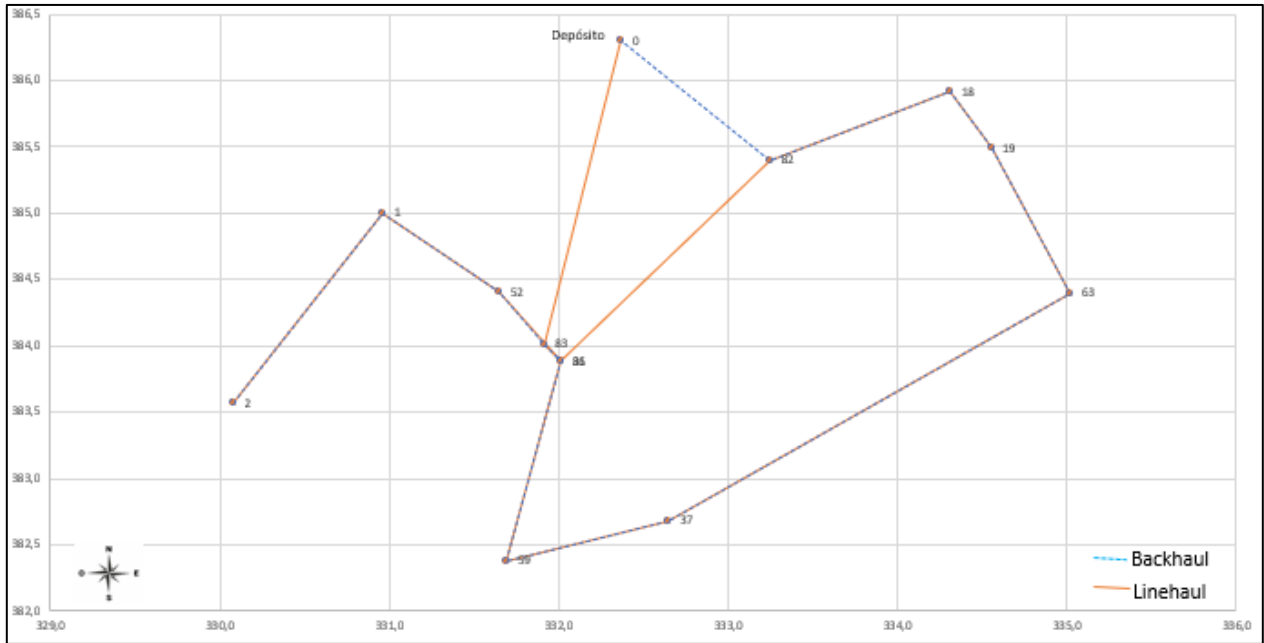


Gráfico 9 Secuencia Ruta 4 implementando modelo TSPBTW

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Alternativa al modelo propuesto TSPBTW

Dada la complejidad del problema por la capacidad que se requiere para dar solución a cada ruta (de aproximadamente 20 clientes cada una) se propone como alternativa el siguiente modelo que realiza las mismas funciones del descrito anteriormente.

Esta propuesta se caracteriza por dar solución al problema por partes, corriendo primero los clientes Linehaul y luego de obtener respuesta se corre el segundo modelo para los clientes Backhaul.

Se propone esperando dar solución a las rutas que no fue posible dar solución con la metodología anteriormente implementada.

A continuación, se presentan las condiciones en las que corre cada parte del modelo.

- **Modelo propuesto para clientes Linehaul**

Los conjuntos que se manejan pasan a ser solo tres: el conjunto de NODOS, ARCOS y CLIENTES. Los parámetros, variables de decisión y función objetivo son iguales al modelo anterior.

Para las restricciones relacionadas con el transporte sólo se implementan la restricción (1) (realizar la entrega solo una vez), (3) (salir del nodo por única vez) y (5) (salida del depósito por una sola vez) que corresponden a los clientes Linehaul, mientras que las restricciones de ventanas de tiempo no se modifican para cada cliente.

- **Modelo propuesto para clientes Backhaul**

Los conjuntos que se manejan pasan a ser solo tres: el conjunto de NODOS, ARCOS y CLIENTES. Se eliminan los parámetros asociado al tiempo, dado que los clientes Backhaul no manejan ventanas de tiempo.

En las variables de decisión se agrega una nueva variable “u” que muestra el orden en el que se realizará la recolección de las canastillas.

u_i = Variable de ordinalidad que muestra el orden en que se visitan los clientes por cada ruta, se utiliza para eliminar los subtours.

La función objetivo se mantiene igual que en los modelos mencionados anteriormente. Referente a las restricciones. Se eliminan las restricciones asociadas a las ventanas de tiempo y se dejan las restricciones (1) (visita para recolección solo una vez), (3) (salida de un nodo por única vez en la ruta), (5) (salida del ultimo cliente Linehaul por única vez) y (6) (llegada al depósito por única vez).

Adicional a las restricciones mencionadas anteriormente se debe agregar la restricción asociada a la eliminación de subtours que se presentan a continuación colocar cita bibliográfica.

$$u_i + 1 \leq u_j + M(1 - X_{ij}) \quad \forall i, j \in ARCOS, i \geq 0, j \geq 1 \quad (14) \text{ Restricción 11}$$

De esta forma, se logra obtener el resultado a las rutas que por capacidad no puedan ser resueltas por el primer modelo presentado.

Los resultados obtenidos implementando esta metodología se presentan a continuación.

Primer Escenario de Demanda

Los clientes que se manejan en el primer escenario se mantienen igual a los implementados en la primera metodología (Ver Tabla 16).

Tabla 16 Distribución de los clientes en cada ruta del primer escenario

																								Total clientes	
Ruta 1	0	3	9	23	30	34	39	45	47	51	53	56	58	68	70	72	75	77	80	84	86	21			
Ruta 2	0	4	5	6	7	8	21	22	25	28	31	32	40	49	50	54	65	67	73	74		20			
Ruta 3	0	10	11	13	14	20	26	27	29	42	43	44	46	55	57	64	66	88				18			
Ruta 4	0	1	2	17	18	19	33	35	36	37	38	41	48	52	59	60	61	62	63	79	81	82	83	85	24

Fuente: Elaboración propia.

Con base en esta información, se corrió con el modelo por partes logrando validar los resultados entre las dos versiones. En primera instancia se corre el modelo TSPTW para los clientes Linehaul. Una vez se obtiene la solución, se toma el último cliente servido como condición inicial para el segundo modelo TSPB que determina las rutas de regreso para clientes Backhaul.

Acorde a lo anterior se lograron los siguientes resultados para cada ruta; en estos resultados se observa que con el método por partes es posible dar solución a la ruta número 2 ya que se disminuye la capacidad computacional del modelo. Adicional en el capítulo 7 se presenta la discusión de los resultados obtenidos, del método por partes.

Tabla 17 Resultados obtenidos aplicando TSPTW – TSPB bajo escenario de demanda 1

	Linehaul	Backhaul	Total/ruta
Ruta 1	42,1	37	79,1
Ruta 2	13,3	13,3	26,6
Ruta 3	21,3	21,3	42,6
Ruta 4	38,9	27,2	66,1
Total recorrido (km)			214,4

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos anteriormente (Ver Tabla 17) se logran siguiendo la secuencia presentada a continuación. La solución propuesta por la segunda metodología logra cumplir las ventanas de tiempo para los clientes Linehaul y eliminar los subtours para los clientes Backhaul.

- **Resultados Ruta 1**

Con la implementación de la segunda metodología se obtiene la siguiente secuencia para servir a los clientes de la ruta (Ver Tabla 18).

Tabla 18 Secuencia asociada a la ruta 1 Escenario 1

TSPTW/TSPB	Linehaul	TW	0	60	73	83	96	111	121	132	156	186	207	218	228	240	270	400	413	435	480	468	445,7
		S	0	75	80	39	84	51	53	86	58	77	30	56	47	3	68	70	72	45	23	34	9
	Backhaul	S	9	3	70	68	47	56	30	72	77	45	58	86	51	53	84	39	80	23	34	75	9

Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente, los resultados de la secuenciación de las rutas se presentan a continuación. En esta ruta, se observa en el Gráfico 10 el recorrido Linehaul el cumplimiento de las ventanas de tiempo. Para los clientes Backhaul, que se presenta en el Gráfico 11, dado que no tienen ventanas de tiempo asociadas se observa que se minimiza el costo relacionado a la distancia recorrida.

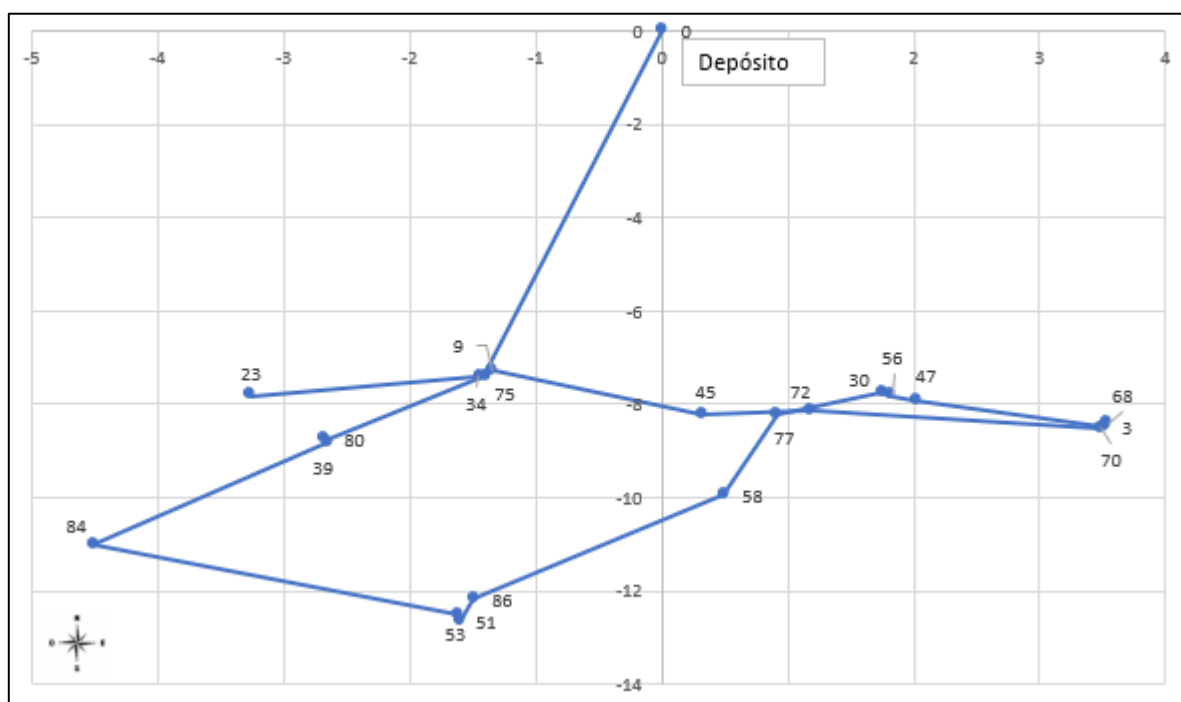


Gráfico 10 Clientes Linehaul Ruta 1
Fuente: Elaboración propia.

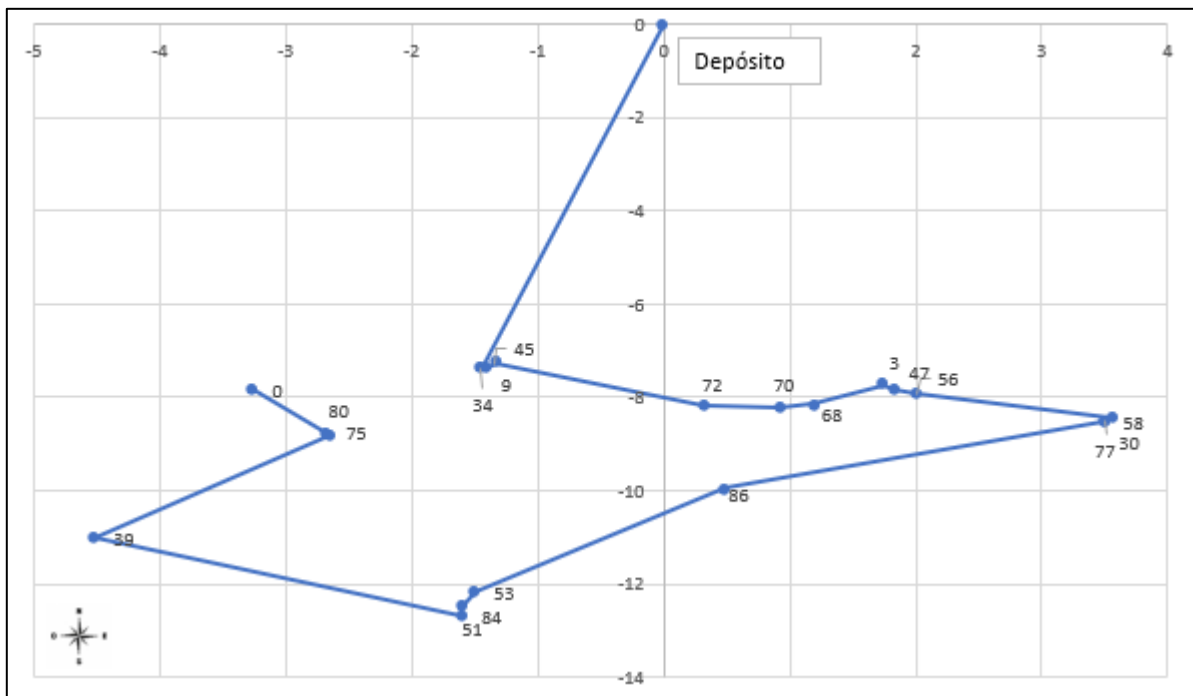


Gráfico 11 Clientes Backhaul Ruta 1
Fuente: Elaboración propia.

• Resultados Ruta 2

Dada la complejidad computacional requerida para modelar la ruta 2, solo se obtuvo por parte del modelo dividida solución para esta. A continuación se presentan los resultados obtenidos (Ver Tabla 19).

Tabla 19 Secuencia asociada a la ruta 2 Escenario 1

TSPTW/TSPB	Linehaul	TW	0	9,5	20	50	60	70	90	120	130	141	398	410	420	430	440	460	480	630	640	660
		S	0	6	32	8	7	74	31	73	5	40	4	25	28	49	65	54	21	67	50	22
	Backhaul	S	22	50	67	21	54	65	49	28	25	73	31	74	5	40	4	7	8	32	6	0

Fuente: Elaboración propia.

En este caso en particular, se puede observar que la secuencia realizada para entrega es igual a la óptima para la recolección de rutas. A continuación, se presenta gráficamente la ruta Linehaul (Ver Gráfico 12) y la ruta Backhaul (Ver Gráfico 13).

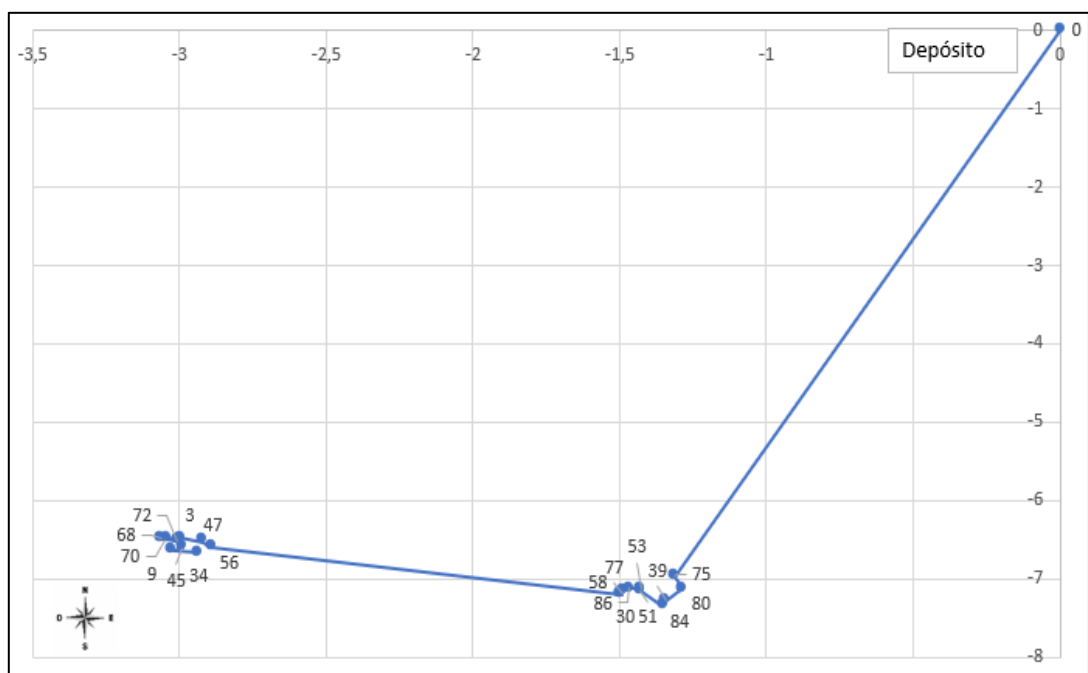


Gráfico 12 Clientes Linehaul Ruta 2
Fuente: Elaboración propia.

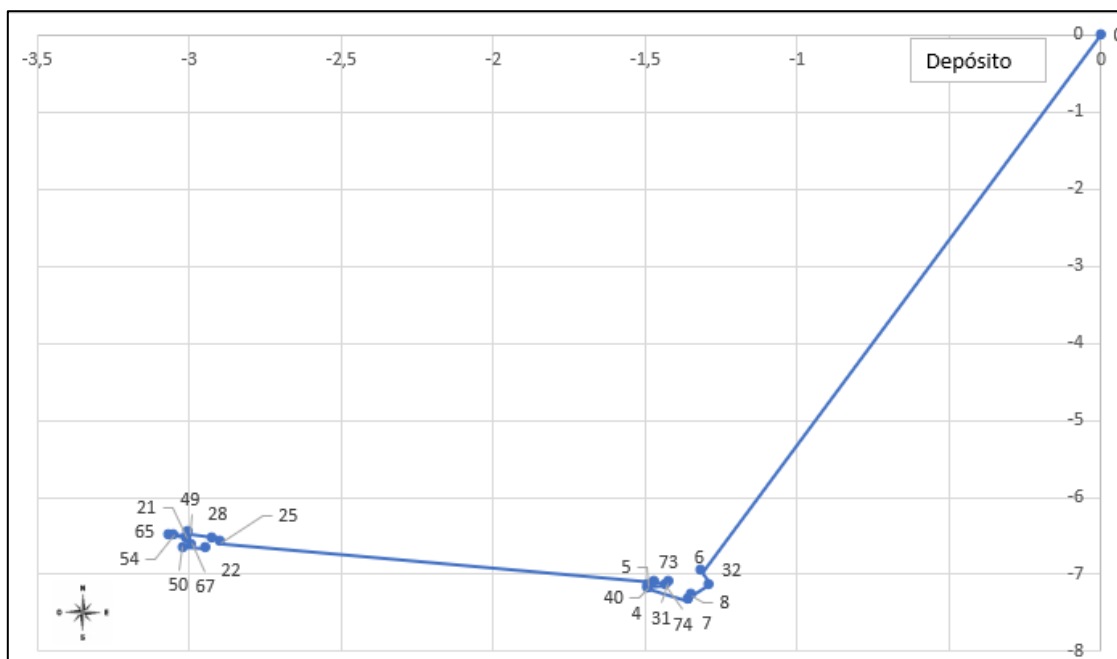


Gráfico 13 Clientes Backhaul Ruta 2
Fuente: Elaboración propia.

- **Resultados Ruta 3**

En esta ruta se observa que se obtienen resultados similares a la metodología TSPBTW, obteniendo el mismo costo por hacer el recorrido Linehaul-Backhaul (Ver Tabla 20).

Tabla 20 Secuencia asociada a la ruta 3 Escenario 1

TSPTW/TSPB	Linehaul	TW	0	65,1	89	120	151	162	173	185	196	210	220	230	241	253	263	294	305	440
		S	0	11	88	29	66	64	27	57	44	43	10	26	42	13	14	46	55	20
	Backhaul	S	20	55	46	14	13	42	26	43	10	44	57	27	64	66	29	88	11	0

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta los resultados de forma gráfica donde se observa que al igual que la ruta 2, la secuencia de visita para los clientes Linehaul (Ver Gráfico 14) y Backhaul (Ver Gráfico 15) son similares logrando el ahorro máximo de la ruta.

Los resultados obtenidos con el modelo por partes se presentan a continuación. En estos, se puede observar que las rutas para entrega y recolección son iguales, e incluso es similar a la proporcionada por el modelo TSPBTW.

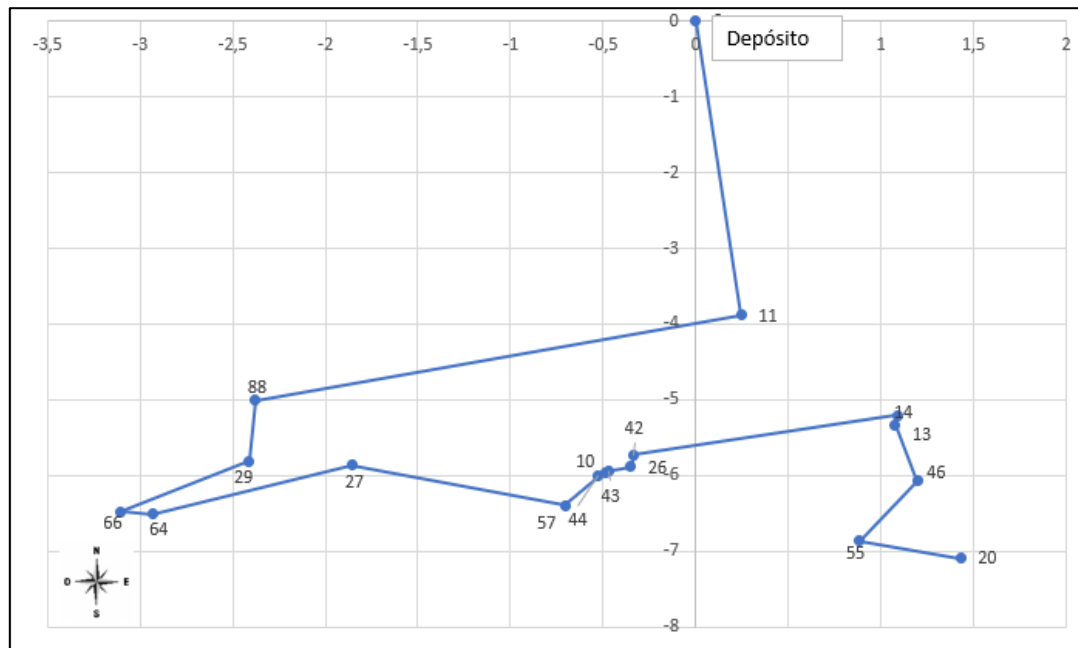


Gráfico 14 Clientes Linehaul Ruta 3

Fuente: Elaboración propia.

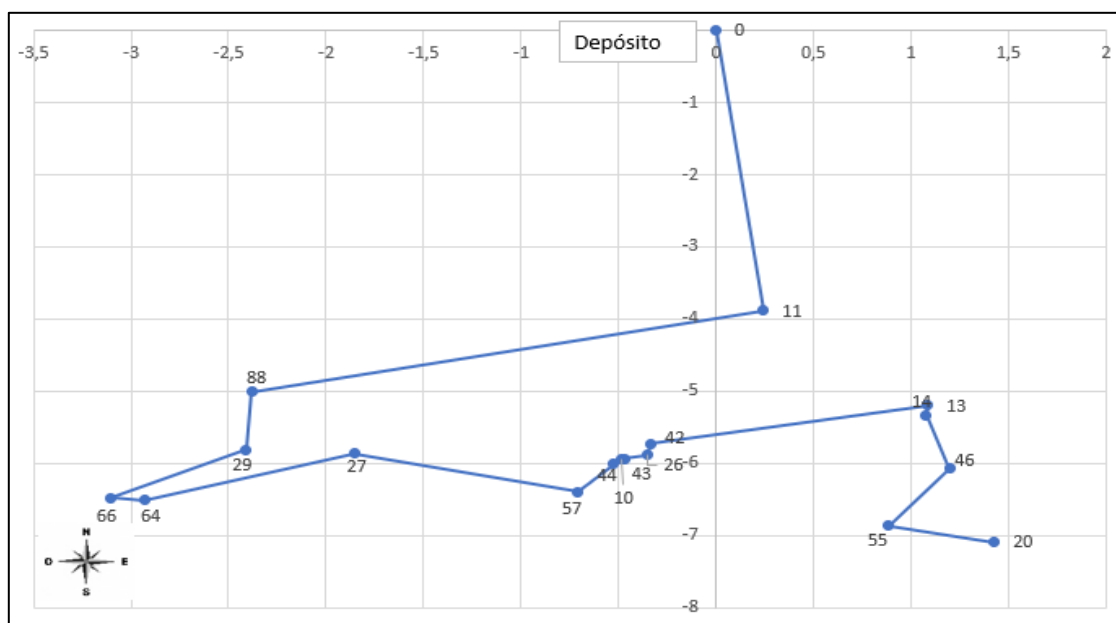


Gráfico 15 Clientes Backhaul Ruta 3
Fuente: Elaboración propia.

• Resultados Ruta 4

La secuencia resultante implementando la segunda metodología propuesta para la ruta 4 es similar en los dos modelos implementados.

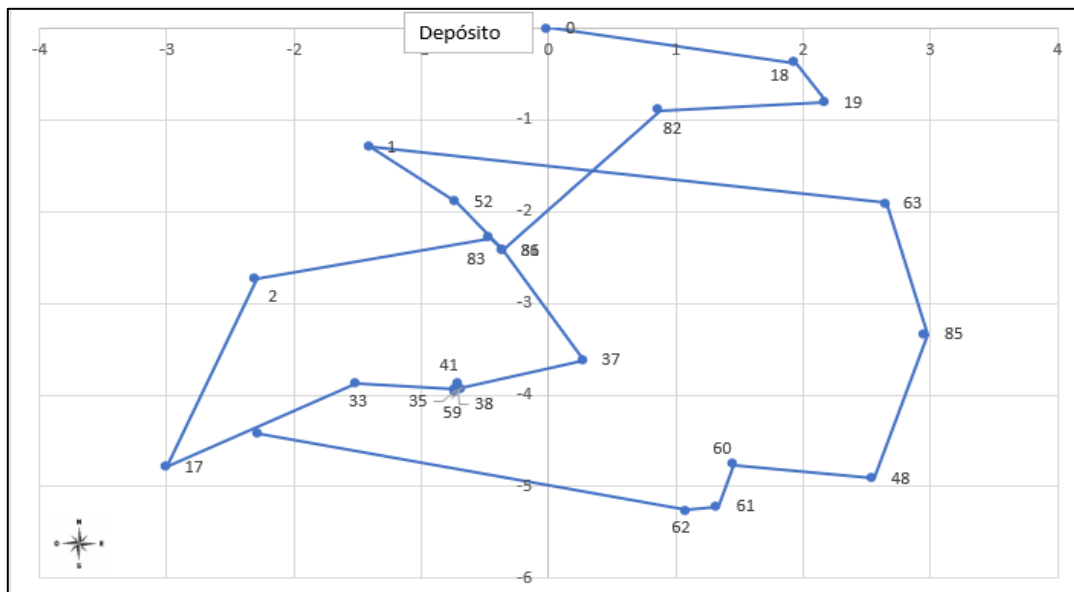
La secuencia para los 24 clientes que componen esta ruta se presenta a continuación. Se observa que en el primer modelo se adapta la ruta al cumplimiento de las ventanas de tiempo (Ver Tabla 21).

Tabla 21 Secuencia asociada a la ruta 4 Escenario 1

TSPTW/TSPB	Linehaul	TW	0	2,7	15	40	53	63	75	88	109	120	156	166	176	187	199	210	330	346	358	370	381,1	485	495,4	510
		S	0	18	19	82	36	83	2	17	33	38	35	41	59	37	81	52	1	63	85	48	60	61	62	79
	Backhaul	S	79	17	33	2	1	52	83	81	36	41	38	35	59	37	62	61	60	48	85	63	19	18	82	0

Fuente: Elaboración propia.

De forma gráfica, se presentan los resultados de la ruta 4 en el Gráfico 16 para los clientes Linehaul y en el Gráfico 17 para los clientes Backhaul.



Según los resultados obtenidos, la ruta Backhaul (recolección) mantiene la misma secuencia en los dos modelos.

Segundo Escenario de Demanda

Realizando la variación en la demanda el resultado de partida generado por el método de ahorros cambia condicionado a la capacidad de cada vehículo. Frente a esta situación,

se obtienen la siguiente distribución. De igual forma, se inicia con los resultados obtenidos de segmentación obtenidos con el método de ahorros (Ver Tabla 22).

Tabla 22 Distribución de los clientes en cada ruta Escenario 2

																										Total clientes
Ruta 1	0	3	4	7	8	9	23	30	34	39	45	47	51	53	56	58	68	70	72	75	77	80	84	86	24	
Ruta 2	0	5	6	10	21	22	25	26	27	28	29	31	32	40	42	43	44	49	50	54	57	64	65		23	
Ruta 3	0	11	13	14	17	20	33	35	38	41	46	48	55	60	61	62	66	67	73	74	79	85	88		23	
Ruta 4	0	1	2	18	19	36	37	52	59	63	81	82	83											13		

Fuente: Elaboración propia.

Con la implementación de esta metodología en el segundo escenario también fue posible dar solución a la ruta 2 disminuyendo la capacidad computacional requerida para este problema.

Posterior a la segmentación de los clientes, se obtienen las siguientes soluciones (Ver Tabla 23). En este caso se observa que el modelo TSPBTW bajo las condiciones de demanda puede estar generando mejores soluciones.

Tabla 23 Resultados obtenidos con modelo TSPB - TSPTW.

	<i>Distancia Linehaul [km.]</i>	<i>Distancia Backhaul [km.]</i>	<i>Distancia Total/ruta [km.]</i>
Ruta 1	43,9	37,9	81,8
Ruta 2	17,2	14,9	32,1
Ruta 3	33,6	29,3	62,9
Ruta 4	21,5	17,2	38,7
Distancia total recorrida			215,5

Fuente: Elaboración propia.

• Resultados Ruta 1

Los datos asociados a la secuencia se presentan a continuación en la Tabla 24. Como se observa en los resultados, la diferencia en la solución que genera cada modelo es poca. Caso contrario en el primer escenario, pues presenta mayor ahorro el modelo TSPBTW.

Tabla 24 Secuencia asociada a la ruta 1, escenario 2

TSPTW/TSPB		TW	0	50	60	70	83	97	111	121	132	156	186	207	218	228	240	270	400	240	424	435	457	468	480	501,5
	Linehaul	S	0	8	7	75	80	84	51	53	86	58	77	30	56	47	3	68	70	3	45	9	34	4	23	39
	Backhaul	S	39	80	23	84	53	51	86	58	70	3	68	47	56	30	72	77	45	9	8	7	75	34	4	0

Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente, en el Gráfico 18 se presenta la ruta Linehaul y en el Gráfico 19 los clientes Backhaul en el segundo escenario de demanda para la ruta 1.

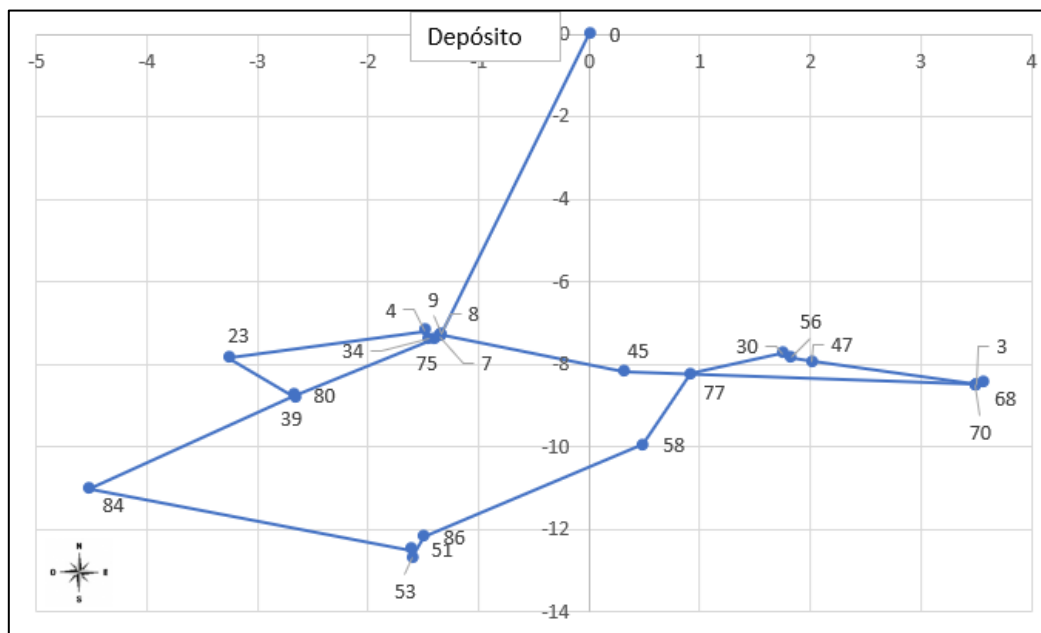


Gráfico 18 Clientes Linehaul Ruta 1
Fuente: Elaboración propia.

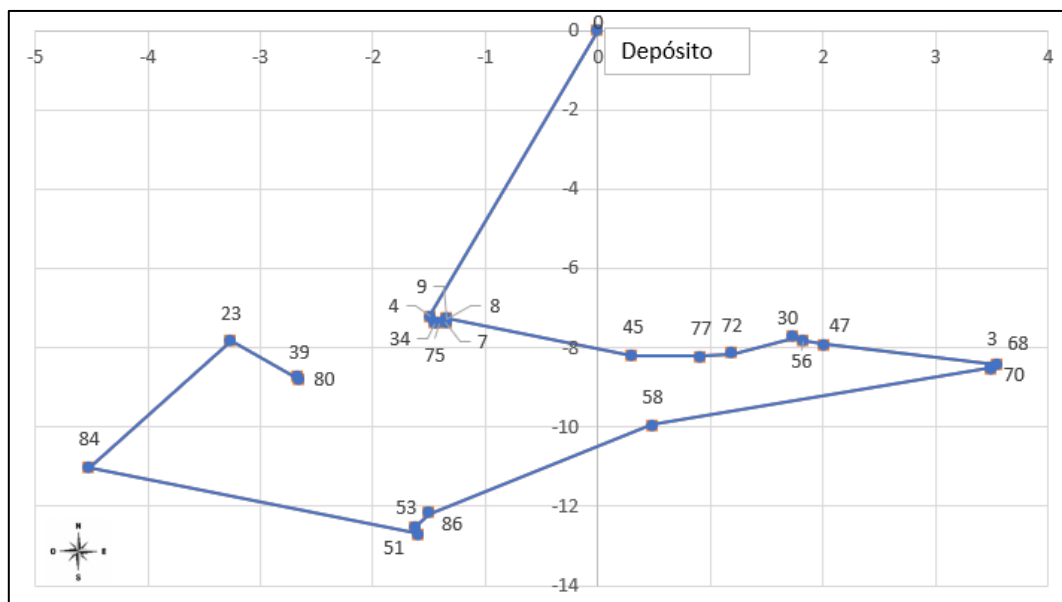


Gráfico 19 Clientes Backhaul Ruta 1
Fuente: Elaboración propia.

- **Resultados Ruta 2**

La metodología planteada por partes que requiere menor capacidad computacional da como resultado la siguiente secuencia para la ruta 2. En esta se puede observar que requiere mayor tiempo poder servir a todos los clientes y esto puede relacionarse a que no hubiese sido posible correr la ruta con el primero modelo planteado. A continuación se presentan los resultados (Ver Tabla 25).

Tabla 25 Secuencia asociada a la ruta 2, escenario 2

TSPTW/TSPB	Linehaul	TW	0	7,7	18	30	41	52	80	90	120	132	146	156	168	179	210	300	310	320	330	351	470	480	600
		S	0	42	44	57	32	40	5	31	6	10	43	26	27	29	64	28	25	22	50	21	49	54	65
		Backhaul	S	65	54	49	21	50	22	25	28	64	29	27	5	40	31	32	6	57	44	10	43	26	42

Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes gráficos se observa que los recorridos son similares para la entrega (Ver Gráfico 20) y recolección (Ver Gráfico 21) a excepción de algunos clientes que deben ser atendidos con prioridad por la ventana de tiempo que manejan.

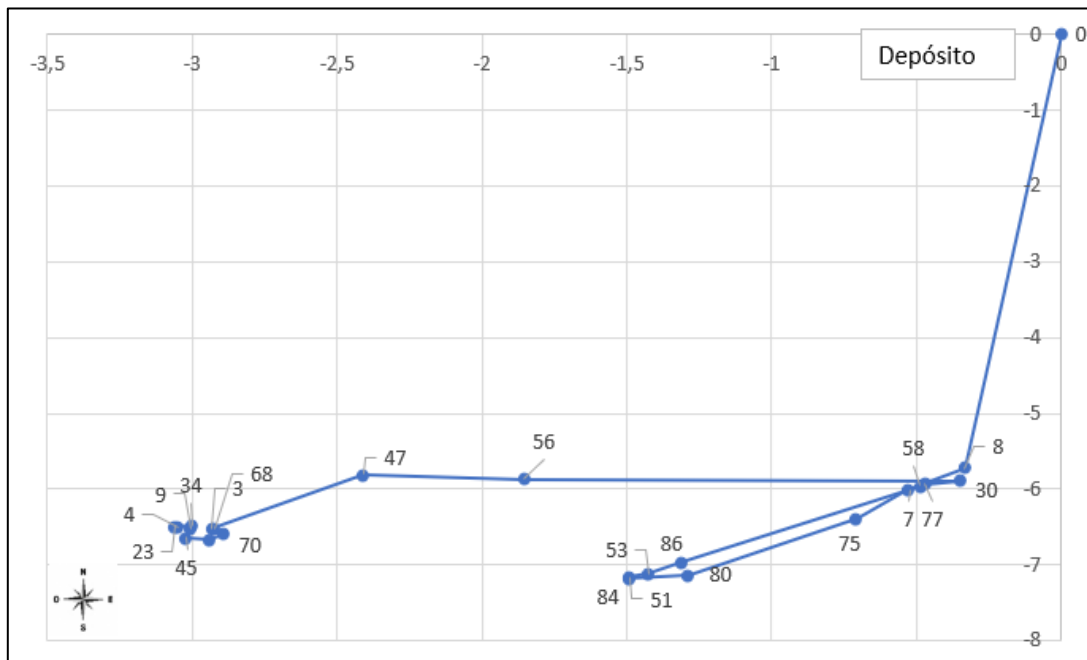


Gráfico 20 Clientes Linehaul Ruta 2

Fuente: Elaboración propia.

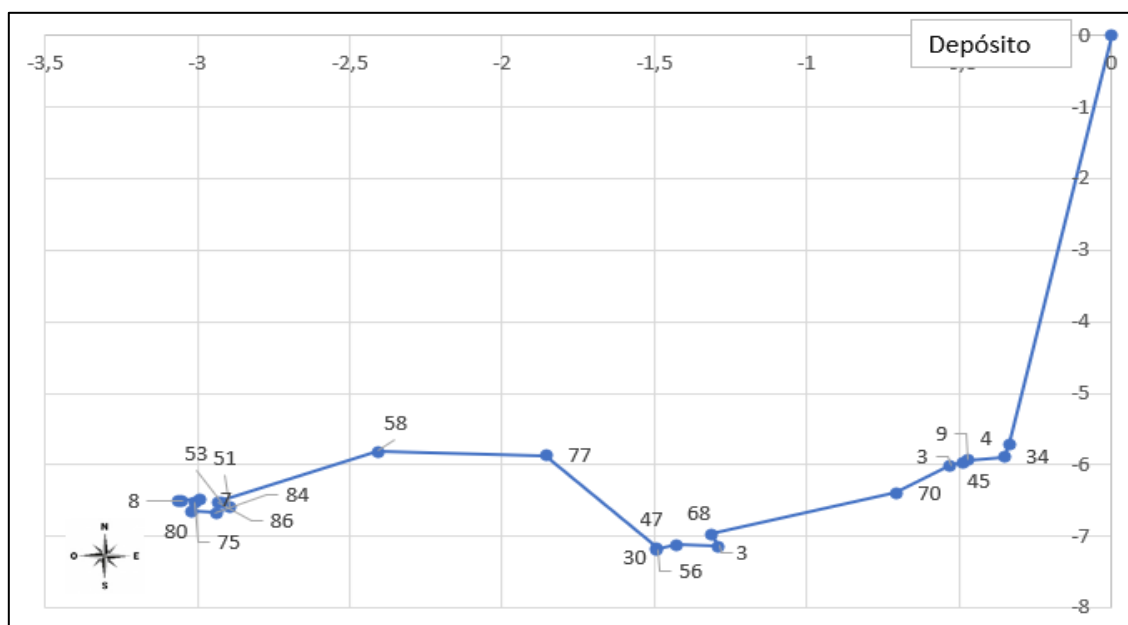


Gráfico 21 Clientes Linehaul Ruta 2
Fuente: Elaboración propia.

• Resultados Ruta 3

A continuación, se presentan los resultados de secuenciación (Ver Tabla 26) y gráficamente las ubicaciones de los diferentes nodos que conforman la ruta Linehaul (Ver Gráfico 22) y Backhaul (Ver Gráfico 23).

Tabla 26 Secuencia asociada a la ruta 3, escenario 2

TSPTW/TSPB	Linehaul	TW	0	15	36	120	131	143	174	186	196	209	229	242	253	339	350	380	390	401	411	423	435	450	510
		S	0	11	38	35	33	88	17	66	67	74	73	55	20	46	14	62	13	61	60	48	85	41	79
	Backhaul	S	79	88	17	66	67	73	74	55	20	46	14	62	13	61	60	48	85	11	41	38	35	33	0

Fuente: Elaboración propia.

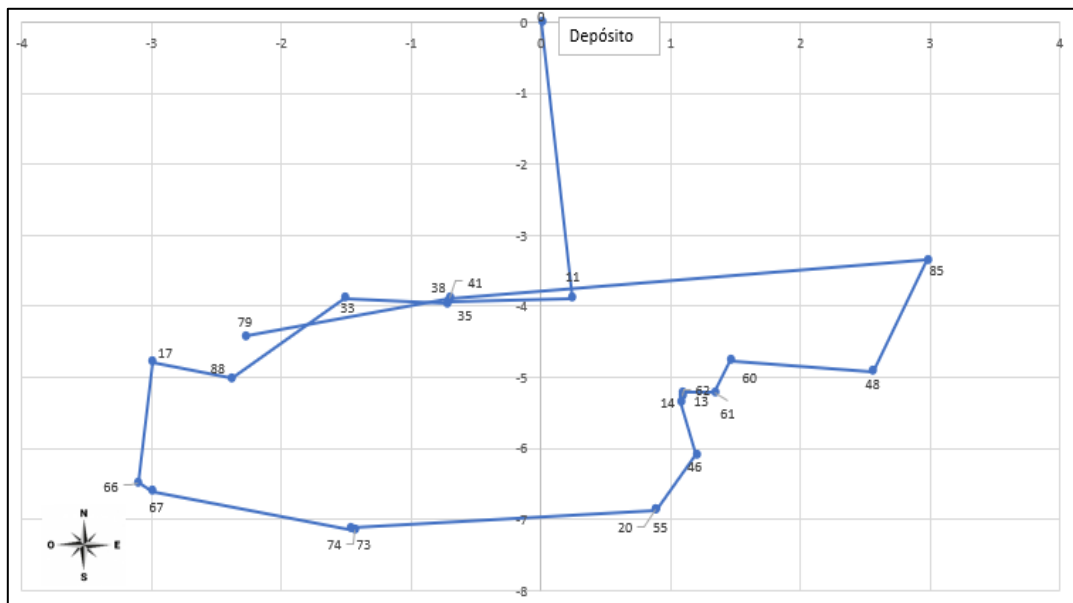


Gráfico 22 Clientes Linehaul Ruta 3
Fuente: Elaboración propia.

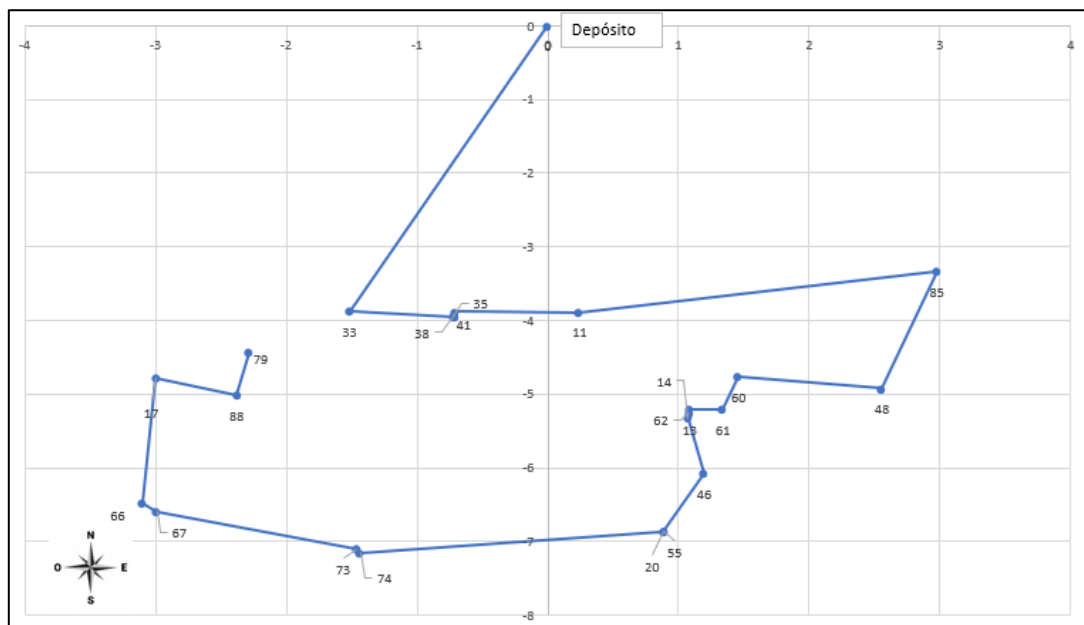


Gráfico 23 Clientes Backhaul Ruta 3

Fuente: Elaboración propia.

• Resultados Ruta 4

Como se observa en la secuencia, la ruta 4 en la Tabla 27 de recolección es igual para los dos modelos implementados.

Tabla 27 Secuencia asociada a la ruta 4, escenario 2

TSPTW/TSPB	Linehaul	TW	0	33	44	56	68	78	90	104	115	199	210	330	342
		S	0	83	36	82	18	19	63	37	59	81	52	1	2
	Backhaul	S	2	1	52	83	81	36	59	37	63	19	18	82	0

Fuente: Elaboración propia.

En los gráficos siguientes se presenta el recorrido a realizar por el vehículo para atender la entrega (Ver Gráfico 24 Clientes Linehaul Ruta 4 Gráfico 24) y posterior recolección (Ver Gráfico 25) de los RTIs.

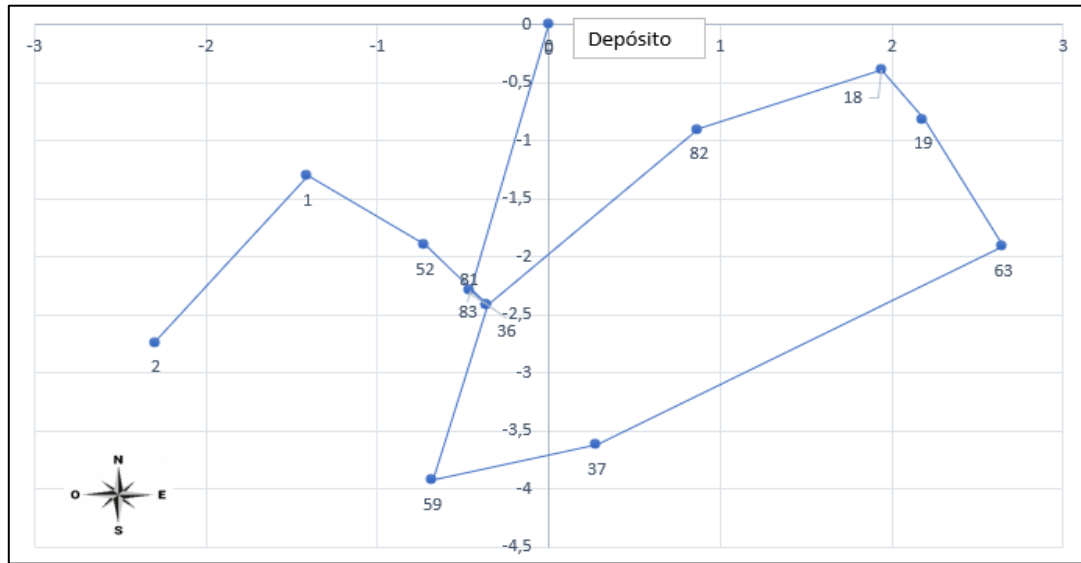


Gráfico 24 Clientes Linehaul Ruta 4

Fuente: Elaboración propia.

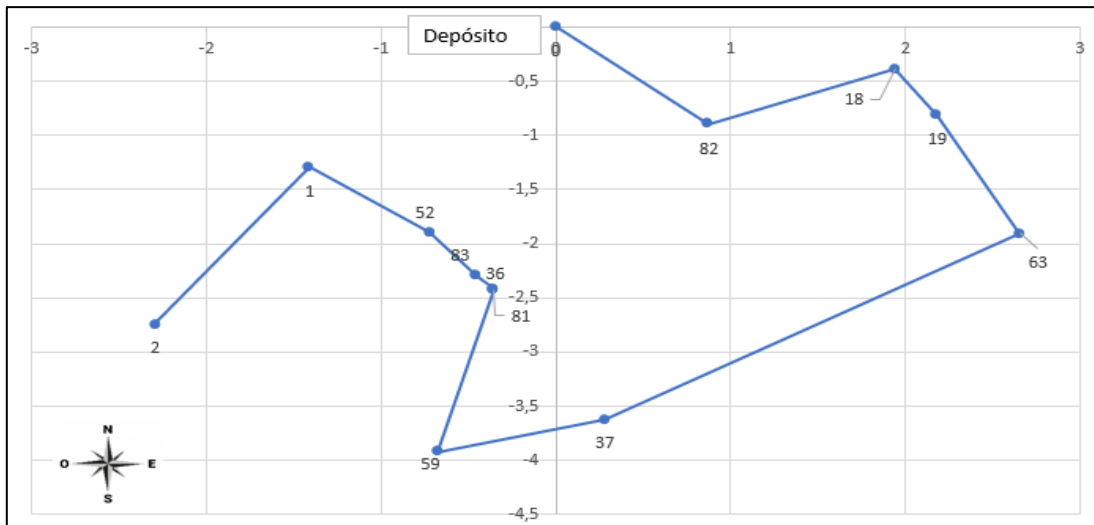


Gráfico 25 Clientes Backhaul Ruta 4

Fuente: Elaboración propia.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se presenta un análisis del resultado obtenidos mediante el modelo TSPBTW, aplicado a una empresa del sector alimenticio en la ciudad de Cali. El cual se subdividió en dos etapas, la primera consistió en llevar acabo la asignación mediante el método de ahorro y la segunda etapa en llevar acabo la secuenciación de los clientes Linehaul y Backhaul.

A manera de comparación de los resultados obtenidos mediante el modelo TSPBTW, se presentan los resultados del método tradicional implementado por la compañía en el escenario 1 (Ver Tabla 28) y el escenario 2 (Ver Tabla 29), el cual consiste en llevar acabo un cargue en el camión de manera alfabética. La asignación y las rutas para establecer con el método tradicional se pueden apreciar en la Tabla 16 y 17 para los escenarios 1 y 2 respectivamente.

Tabla 28 Secuencia asociada método tradicional escenario 1

Ruta		Clientes	Costo(Km)	Demanda
1	Linehauls	0 3 9 23 30 34 39 45 47 51 53 56 58 68 70 72 75 77 80 84 86	88,75	325
	Backhaul	86 84 80 77 75 72 70 68 58 56 53 51 47 45 39 34 30 23 9 3 0	88,75	
2	Linehauls	0 4 5 6 7 8 21 22 25 28 31 32 40 49 50 54 65 67 73 74	23,93	230
	Backhaul	74 73 67 65 54 50 49 40 32 31 28 25 22 21 8 7 6 5 4 0	23,93	
3	Linehauls	0 10 11 13 14 20 26 27 29 42 43 44 46 55 57 64 66 88	35,64	178
	Backhaul	88 66 64 57 55 46 44 43 42 29 27 26 20 14 13 11 10 0	35,64	
4	Linehauls	0 1 2 17 18 19 33 35 36 37 38 41 48 52 59 60 61 62 63 79 81 82 83 85	73,6	275
	Backhaul	85 83 82 81 79 63 62 61 60 59 52 48 41 38 37 36 35 33 19 18 17 2 1 0	73,6	
Costo total(km)			443,82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29 Secuencia asociada método tradicional escenario 2

Ruta		Clientes	Costo(Km)	Demanda
1	Linehaults	0 3 4 7 8 9 23 30 34 39 45 47 51 53 56 58 68 70 72 75 77 80 84 86	92,67	307
	Backhaul	86 84 80 77 75 72 70 68 58 56 53 51 47 45 39 34 30 23 9 8 7 4 3 0	92,67	
2	Linehaults	0 5 6 10 21 22 25 26 27 28 29 31 32 40 42 43 44 49 50 54 57 64 65	107,58	253
	Backhaul	65 64 57 54 50 49 44 43 42 40 32 31 29 28 27 26 25 22 21 10 6 5 0	107,58	
3	Linehaults	0 11 13 14 17 20 33 35 38 41 46 48 55 60 61 62 66 67 73 74 79 85	59,64	257
	Backhaul	85 79 74 73 67 66 62 61 60 55 48 46 41 38 35 33 20 17 14 13 11 0	59,64	
4	Linehaults	0 1 2 18 19 36 37 52 59 63 81 82 83	37,71	204
	Backhaul	83 82 81 63 59 52 37 36 19 18 2 1 0	37,71	
Costo total (km)			595,19	

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las tablas anteriores y las soluciones dadas con las metodologías propuestas se genera una tabla resumen, con las distancias totales del modelo TSPBTW Tabla 3 y Tabla 10, recopilados en la Tabla 30. Por otro lado, los resultados del modelo TSPTW-TSPB Tabla 4 y Tabla 11, recopilados en la Tabla 31 tabla 19. Cuyo fin es mostrar el ahorro porcentual.

Tabla 30 Comparación de los resultados método empresa y TSPBTW

Metodología	Escenario	Distancia (km)	Ahorro
Empresa ruta 1,3,4	1	395,98	
	2	342,33	
TSPBTW Ruta 1,3,4	1	194,5	50,9%
	2	180,4	47,3%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31 Comparación de los resultados método empresa y TSPB/TSPTW

Metodología	Escenario	Distancia (km)	Ahorro
Empresa todas las rutas	1	443,82	
	2	595,19	
TSPTW/TSPB	1	214,4	51,7%
	2	215,5	63,8%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados presentados en la tabla 31 se obtuvieron en base a las rutas solucionadas para los dos escenarios estudiados, puesto que la ruta 2 por su requerimiento computacional no logró generar resultado por el primer método TSPBTW. Son objeto de análisis en la tabla 18 rutas 1,3 y 4, en la cual se obtienen ahorros del 50,9% y 47,3% en los dos escenarios, los cuales representan un gran porcentaje de ahorro.

Por otro lado, en la tabla 19 se presenta un análisis para las 4 rutas, a través de la segunda metodología implementada que consiste en correr el modelo en dos partes logrando encontrar solución para la ruta 2. Para este caso en particular se logra un ahorro del 51,7% y del 63,8% para cada escenario respectivamente.

Al comparar ambas metodologías, frente al método tradicional de la compañía bajo 2 escenarios de demanda, y condiciones particulares se puede concluir que se obtienen ahorros significativos en el porcentaje de la distancia total recorrida, cercanos a la mitad de la distancia en la que la compañía incurre actualmente.

El comportamiento de cada uno de los modelos se observa en las tablas 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, una vez finalizadas las entregas, la mejor opción es esperar en el mismo cliente para llevar acabo la recolección RTIS. Adicional a esto, se puede apreciar que las rutas 1 y 4 no presentan la misma secuenciación de ruteo que de retorno, por lo cual el ahorro no es el máximo esperado a raíz de las ventanas de tiempo que influyen significativamente en estas rutas en comparación con los demás recorridos.

Caso contrario se observa con las rutas 2 y 3 que presentan una solución con secuencias similares para sus clientes Linehauls y los Backhauls por lo cual su solución es cercana al máximo ahorro. En estos casos fue posible que con las ventanas de tiempo propuestas se lograra optimizar las distancias recorridas y cumplir a sus clientes en el momento adecuado.

8. CONCLUSIONES

La metodología para la asignación de rutas en el problema de ruteo de vehículos para entrega y recolección, considerando ventanas de tiempo en las entregas logró minimizar las distancias recorridas en los escenarios de demanda analizados, teniendo en cuenta las características propias del caso de estudio. Entre estas características se resalta el impacto en la complejidad del modelo de variables como la cantidad de clientes (100 clientes), la amplitud de las ventanas de tiempo para la entrega, la ubicación de los clientes y los recursos disponibles para lograrlo (4 vehículos).

La estrategia propuesta para la solución del problema de ruteo fue adaptada para el trabajo de grado mediante la implementación de diferentes modelos ya existentes creando una metodología de dos fases: el método de ahorros para asignar los clientes a una ruta y la implementación de un modelo matemático exacto para definir la secuencia de ruteo. En la literatura encontrada que estudia las características propias del sistema de ruteo que incluye ventanas de tiempo y recolección de RTIs no se presenta evidencia su implementación.

La implementación de métodos exactos como metodología para solucionar problemas de ruteo de vehículos implica una complejidad computacional por su algoritmo. Frente a esta situación, se plantearon dos estrategias de resolución, la primera que corresponde al modelo TSPBTW que comprende el modelo completo y la segunda que divide la primera metodología en entregas y posterior recolección. En el análisis de los resultados, se observa que las dos formas de presentar el modelo generan soluciones óptimas, pero el segundo en mención da solución al problema de la capacidad computacional requerida en comparación al modelo completo y requiere menos tiempo.

El desempeño de la metodología propuesta permite observar que su implementación en los dos escenarios mejoró los resultados en comparación con el método tradicional utilizado en el caso de estudio, ya que el método de cargue alfabético que la compañía utiliza en la actualidad no es el indicado, teniendo en cuenta las restricciones que se presentan en su planteamiento como lo son el cumplimiento de las ventanas de tiempo y la recolección de RTIs. La disminución de la distancia recorrida respecto al método tradicional puede variar según los casos analizados del 47% a 64% de ahorro con su implementación.

En general, la metodología planteada para dar soluciones a problemas de ruteo con backhauls y ventanas de tiempo generan soluciones óptimas siempre que los límites de capacidad computacional no sean sobrepasados. Acorde a los diferentes escenarios se

logró observar que un modelo bajo estas condiciones logra en promedio iterar con 40 clientes. Sin embargo, la cantidad de clientes y la variación en las ventanas de tiempo por cliente fueron los causantes de que no se lograra correr algunas rutas propuestas debido a la capacidad computacional que requerían. Tal fue el caso de la ruta 2 para los dos escenarios, en la cual no se obtuvo solución mediante el modelo completo debido a la naturaleza NP-Hard de este tipo de problemas.

Para solucionar este tipo de problemas NP-Hard es indispensable establecer estrategias prácticas como la combinación de clientes cercanos minimizando las variables relacionadas al problema, al igual que la subdivisión del modelo en Linehails y Backhails. Recurrir a estas estrategias permite disminuir el costo computacional del problema y generar una solución de forma más rápida bajo las mismas condiciones del contexto inicial.

En conclusión, los objetivos planteados fueron cumplidos a cabalidad mediante el diseño de la metodología propuesta, la cual, permitió mejorar las condiciones asociadas al problema de ruteo en el caso de estudio trayendo beneficios económicos por la optimización de sus recursos a nivel logístico dado que permite minimizar el costo en distancia recorrida y aprovechar al máximo la utilización de los vehículos.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Bermeo M., Elver; Calderón S., "Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte," *El Hombre y la Máquina* No. 32, pp. 52–67, 2009.
- [2] SINTEC, "Transporte, El Verdadero Reto En Latinoamérica Y Colombia," 2016.
- [3] S. N. Kumar and R. Panneerselvam, "A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants," *Intell. Inf. Manag.*, vol. 04, no. 03, pp. 66–74, 2012.
- [4] M. B. Bowesox, Donald j.; Closs, David j; Cooper, *Administracion y logistica en la cadena de suministros Segunda edición*. Mexico, 2007.
- [5] Y. Zhong and M. H. Cole, "A vehicle routing problem with backhauls and time windows: A guided local search solution," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 41, no. 2, pp. 131–144, 2005.
- [6] H. Vidal, Julio; Parra, Marco; Gutierrez, "Método heurístico para el problema de ruteo de vehículos aplicado a la empresa distribuidora Representaciones Continental," *Gest. Soc.*, pp. 171–186, 2013.
- [7] D. Toth, Paolo; Vigo, "VEHICE ROUTING," in *Problems, Methods and applications Second Edition*, 2014, pp. 242–243.
- [8] S. Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, "Solution of a large-scale travelling salesman problem," *Oper. Res.*, vol. 2, pp. 393–410, 1954.
- [9] W. Wu, Y. Tian, and T. Jin, "A label based ant colony algorithm for heterogeneous vehicle routing with mixed backhaul," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 47, pp. 224–234, 2016.
- [10] R. Carrasco, Ruth; Ponce, Eva; Dekker, "A framework for closed-loop supply chains of reusable articles," Madrid, 2009.
- [11] O. Hellström, Daniel; Johansson, "The impact of control strategies on the management of returnable transport items," *Transp. Res.*, pp. 1128–1139, 2010.
- [12] R. MacEdo, C. Alves, J. M. V. De Carvalho, F. Clautiaux, and S. Hanafi, "Solving the vehicle routing problem with time windows and multiple routes exactly using a pseudo-polynomial model," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 214, no. 3, pp. 536–545, 2011.

- [13] J. F. Cordeau, G. Laporte, M. W. P. Savelsbergh, and D. Vigo, "Chapter 6 Vehicle Routing," *Handbooks Oper. Res. Manag. Sci.*, vol. 14, no. C, pp. 367–428, 2007.
- [14] M. Solomon, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints," *Oper. Res.*, pp. 254–265, 1987.
- [15] R. H. Ballou, *Logística. Administración de la cadena de suministro*. 2004.
- [16] I. Küçükoğlu and N. Öztürk, "An advanced hybrid meta-heuristic algorithm for the vehicle routing problem with backhauls and time windows," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 86, pp. 60–68, 2015.
- [17] K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, and K. Devika, "Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 152, pp. 9–28, 2014.
- [18] C. Archetti, N. Bianchessi, and M. G. Speranza, "Branch-and-cut algorithms for the split delivery vehicle routing problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 238, no. 3, pp. 685–698, 2014.
- [19] N. Wassan, N. Wassan, G. Nagy, and S. Salhi, "The Multiple Trip Vehicle Routing Problem with Backhauls: Formulation and a Two-Level Variable Neighbourhood Search," *Comput. Oper. Res.*, vol. 78, pp. 454–467, 2017.
- [20] G. D. Yalcin and N. Erginel, "Fuzzy multi-objective programming algorithm for vehicle routing problems with backhauls," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 13, pp. 5632–5644, 2015.
- [21] A. Bortfeldt, T. Hahn, D. Männel, and L. Mönch, "Hybrid algorithms for the vehicle routing problem with clustered backhauls and 3D loading constraints," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 243, no. 1, pp. 82–96, 2015.
- [22] Y. Gajpal and P. L. Abad, "Multi-ant colony system (MACS) for a vehicle routing problem with backhauls," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 196, no. 1, pp. 102–117, 2009.
- [23] A. C. Wade and S. Salhi, "An investigation into a new class of vehicle routing problem with backhauls," *Omega*, vol. 30, no. 6, pp. 479–487, 2002.
- [24] C. Wang, D. Mu, F. Zhao, and J. W. Sutherland, "A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 83, pp. 111–122, 2015.
- [25] S. R. Thangiah, J. Y. Potvin, and T. Sun, "Heuristic approaches to vehicle routing with backhauls and time windows," *Comput. Oper. Res.*, vol. 23, no. 11, pp. 1043–1057, 1996.
- [26] F. Belmecheri, F. Yalaoui, and L. Amodéo, "algoritmo de optimización de enjambre

de partículas para un problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea fl, los viajes de regreso mixtos, y las ventanas de tiempo,” pp. 775–789, 2013.

- [27] G. Yazgi Tütüncü, C. A. C. Carreto, and B. M. Baker, “A visual interactive approach to classical and mixed vehicle routing problems with backhauls,” *Omega*, vol. 37, no. 1, pp. 138–154, 2009.
- [28] G. Iassinovskaia, S. Limbourg, and F. Riane, “The inventory-routing problem of returnable transport items with time windows and simultaneous pickup and delivery in closed-loop supply chains,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 183, pp. 570–582, 2017.
- [29] N. Öztürk, “Un enfoque evolución diferencial para el problema de ruteo de vehículos con los viajes de regreso y ventanas de tiempo,” pp. 942–956, 2014.
- [30] L. Belmecheri, Farah; Prins, Christian; Yalaoui, Farouk; Amodeo, “An Ant Colony Optimization algorithm for a Vehicle Routing Problem with Heterogeneous fleet, Mixed Backhauls, and Time Windows,” in *Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2009, pp. 1550–1555.
- [31] M. Berghida and A. Boukra, “EBBO: an enhanced biogeography-based optimization algorithm for a vehicle routing problem with heterogeneous fleet, mixed backhauls, and time windows,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 9–12, pp. 1711–1725, 2015.
- [32] J. Oesterle and T. Bauernhansl, “Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Mixed Linehaul and Backhaul Customers, Heterogeneous Fleet, time Window and Manufacturing Capacity,” *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 573–578, 2016.
- [33] J. Clarke, G.; Wright, “Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery,” *Oper. Res.*, pp. 568–581, 1964.

ANEXOS

Anexo 1. Demanda Parte 1

N. Cliente	Cientes	N. clientes	Demanada de clientes Escenario 1	Demanada de clientes Escenario 2
0	Depósito	0	0	0
1	AV 4N N° 45N -110	1	10	10
2	AVE 6 BIS # 26N - 45	2	14	20
3	CALLE 105 # 27 - 22	3	11	9
4	CALLE 19 N° 29A-19	4	12	10
5	CALLE 19 N°29-33	5	12	20
6	CALLE 23 N° 26-44	6	21	9
7	CALLE 23 N° 30-36	7	15	11
8	CALLE 23 NO, 29B-45	8	10	14
9	CALLE 33 N° 30-71	9	17	22
10	CALLE 33 N° 30-72			
11	CALLE 33A TRANSVERSAL NO. 31-10	10	9	19
12	CALLE 44 NO, 4N-74	11	25	25
13	CALLE 50 N° 26K-24			
14	CALLE 52 # 12C-11	13	10	13
15	CALLE 52 # 24- 21	14	31	45
16	CALLE 52 # 24 A 37			
17	CALLE 52 NO 24-65			
18	CALLE 7 N° 4-15 BLOQUE 257	17	14	19
19	CALLE 71 B # 1A2 - 03	18	8	9
20	CALLE 71A N° 1A 4B-81	19	12	15
21	CALLE 72 N° 28A-145	20	20	19
22	CALLE 8 N° 25-10	21	20	32
23	CALLE 8 N° 25-31			
24	CALLE 9 # 26-62	22	14	10
25	CLL 48 A #88 30	23	17	28
26	CLL 48 A #88 28			
27	CALLE 9 N° 24-40	25	11	20
28	CARRERA 17F N° D20-02	26	12	20
29	CARRERA 18 N° 15-36	27	15	18
30	CARRERA 24 N° 8A-30	28	15	17
31	CARRERA 25 N° 7A-03	29	48	48
32	CARRERA 25 N° 7A-29			
33	CARRERA 25 N° 7A-58			
34	CARRERA 28D N° 72M-81	30	9	13
35	CARRERA 29 N° 19-106	31	29	46
36	CARRERA 29 N° 19-46			
37	CARRERA 29 N° 19-53			
38	CARRERA 29 N° 23 48	32	10	18
39	CARRERA 29A N° 18A-31	33	12	13
40	CARRERA 31 N° 19-47	34	10	16
41	CARRERA 5 N° 31-40	35	12	15
42	CARRERA 5 N° 43 AN-30	36	10	14
43	CARRERA 5 N° 44A-02	37	31	15
44	CARRERA 5N° 31-51	38	15	14
45	CL 13 N° 44-42	39	33	18
46	CL 19 N° 29A-03	40	7	12
47	CL 31A N° 4B-78	41	10	12
48	CL 33A N° 17A-35	42	8	10
49	CL 33A TR 31-38	43	11	11
50	CL 33A TRASV 30- 55	44	10	12

Anexo 1. Demanda Parte 2

N. Cliente	Cientes	N, clientes	Demanada de clientes Escenario 1	Demanada de clientes Escenario 2
51	CL 38 N 6 35 LC 809	45	15	12
52	CL 52 # 24C -13	46	12	20
53	CL 72 U N° 28C-20 ESQUINA	47	17	17
54	CL 72N N°28A-102	48	17	10
55	CL 8 25 19 LC6	49	6	9
56	CL 8 N° 26-55	50	19	28
57	CL 8 N° 26-50			
58	CLL 28 # 85C -30	51	10	8
59	CLL 44 NORTE AV 2 E NORTE 121	52	15	15
60	CLL 48 A #86 28	53	12	19
61	CR 25 # 7A 28	54	18	27
62	CR 25 n, 7A 43			
63	CR 28 calle 49- 63	55	11	15
64	CR 28D 72P 95	56	11	16
65	CR 29 #23- 24	57	16	14
66	CR 42 A n, 151 -41	58	13	15
67	CR 5 N° 31A - 20 LOCAL 8-02	59	8	13
68	CRA 10 N° 10-10	60	7	17
69	CRA 12C NO, 55-13	61	12	13
70	CRA 12E NO, 52-07	62	14	19
71	CRA 1E #71-118	63	14	13
72	CRA 24 NO, 8A-11	64	15	13
73	CRA 25 # 7A-34	65	35	31
74	CRA 25 N° 7 A 06			
75	CRA 25 NO, 7-55	66	25	15
76	CRA 26 N° 8-37	67	15	13
77	CRA 27 N° 112 - 56	68	21	23
78	CRA 27 N° 112 - 26			
79	CRA 27A NO, 105-20	70	30	25
80	CRA 27A NO, 105-03			
81	CRA 29 N° 43-68	72	10	11
82	CRA 29 NO, 19-24	73	13	14
83	CRA 29A N° 19-42	74	19	26
84	CRA 29A N° 19-83			
85	CRA 31 N° 19-67	75	18	26
86	CRA 31 NO, 18-03			
87	CRA 31 NO, 42-03	77	16	24
88	CRA 31 N° 42-51			
89	CRA 4 # 15-12	79	12	15
90	CRA 44 N° 12B-88	80	12	20
91	CRA 5 NORTE NO, 43A-04 ESQ,	81	14	18
92	CRA 5 NORTE NO, 67-41	82	11	15
93	CRA 7 NORTE # 43 A 41	83	10	14
94	CRA 83C NO, 30-52	84	10	18
95	CRA 7C NO, 70-139	85	15	18
96	CRA 83C #30-54	86	33	28
97	CRA 83C NO, 31-52			
98	CRA 9 N° 12-65	88	40	39
99	CRA 9 N° 12-48			
100	CRA 9 N° 12-72			

Anexo 2. Coordenadas y distancias UTM Parte 1

<i>N. Cliente</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Coordenadas UTM (km)</i>	
			<i>x (utm)</i>	<i>y (utm)</i>
0	3,49	-76,51	332,37	386,30
1	3,48	-76,52	330,96	385,00
2	3,47	-76,53	330,08	383,57
3	3,42	-76,48	335,87	377,82
4	3,43	-76,52	330,88	379,10
5	3,43	-76,52	330,88	379,14
6	3,43	-76,52	331,06	379,33
7	3,43	-76,52	331,02	378,95
8	3,43	-76,52	331,03	379,02
9	3,43	-76,51	331,03	379,02
10	3,44	-76,51	331,88	380,35
11	3,46	-76,51	332,61	382,42
13	3,45	-76,50	333,46	381,10
14	3,45	-76,50	333,45	380,97
17	3,45	-76,54	329,37	381,52
18	3,49	-76,49	334,31	385,91
19	3,49	-76,49	334,55	385,49
20	3,43	-76,50	333,80	379,21
21	3,43	-76,54	329,36	379,78
22	3,43	-76,54	329,43	379,63
23	3,42	-76,54	329,11	378,47
25	3,43	-76,54	329,48	379,70
26	3,44	-76,51	332,02	380,41
27	3,44	-76,53	330,52	380,43
28	3,43	-76,54	329,45	379,78
29	3,44	-76,53	329,96	380,49
30	3,42	-76,49	334,12	378,57
31	3,43	-76,52	330,94	379,18
32	3,43	-76,52	331,08	379,17
33	3,46	-76,52	330,86	382,42
34	3,43	-76,52	330,91	378,92
35	3,46	-76,52	331,65	382,35
36	3,47	-76,51	332,02	383,88
37	3,46	-76,51	332,65	382,68
38	3,46	-76,52	331,65	382,37
39	3,41	-76,53	329,72	377,49
40	3,43	-76,52	330,88	379,12

Anexo 2. Coordenadas y distancias UTM Parte 2

N. Cliente	Latitud	Longitud	Coordenadas UTM (km)	
			x (utm)	y (utm)
41	3,46	-76,52	331,67	382,42
42	3,44	-76,51	332,04	380,57
43	3,44	-76,51	331,90	380,37
44	3,44	-76,51	331,84	380,30
45	3,42	-76,51	332,68	378,11
46	3,44	-76,50	333,57	380,23
47	3,42	-76,49	334,38	378,38
48	3,45	-76,49	334,93	381,39
49	3,44	-76,54	329,37	379,83
50	3,43	-76,54	329,35	379,66
51	3,38	-76,52	330,76	373,80
52	3,48	-76,52	331,65	384,40
53	3,38	-76,52	330,77	373,62
54	3,43	-76,54	329,32	379,81
55	3,43	-76,50	333,25	379,44
56	3,42	-76,49	334,20	378,48
57	3,44	-76,52	331,66	379,90
58	3,40	-76,50	332,86	376,35
59	3,46	-76,52	331,69	382,38
60	3,45	-76,50	333,83	381,53
61	3,45	-76,50	333,71	381,09
62	3,45	-76,50	333,46	381,04
63	3,48	-76,49	335,02	384,40
64	3,43	-76,54	329,44	379,79
65	3,43	-76,54	329,31	379,81
66	3,44	-76,54	329,27	379,82
67	3,43	-76,54	329,38	379,70
68	3,42	-76,48	335,92	377,88
70	3,42	-76,48	335,86	377,79
72	3,42	-76,50	333,56	378,15
73	3,43	-76,52	330,91	379,19
74	3,43	-76,52	330,94	379,15
75	3,43	-76,52	330,96	378,92
77	3,42	-76,50	333,29	378,08
79	3,45	-76,53	330,09	381,88
80	3,41	-76,53	329,69	377,54
81	3,47	-76,51	332,02	383,88
82	3,49	-76,50	333,25	385,40
83	3,47	-76,51	331,91	384,01
84	3,39	-76,55	327,85	375,28
85	3,46	-76,48	335,35	382,96
86	3,38	-76,52	330,87	374,13
88	3,45	-76,53	329,99	381,29

Anexo 3. Ventanas de tiempo y tiempos de servicio Parte 1

Clientes	Tiempo	Ventana Inicial (min)	Ventana final (min)
0	0	0	660
1	10	330	450
2	10	0	800
3	10	60	240
4	10	360	480
5	10	0	800
6	10	0	800
7	10	60	210
8	10	30	240
9	20	0	600
10	10	0	240
11	20	15	120
13	10	240	660
14	30	90	540
17	10	0	235
18	10	0	120
19	10	15	180
20	10	120	440
21	20	100	480
22	10	270	660
23	20	240	480
25	10	0	500
26	10	150	300
27	10	0	840
28	10	300	600
29	30	120	330
30	10	0	540
31	30	90	330
32	10	0	360
33	10	0	300
34	10	330	480
35	10	120	240
36	10	15	75
37	10	0	600
38	10	30	120
39	10	0	600
40	10	0	420

Anexo 3. Ventanas de tiempo y tiempos de servicio Parte 2

Cientes	Tiempo	Ventana Inicial	Ventana final
41	10	150	450
42	10	0	800
43	10	60	210
44	10	0	600
45	10	0	660
46	10	0	800
47	10	0	660
48	10	0	800
49	10	210	540
50	20	240	800
51	10	0	120
52	10	150	210
53	10	120	240
54	20	120	480
55	10	0	800
56	10	135	600
57	10	30	480
58	10	45	195
59	10	0	360
60	10	210	420
61	10	300	800
62	10	0	800
63	10	90	360
64	10	60	210
65	20	240	600
66	10	100	300
67	10	0	800
68	20	90	270
70	10	400	660
72	10	300	450
73	10	0	800
74	20	0	210
75	10	60	270
77	20	150	345
79	10	390	510
80	10	0	480
81	10	195	240
82	10	40	240
83	10	0	120
84	10	0	800
85	10	0	800
86	20	0	800
88	30	0	250

Anexo 3. Ventanas de tiempo y tiempos de servicio Parte 3

Clientes	Tiempo	Ventana Inicial	Ventana final
110	10	0	1440
111	20	0	1440
113	10	0	1440
114	30	0	1440
117	10	0	1440
118	10	0	1440
119	10	0	1440
120	10	0	1440
121	20	0	1440
122	10	0	1440
123	20	0	1440
125	10	0	1440
126	10	0	1440
127	10	0	1440
128	10	0	1440
129	30	0	1440
130	10	0	1440
131	30	0	1440
132	10	0	1440
133	10	0	1440
134	10	0	1440
135	10	0	1440
136	10	0	1440
137	10	0	1440
138	10	0	1440
139	10	0	1440
140	10	0	1440
141	10	0	1440
142	10	0	1440
143	10	0	1440
144	10	0	1440
145	10	0	1440
146	10	0	1440
147	10	0	1440
148	10	0	1440
149	10	0	1440
150	20	0	1440
151	10	0	1440

Anexo 3. Ventanas de tiempo y tiempos de servicio Parte 4

Clientes	Tiempo	Ventana Inicial	Ventana final
152	10	0	1440
153	10	0	1440
154	20	0	1440
155	10	0	1440
156	10	0	1440
157	10	0	1440
158	10	0	1440
159	10	0	1440
160	10	0	1440
161	10	0	1440
162	10	0	1440
163	10	0	1440
164	10	0	1440
165	20	0	1440
166	10	0	1440
167	10	0	1440
168	20	0	1440
170	10	0	1440
172	10	0	1440
173	10	0	1440
174	20	0	1440
175	10	0	1440
177	20	0	1440
179	10	0	1440
180	10	0	1440
181	10	0	1440
182	10	0	1440
183	10	0	1440
184	10	0	1440
185	10	0	1440
186	20	0	1440
188	30	0	1440
211	10	0	1440
212	10	0	1440
213	10	0	1440
214	10	0	1440
215	10	0	1440
216	10	0	1440
217	10	0	1440
218	10	0	1440
219	20	0	1440
1010	0	0	1440

Anexo 4. Matriz de distancias para el método de ahorros Parte 1

MATRIZ DE AHORRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	30
2	5,09																									
3	3,22	6,18																								
4	4,51	8,58	15,33																							
5	4,52	8,58	15,27	19,67																						
6	4,47	8,49	15,13	19,04	19,03																					
7	4,48	8,51	15,74	19,67	19,57	19,08																				
8	4,48	8,50	15,62	19,62	19,54	19,08	19,92																			
9	4,14	7,85	17,43	18,12	18,05	17,90	18,51	18,41																		
10	4,22	7,87	14,05	15,78	15,77	15,82	15,89	15,88	15,99																	
11	3,68	6,30	10,01	10,10	10,09	10,13	10,16	10,16	10,44	10,32																
13	3,49	6,33	14,02	12,66	12,64	12,69	12,84	12,82	13,75	12,85	10,29															
14	3,52	6,41	14,33	12,97	12,95	12,99	13,16	13,13	14,10	13,12	10,32	14,29														
17	5,00	9,46	9,91	13,64	13,64	13,42	13,54	13,52	12,37	11,91	8,32	9,23	9,41													
18	0,57	0,95	3,89	2,29	2,28	2,32	2,35	2,34	2,78	2,52	2,66	3,22	3,21	1,36												
19	0,84	1,39	4,97	3,10	3,10	3,14	3,18	3,17	3,69	3,36	3,47	4,18	4,17	1,95	5,11											
20	3,63	6,83	18,74	15,72	15,67	15,61	16,06	15,98	17,70	14,79	10,37	14,30	14,65	10,63	3,33	4,33										
21	4,87	9,26	12,91	17,32	17,29	16,86	17,24	17,17	15,69	14,24	9,28	11,04	11,30	14,89	1,72	2,41	13,41									
22	4,85	9,22	13,19	17,63	17,59	17,13	17,55	17,47	15,98	14,42	9,36	11,21	11,47	14,84	1,77	2,47	13,67	19,24								
23	4,84	9,22	14,66	18,78	18,70	18,10	18,83	18,69	17,29	14,95	9,56	11,74	12,03	14,86	1,86	2,59	14,79	19,27	19,59							
25	4,85	9,22	13,11	17,53	17,50	17,05	17,44	17,37	15,89	14,39	9,36	11,18	11,44	14,82	1,77	2,47	13,60	19,16	19,36	19,35						
26	4,17	7,75	14,06	15,50	15,49	15,54	15,62	15,61	15,84	15,78	10,36	12,95	13,22	11,68	2,57	3,42	14,79	13,94	14,12	14,66	14,09					
27	4,66	8,81	12,64	16,31	16,31	16,17	16,23	16,22	15,18	14,48	9,64	11,39	11,62	13,74	1,97	2,70	13,32	16,16	16,27	16,44	16,26	14,21				
28	4,86	9,23	12,97	17,39	17,35	16,92	17,30	17,23	15,75	14,30	9,32	11,11	11,36	14,84	1,75	2,44	13,48	19,15	19,21	19,20	19,19	14,01	16,21			
29	4,80	9,11	12,11	16,11	16,10	15,85	16,00	15,97	14,74	13,91	9,30	10,85	11,08	14,44	1,77	2,46	12,78	16,86	16,89	16,91	16,89	13,64	15,99	16,88		
30	3,60	6,83	20,45	16,17	16,11	15,99	16,55	16,45	18,25	14,88	10,35	14,29	14,64	10,76	3,42	4,44	19,45	13,76	14,04	15,37	13,96	14,86	13,51	13,83	12,99	

MATRIZ DE AHORRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	30
31	4,50	8,55	15,27	19,53	19,51	19,06	19,50	19,49	18,06	15,80	10,11	12,68	12,98	13,57	2,30	3,12	15,69	17,17	17,46	18,54	17,37	15,52	16,27	17,23	16,02	16,12
32	4,46	8,47	15,43	19,35	19,31	19,07	19,49	19,49	18,22	15,87	10,16	12,79	13,10	13,43	2,35	3,17	15,85	16,96	17,25	18,35	17,17	15,60	16,16	17,03	15,88	16,28
33	4,69	8,53	8,81	11,03	11,03	10,98	10,98	10,98	10,48	10,53	8,48	8,84	8,95	10,86	1,66	2,27	9,49	11,18	11,19	11,20	11,19	10,42	11,17	11,19	11,20	9,49
34	4,50	8,56	15,67	19,76	19,65	19,08	20,04	19,88	18,44	15,84	10,13	12,77	13,09	13,64	2,32	3,14	15,98	17,41	17,72	19,04	17,61	15,57	16,29	17,46	16,11	16,48
35	4,28	7,53	9,43	10,80	10,80	10,80	10,80	10,80	10,65	10,72	9,34	9,60	9,69	9,74	2,08	2,78	10,02	10,44	10,49	10,58	10,49	10,68	10,69	10,47	10,49	10,00
36	3,79	5,46	5,98	6,58	6,58	6,58	6,58	6,58	6,54	6,57	6,40	6,23	6,25	6,12	1,83	2,38	6,30	6,39	6,41	6,44	6,41	6,56	6,52	6,40	6,42	6,28
37	3,60	6,04	9,39	9,41	9,41	9,44	9,47	9,46	9,73	9,62	9,77	9,65	9,67	7,81	2,65	3,44	9,70	8,66	8,74	8,91	8,73	9,66	9,00	8,70	8,69	9,96
38	4,28	7,51	9,39	10,75	10,75	10,75	10,75	10,75	10,60	10,68	9,32	9,57	9,65	9,70	2,08	2,78	9,98	10,39	10,44	10,53	10,44	10,64	10,64	10,42	10,44	9,96
39	4,70	8,98	16,48	19,59	19,50	18,86	19,81	19,63	18,67	15,60	9,93	12,55	12,87	14,51	2,13	2,93	16,19	18,92	19,27	22,22	19,06	15,32	16,55	18,89	16,78	16,98
40	4,52	8,58	15,31	19,74	19,67	19,04	19,63	19,59	18,10	15,78	10,10	12,66	12,96	13,64	2,28	3,10	15,70	17,31	17,61	18,75	17,52	15,50	16,31	17,37	16,10	16,15
41	4,27	7,47	9,29	10,62	10,62	10,62	10,62	10,62	10,48	10,55	9,28	9,48	9,56	9,60	2,07	2,77	9,87	10,27	10,31	10,40	10,31	10,51	10,51	10,29	10,31	9,85
42	4,16	7,71	13,73	15,10	15,09	15,14	15,20	15,19	15,41	15,39	10,36	12,84	13,09	11,52	2,56	3,41	14,47	13,65	13,81	14,30	13,79	15,44	13,96	13,71	13,40	14,51
43	4,21	7,85	14,02	15,72	15,71	15,76	15,82	15,81	15,94	16,01	10,33	12,85	13,12	11,87	2,53	3,37	14,76	14,18	14,36	14,89	14,33	15,78	14,43	14,25	13,87	14,84
44	4,23	7,91	14,12	15,94	15,93	15,98	16,05	16,04	16,13	16,06	10,31	12,84	13,12	12,00	2,51	3,35	14,85	14,38	14,56	15,11	14,53	15,77	14,60	14,45	14,04	14,95
45	4,04	7,70	19,10	18,17	18,09	17,85	18,60	18,46	20,05	15,87	10,47	14,02	14,38	12,24	2,95	3,90	18,67	15,72	16,03	17,64	15,93	15,75	15,05	15,78	14,64	19,69
46	3,59	6,64	16,21	14,32	14,29	14,31	14,58	14,53	15,83	14,11	10,36	14,29	14,65	10,04	3,26	4,24	16,67	12,34	12,54	13,33	12,50	14,18	12,52	12,41	11,95	16,66
47	3,55	6,74	21,19	16,10	16,04	15,92	16,50	16,39	18,20	14,77	10,31	14,28	14,62	10,66	3,50	4,53	19,38	13,69	13,97	15,35	13,89	14,76	13,41	13,75	12,89	21,22
48	2,82	5,12	14,81	11,11	11,08	11,12	11,33	11,29	12,55	11,18	9,30	12,60	12,70	7,60	3,94	5,01	13,88	9,35	9,52	10,14	9,50	11,28	9,69	9,42	9,15	14,16
49	4,87	9,26	12,83	17,24	17,21	16,78	17,15	17,09	15,61	14,20	9,26	11,01	11,26	14,89	1,72	2,41	13,35	19,18	19,11	19,13	19,06	13,91	16,14	19,08	16,85	13,69
50	4,87	9,25	13,08	17,51	17,48	17,02	17,43	17,36	15,86	14,33	9,31	11,12	11,38	14,88	1,74	2,43	13,56	19,31	19,49	19,57	19,31	14,03	16,21	19,21	16,87	13,93
51	4,45	8,58	20,59	19,71	19,60	19,05	20,08	19,88	20,06	16,06	10,34	13,64	14,00	13,99	2,63	3,54	18,37	18,36	18,72	21,69	18,51	15,84	16,31	18,34	16,35	19,79
52	4,07	5,13	4,56	5,41	5,41	5,40	5,40	5,40	5,24	5,30	4,99	4,81	4,84	5,38	1,28	1,70	4,90	5,45	5,45	5,46	5,45	5,27	5,45	5,45	5,46	4,88
53	4,44	8,57	20,69	19,71	19,60	19,05	20,08	19,88	20,07	16,06	10,34	13,66	14,01	13,99	2,64	3,55	18,40	18,36	18,72	21,70	18,51	15,85	16,30	18,34	16,34	19,84
54	4,88	9,27	12,83	17,25	17,21	16,78	17,16	17,09	15,61	14,18	9,25	10,99	11,24	14,92	1,70	2,39	13,34	19,23	19,17	19,23	19,08	13,89	16,12	19,08	16,84	13,69
55	3,79	7,11	17,53	16,00	15,95	15,92	16,31	16,25	17,82	15,15	10,45	14,20	14,56	11,00	3,13	4,09	18,26	13,75	14,00	15,03	13,94	15,14	13,69	13,82	13,14	18,34
56	3,59	6,81	20,75	16,18	16,12	16,00	16,57	16,47	18,27	14,86	10,34	14,29	14,64	10,75	3,45	4,47	19,43	13,77	14,05	15,41	13,97	14,84	13,50	13,84	12,98	21,31
57	4,30	8,09	14,71	17,05	17,03	17,08	17,17	17,16	17,08	16,03	10,28	12,92	13,21	12,49	2,48	3,32	15,39	15,24	15,45	16,14	15,41	15,77	15,25	15,31	14,71	15,59
58	4,06	7,80	21,26	18,74	18,65	18,27	19,19	19,02	20,13	15,91	10,47	14,11	14,47	12,62	3,04	4,01	19,10	16,50	16,85	19,04	16,70	15,77	15,36	16,54	15,08	20,64
59	4,26	7,46	9,39	10,70	10,70	10,70	10,70	10,70	10,57	10,64	9,35	9,58	9,66	9,62	2,09	2,80	9,97	10,32	10,37	10,46	10,37	10,61	10,57	10,35	10,37	9,95
60	3,23	5,78	13,35	11,47	11,45	11,50	11,64	11,62	12,56	11,69	9,93	10,09	13,10	8,33	3,42	4,41	13,31	9,94	10,09	10,57	10,07	11,79	10,31	10,50	9,80	13,36

Anexo 4. Matriz de distancias para el método de ahorros Parte 2

MATRIZ DE AHORRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	30
61	3,38	6,14	14,31	12,50	12,47	12,52	12,69	12,66	13,69	12,64	10,17	14,06	14,17	8,99	3,34	4,32	14,44	10,82	10,99	11,55	10,96	12,74	11,16	10,89	10,62	14,47
62	3,50	6,36	14,14	12,78	12,76	12,81	12,96	12,94	13,89	12,95	10,30	14,29	14,43	9,30	3,22	4,17	14,44	11,14	11,31	11,85	11,28	13,05	11,48	11,21	10,94	14,43
63	1,45	2,46	7,79	5,24	5,23	5,28	5,36	5,34	6,08	5,54	5,44	6,62	6,62	3,47	4,77	5,88	6,94	4,24	4,33	4,55	4,32	5,62	4,61	4,28	4,26	7,11
64	4,86	9,24	12,94	17,36	17,33	16,90	17,27	17,20	15,72	14,28	9,31	11,09	11,34	14,85	1,74	2,44	13,46	19,16	19,19	19,18	19,16	13,99	16,20	19,19	16,88	13,80
65	4,88	9,28	12,81	17,23	17,20	16,76	17,14	17,07	15,59	14,17	9,24	10,98	11,23	14,92	1,70	2,39	13,33	19,22	19,16	19,23	19,06	13,87	16,10	19,06	16,83	13,67
66	4,89	9,29	12,77	17,18	17,15	16,72	17,10	17,03	15,55	14,12	9,21	10,94	11,19	14,95	1,69	2,37	13,28	19,17	19,12	19,23	19,02	13,83	16,07	19,02	16,82	13,62
67	4,86	9,25	13,04	17,47	17,43	16,98	17,38	17,31	15,82	14,32	9,31	11,12	11,37	14,87	1,74	2,44	13,53	19,29	19,42	19,44	19,29	14,02	16,21	19,21	16,88	13,89
68	3,20	6,14	24,52	15,24	15,18	15,04	15,64	15,53	17,33	13,99	9,99	14,00	14,30	9,84	3,91	4,99	18,68	12,82	13,10	14,55	13,01	14,00	12,56	12,88	12,04	20,37
70	3,23	6,19	24,67	15,37	15,30	15,16	15,77	15,66	17,46	14,07	10,02	14,03	14,33	9,93	3,89	4,97	18,76	12,94	13,22	14,70	13,14	14,07	12,66	13,00	12,14	20,48
72	3,80	7,23	20,30	17,17	17,10	16,92	17,58	17,46	19,23	15,41	10,44	14,26	14,62	11,46	3,23	4,23	19,37	14,72	15,02	16,52	14,92	15,35	14,26	14,78	13,79	20,81
73	4,51	8,57	15,22	19,53	19,53	19,03	19,47	19,45	18,00	15,77	10,10	12,64	12,94	13,60	2,28	3,10	15,64	17,22	17,51	18,58	17,42	15,49	16,29	17,28	16,06	16,06
74	4,50	8,55	15,32	19,60	19,57	19,06	19,58	19,56	18,10	15,80	10,11	12,69	12,99	13,58	2,30	3,12	15,72	17,20	17,50	18,61	17,40	15,52	16,27	17,26	16,04	16,16
75	4,50	8,55	15,69	19,75	19,64	19,08	20,06	19,89	18,46	15,85	10,14	12,79	13,10	13,63	2,32	3,15	16,00	17,38	17,69	19,01	17,59	15,58	16,28	17,44	16,09	16,50
77	3,88	7,38	20,01	17,52	17,45	17,25	17,94	17,81	19,55	15,58	10,46	14,21	14,57	11,73	3,15	4,13	19,21	15,07	15,37	16,92	15,27	15,50	14,53	15,13	14,08	20,51
79	4,89	9,21	9,57	12,70	12,70	12,57	12,62	12,61	11,74	11,57	8,47	9,21	9,37	13,20	1,50	2,11	10,30	13,36	13,34	13,33	13,34	11,38	12,94	13,35	13,28	10,37
80	4,70	8,99	16,40	19,57	19,48	18,84	19,79	19,60	18,62	15,58	9,92	12,52	12,84	14,53	2,12	2,92	16,13	18,93	19,29	22,24	19,08	15,30	16,55	18,91	16,79	16,91
81	3,79	5,46	5,98	6,58	6,58	6,58	6,58	6,58	6,54	6,57	6,40	6,23	6,25	6,12	1,83	2,38	6,30	6,39	6,41	6,44	6,41	6,56	6,52	6,40	6,42	6,28
82	1,16	1,57	3,24	2,53	2,53	2,55	2,57	2,56	2,80	2,69	2,82	3,04	3,04	1,91	2,75	3,05	3,06	2,17	2,20	2,25	2,20	2,72	2,35	2,18	2,21	3,09
83	3,87	5,41	5,60	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,21	6,25	6,03	5,86	5,88	5,95	1,68	2,20	5,93	6,16	6,17	6,20	6,17	6,23	6,25	6,17	6,19	5,91
84	4,85	9,27	17,09	19,35	19,26	18,62	19,57	19,38	18,57	15,35	9,72	12,31	12,64	14,96	1,94	2,72	16,20	19,29	19,59	22,79	19,36	15,08	16,49	19,21	16,91	17,20
85	2,10	3,70	11,38	7,98	7,96	8,01	8,14	8,12	9,13	8,22	7,52	9,60	9,62	5,36	4,44	5,55	10,28	6,58	6,71	7,11	6,70	8,32	6,98	6,64	6,53	10,53
86	4,43	8,55	20,52	19,69	19,59	19,04	20,07	19,87	20,07	16,06	10,34	13,65	14,01	13,94	2,64	3,55	18,37	18,30	18,65	21,59	18,45	15,85	16,28	18,28	16,31	19,78
88	4,86	9,18	10,65	14,17	14,17	14,00	14,08	14,06	13,04	12,66	8,87	9,95	10,14	14,16	1,61	2,25	11,38	14,91	14,90	14,89	14,90	12,44	14,38	14,91	14,84	11,50

MATRIZ DE AHORRO	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
32	19,33																													
33	11,01	10,97																												
34	19,54	19,46	11,01																											
35	10,80	10,80	9,94	10,80																										
36	6,58	6,58	6,39	6,58	6,58																									
37	9,42	9,47	8,06	9,44	8,88	6,35																								
38	10,75	10,75	9,91	10,75	10,75	6,58	8,87																							
39	19,34	19,21	11,17	19,99	10,74	6,54	9,25	10,69																						
40	19,52	19,33	11,03	19,72	10,80	6,58	9,41	10,75	19,56																					
41	10,62	10,62	9,83	10,62	10,62	6,58	8,83	10,62	10,56	10,62																				
42	15,11	15,19	10,38	15,16	10,67	6,56	9,65	10,63	14,92	15,09	10,50																			
43	15,73	15,81	10,52	15,78	10,72	6,57	9,62	10,67	15,53	15,71	10,54	15,40																		
44	15,96	16,04	10,57	16,01	10,73	6,58	9,61	10,69	15,76	15,94	10,56	15,38	16,00																	
45	18,07	18,21	10,34	18,55	10,56	6,51	9,76	10,51	19,36	18,14	10,39	15,33	15,82	16,00																
46	14,33	14,47	9,26	14,50	9,89	6,28	9,69	9,85	14,38	14,31	9,75	13,95	14,10	14,14	16,29															
47	16,05	16,21	9,40	16,43	9,92	6,24	9,65	9,88	17,02	16,08	9,77	14,41	14,74	14,85	19,73	16,63														
48	11,12	11,25	7,43	11,26	8,27	5,60	8,82	8,25	11,10	11,10	8,18	11,15	11,18	11,18	13,14	13,38	14,32													
49	17,09	16,89	11,18	17,32	10,43	6,38	8,65	10,38	18,79	17,23	10,26	13,61	14,14	14,34	15,63	12,29	13,61	9,32												
50	17,35	17,14	11,18	17,61	10,46	6,39	8,69	10,41	19,21	17,50	10,28	13,73	14,27	14,47	15,92	12,45	13,85	9,44	19,17											
51	19,49	19,47	10,96	20,19	10,79	6,58	9,63	10,74	24,18	19,67	10,61	15,41	16,00	16,21	21,66	15,87	20,11	12,77	18,23	18,65										
52	5,41	5,39	5,46	5,41	5,37	5,16	4,94	5,37	5,45	5,41	5,37	5,27	5,30	5,31	5,18	4,88	4,83	4,20	5,45	5,45	5,37									
53	19,48	19,46	10,96	20,19	10,79	6,58	9,63	10,74	24,18	19,67	10,61	15,41	16,00	16,21	21,68	15,89	20,17	12,80	18,23	18,65	33,91	5,37								
54	17,09	16,89	11,17	17,33	10,42	6,38	8,63	10,37	18,86	17,23	10,25	13,59	14,12	14,32	15,64	12,27	13,61	9,30	19,16	19,25	18,30	5,45	18,30							
55	15,98	16,14	9,78	16,23	10,24	6,40	9,76	10,20	16,28	15,98	10,08	14,80	15,12	15,22	18,40	16,51	18,24	13,31	13,69	13,89	17,99	5,02	18,01	13,68						
56	16,13	16,29	9,47	16,50	9,98	6,27	9,67	9,94	17,05	16,16	9,83	14,49	14,83	14,93	19,76	16,65	21,53	14,22	13,70	13,94	19,98	4,86	20,03	13,69	18,32					
57	17,06	17,15	10,71	17,12	10,77	6,58	9,58	10,72	16,87	17,04	10,59	15,35	15,97	16,19	16,92	14,41	15,49	11,31	15,19	15,35	17,32	5,33	17,32	15,17	15,76	15,57				
58	18,59	18,68	10,41	19,21	10,57	6,50	9,77	10,53	21,31	18,71	10,40	15,34	15,86	16,04	22,07	16,45	20,99	13,53	16,40	16,74	25,93	5,18	25,99	16,42	18,53	20,84	17,03			
59	10,70	10,70	9,83	10,70	10,68	6,58	8,90	10,68	10,64	10,70	10,60	10,60	10,64	10,65	10,49	9,85	9,87	8,27	10,31	10,34	10,70	5,36	10,70	10,30	10,19	9,93	10,68	10,50		
60	11,48	11,60	8,16	11,58	8,99	6,02	9,38	8,96	11,34	11,46	8,89	11,70	11,69	11,68	12,88	13,24	13,39	12,67	9,91	10,01	12,48	4,60	12,49	9,89	13,09	13,37	11,73	13,01	8,98	

Anexo 4. Matriz de distancias para el método de ahorros Parte 3

MATRIZ DE AHORRO	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	12,51	12,63	8,63	12,62	9,40	6,14	9,56	9,37	12,41	12,49	9,28	12,62	12,64	12,64	14,03	14,39	14,48	13,01	10,79	10,91	13,63	4,72	13,65	10,77	14,25	14,47	12,73	14,17	9,38	13,32
62	12,79	12,91	8,88	12,90	9,63	6,24	9,65	9,60	12,67	12,77	9,51	12,94	12,95	12,95	14,16	14,43	14,42	12,64	11,11	11,22	13,78	4,82	13,80	11,09	14,35	14,43	13,03	14,25	9,61	13,10
63	5,26	5,34	3,81	5,31	4,49	3,59	5,34	4,49	5,06	5,24	4,47	5,59	5,54	5,52	6,39	6,77	7,23	7,77	4,23	4,28	5,98	2,60	6,00	4,21	6,61	7,14	5,51	6,57	4,52	6,91
64	17,20	17,00	11,19	17,43	10,46	6,40	8,69	10,41	18,87	17,35	10,29	13,69	14,23	14,43	15,75	12,38	13,73	9,40	19,09	19,20	18,32	5,45	18,32	19,09	13,79	13,81	15,28	16,51	10,34	9,98
65	17,07	16,87	11,17	17,31	10,41	6,37	8,63	10,37	18,85	17,22	10,24	13,58	14,11	14,31	15,62	12,26	13,59	9,29	19,15	19,24	18,29	5,45	18,29	19,27	13,66	13,68	15,16	16,41	10,30	9,88
66	17,03	16,82	11,17	17,27	10,40	6,37	8,60	10,35	18,84	17,17	10,22	13,54	14,07	14,27	15,58	12,21	13,55	9,25	19,10	19,22	18,27	5,44	18,28	19,22	13,62	13,63	15,11	16,37	10,28	9,84
67	17,30	17,10	11,19	17,56	10,46	6,40	8,69	10,41	19,10	17,45	10,29	13,72	14,26	14,46	15,87	12,43	13,82	9,43	19,16	19,47	18,54	5,45	18,54	19,22	13,86	13,90	15,33	16,67	10,34	10,00
68	15,18	15,34	8,77	15,57	9,39	5,96	9,37	9,36	16,35	15,22	9,25	13,68	13,96	14,06	18,99	16,18	21,10	14,83	12,74	12,99	20,43	4,54	20,52	12,74	17,47	20,66	14,64	21,11	9,36	13,34
70	15,30	15,46	8,83	15,70	9,44	5,98	9,40	9,40	16,52	15,34	9,30	13,75	14,04	14,14	19,13	16,22	21,22	14,81	12,86	13,11	20,65	4,56	20,75	12,86	17,55	20,77	14,74	21,31	9,40	13,35
72	17,09	17,25	9,90	17,52	10,28	6,39	9,75	10,24	18,24	17,14	10,12	14,96	15,37	15,51	20,95	16,63	20,94	13,80	14,64	14,90	21,09	5,02	21,13	14,64	18,62	20,93	16,28	21,89	10,22	13,22
73	19,48	19,27	11,02	19,52	10,80	6,58	9,41	10,75	19,36	19,53	10,62	15,09	15,71	15,93	18,02	14,28	15,99	11,07	17,14	17,40	19,47	5,41	19,47	17,14	15,92	16,07	17,03	18,55	10,70	11,45
74	19,54	19,36	11,01	19,62	10,80	6,58	9,42	10,75	19,42	19,59	10,62	15,12	15,74	15,96	18,13	14,34	16,09	11,13	17,12	17,38	19,57	5,41	19,57	17,12	16,01	16,17	17,07	18,66	10,70	11,49
75	19,54	19,47	11,01	20,22	10,80	6,58	9,44	10,75	19,98	19,71	10,62	15,17	15,79	16,01	18,57	14,52	16,45	11,27	17,29	17,58	20,19	5,40	20,18	17,30	16,25	16,52	17,13	19,22	10,70	11,59
77	17,44	17,59	10,05	17,89	10,38	6,43	9,77	10,34	18,67	17,49	10,21	15,10	15,54	15,69	21,36	16,56	20,62	13,62	14,98	15,26	21,42	5,07	21,46	14,99	18,62	20,62	16,51	22,15	10,32	13,13
79	12,66	12,56	11,03	12,69	9,91	6,25	7,98	9,87	13,15	12,70	9,77	11,27	11,54	11,64	11,58	9,87	10,27	7,63	13,36	13,36	12,75	5,43	12,74	13,37	10,65	10,35	11,96	11,79	9,79	8,37
80	19,32	19,19	11,18	19,97	10,74	6,53	9,24	10,69	24,63	19,54	10,56	14,90	15,51	15,74	19,29	14,34	16,95	11,06	18,80	19,23	24,06	5,45	24,06	18,87	16,24	16,98	16,85	21,21	10,63	11,32
81	6,58	6,58	6,39	6,58	6,58	6,58	6,35	6,58	6,54	6,58	6,58	6,56	6,57	6,58	6,51	6,28	6,24	5,60	6,38	6,39	6,58	5,16	6,58	6,38	6,40	6,27	6,58	6,50	6,58	6,02
82	2,54	2,57	2,16	2,55	2,46	2,35	2,83	2,46	2,42	2,53	2,46	2,71	2,69	2,68	2,88	3,04	3,11	3,28	2,16	2,18	2,69	1,89	2,69	2,16	2,98	3,09	2,65	2,90	2,48	3,13
83	6,28	6,28	6,18	6,28	6,28	6,21	5,98	6,28	6,26	6,28	6,28	6,23	6,24	6,25	6,16	5,91	5,87	5,22	6,15	6,16	6,27	5,24	6,27	6,15	6,04	5,90	6,26	6,16	6,28	5,64
84	19,10	18,97	11,20	19,75	10,63	6,46	9,05	10,58	24,50	19,32	10,45	14,67	15,29	15,52	19,55	14,21	17,33	10,92	19,16	19,59	28,59	5,46	28,71	19,26	16,19	17,30	16,63	22,57	10,52	11,11
85	7,99	8,10	5,56	8,08	6,39	4,67	7,26	6,38	7,85	7,97	6,34	8,25	8,21	9,59	9,95	10,69	11,25	6,56	6,64	9,19	3,42	9,22	6,54	9,81	10,58	8,24	9,91	6,41	9,91	
86	19,48	19,46	10,95	20,18	10,79	6,58	9,64	10,74	24,10	19,66	10,61	15,41	16,00	16,22	21,67	15,88	20,10	12,78	18,17	18,58	33,00	5,36	33,01	18,23	18,00	19,97	17,32	25,91	10,70	12,49
88	14,12	14,00	11,15	14,16	10,22	6,33	8,32	10,17	14,71	14,17	10,06	12,27	12,63	12,75	12,90	10,79	11,40	8,30	14,91	14,91	14,29	5,44	14,28	14,92	11,74	11,48	13,20	13,19	10,10	9,02

MATRIZ DE AHORRO	61	62	63	64	65	66	67	68	70	72	73	74	75	77	79	80	81	82	83	84	85	86	88
61																							
62	14,12																						
63	6,83	6,63																					
64	10,87	11,19	4,27																				
65	10,76	11,07	4,20	19,07																			
66	10,72	11,04	4,18	19,03	19,25																		
67	10,90	11,21	4,28	19,21	19,21	19,17																	
68	14,29	14,12	7,81	12,85	12,72	12,68	12,95																
70	14,32	14,15	7,78	12,97	12,84	12,80	13,07	24,51															
72	14,36	14,40	6,83	14,75	14,62	14,58	14,86	20,19	20,33														
73	12,47	12,76	5,23	17,25	17,12	17,08	17,35	15,12	15,25	17,04													
74	12,52	12,80	5,26	17,23	17,11	17,06	17,34	15,22	15,35	17,14	19,51												
75	12,63	12,91	5,32	17,41	17,29	17,24	17,53	15,59	15,73	17,54	19,52	19,62											
77	14,28	14,35	6,70	15,10	14,97	14,93	15,21	19,90	20,05	21,85	17,38	17,49	17,91										
79	8,97	9,27	3,65	13,35	13,37	13,37	13,36	9,51	9,58	10,94	12,68	12,66	12,67	11,16									
80	12,37	12,64	5,04	18,88	18,87	18,86	19,12	16,27	16,44	18,17	19,34	19,40	19,95	18,60	13,15								
81	6,14	6,24	3,59	6,40	6,37	6,37	6,40	5,96	5,98	6,39	6,58	6,58	6,58	6,43	6,25	6,53							
82	3,09	3,04	3,33	2,18	2,15	2,14	2,18	3,24	3,23	3,01	2,53	2,54	2,55	2,97	2,03	2,41	2,35						
83	5,77	5,86	3,33	6,16	6,15	6,14	6,16	5,59	5,61	6,03	6,28	6,28	6,28	6,08	6,06	6,26	6,21	2,24					
84	12,18	12,44	4,82	19,19	19,26	19,28	19,46	16,95	17,15	18,54	19,12	19,18	19,73	18,96	13,34	24,42	6,46	2,29	6,21				
85	9,90	9,61	8,40	6,62	6,53	6,50	6,64	11,40	11,37	10,18	7,96	8,00	8,09	10,01	5,51	7,82	4,67	3,37	4,34	7,61			
86	13,64	13,79	5,99	18,26	18,22	18,21	18,48	20,36	20,58	21,09	19,46	19,56	20,18	21,42	12,72	23,97	6,58	2,69	6,27	28,18	9,20		
88	9,71	10,03	3,91	14,91	14,92	14,92	14,91	10,58	10,67	12,17	14,15	14,12	14,15	12,41	13,35	14,72	6,33	2,10	6,12	14,90	5,95	14,25	

Anexo 5. Modelo TSPBTW

```
# MODELO EN AMPL CORRESPONDIENTE AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHICULOS

# Conjuntos
#param N integer > 2; # Numero de nodos

set NODOS;

set ARCOS := {i in NODOS, j in NODOS: i <> j};

set CLIENTES within NODOS;
set NODOSL within NODOS;
set NODOSB within NODOS;
set CLIENTESL within NODOS;
set CLIENTESB within NODOS;

# PARÁMETROS

param C{(i,j) in ARCOS}; # Costo de transporte del nodo i al nodo j
param s {i in NODOS} >= 0; # Tiempo duración de servicio para cada cliente i
param T{(i,j) in ARCOS} >= 0; # Tiempo de viaje del nodo i al nodo j
param a{i in NODOS}>=0; #Hora de inicio de la ventana de tiempos(en minutos) con respecto a las 8:00 am para el cliente i
param b{i in NODOS}>=0; #Hora de cierre de la ventana de tiempo (en minutos) con respecto a las 8:00 am para el nodo i
param M>=0; # Número positivo muy grande

# VARIABLES DE DECISIÓN

var X{(i,j) in ARCOS} binary; # Variable binaria igual a 1 si en la solución, el vehículo k realiza el recorrido desde i hasta j o cero (0) de lo contrario
var w{i in NODOS} >= 0; # hora de inicio del servicio(en minutos) en el nodo i cuando se sirve al cliente en el vehículo k
#var u{i in NODOS} >= 0; #Variable de ordinalidad que muestra el orden en que se visitan los clientes por cada ruta, se utiliza para eliminar los subtours

# FUNCIÓN OBJETIVO

minimize COSTO_TOTAL:
sum{(i,j) in ARCOS} C[i,j]*X[i,j];

# RESTRICCIONES

# Restricciones de Transporte

# R1 Garantiza la visita de un cliente para una entrega sólo una vez hacia otro cliente para hacer una entrega o una recogida o regrese
al depósito en cada periodo
subject to ENTRADA_CLIENTESL{j in CLIENTESL}:
sum{ i in NODOSL: j<>i}X[i,j]= 1;

# R2 Garantiza la visita de un cliente para una recogida tan sólo una vez ya sea desde el depósito o desde otro cliente al que se le realiza una
entrega en cada periodo
subject to ENTRADA_CLIENTESB{j in CLIENTESB}:
sum{ i in CLIENTES: i<>j}(X[i,j])=1;

# R3 Garantiza la salida de un nodo luego de una entrega tan sólo una vez ya sea desde un cliente al que se le hizo una entrega o desde otro cliente
al que se le realiza una recogida en cada periodo
subject to SAL_CLIENTESL{i in CLIENTESL}:
sum{ j in NODOS: j<>0 and i<>j}(X[i,j])=1;

# R4 Garantiza la salida de un nodo luego de una recogida tan solo una vez hacia otro cliente para hacer una recogida o regrese al depósito
subject to SAL_CLIENTESB{i in CLIENTESB}:
sum{ j in NODOSB: j<>i} X[i,j] = 1;

# R5 Asegura que desde el depósito se salga por cada ruta únicamente a un cliente para hacer una recogida en cada periodo
subject to SAL_DEP:
sum{j in CLIENTESL: j>0 }X[0,j]=1;

# R6 Asegura que se llegue al depósito por cada tan sola una vez desde un cliente para cada periodo
subject to LLEG_DEP:
sum{i in CLIENTESB: i>0 }X[i,1010]=1;

# Restricciones de ventanas de tiempo

# R7 Restricción para cumplir ventana de tiempo
subject to VENTANA_T{(i, j) in ARCOS}:
w[i]+ s[i] + T[i,j] - M*(1-X[i,j]) <= w[j];

# R8 hora de servicio debe ser mayor a la apertura de la ventana de tiempo
subject to INICIO_VENTANA{ i in NODOS}:
a[i]<= w[i];

# R9 la hora en la que servimos al cliente debe ser menor a la hora de cierre de la ventana tiempo
subject to CIERRE_VENTANA{ i in NODOS}:
w[i]<= b[i];

# R10 Ventana inicial para depósito
subject to VENTANA_INICIAL{ i in NODOS: i=0}:|
w[i]= 0;
```

Anexo 6. Modelo TSPTW

```
# MODELO EN AMPL CORRESPONDIENTE AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHICULOS

# Conjuntos
#param N integer > 2; # Numero de nodos

set NODOS;

set ARCOS := {i in NODOS, j in NODOS: i <> j};

set CLIENTES within NODOS;

# PARÁMETROS

param C{(i,j) in ARCOS}; # Costo de transporte del nodo i al nodo j

param s {i in NODOS} >= 0; # Tiempo duración de servicio para cada cliente i

param T{(i,j) in ARCOS} >= 0; # Tiempo de viaje del nodo i al nodo j

param a{i in NODOS}>=0; #Hora de inicio de la ventana de tiempos(en minutos) con respecto a las 8:00 am para el cliente i

param b{i in NODOS}>=0; #Hora de cierre de la ventana de tiempo (en minutos) con respecto a las 8:00 am para el nodo i

param M>=0; # Número positivo muy grande

# VARIABLES DE DECISIÓN

var X{(i,j) in ARCOS} binary; # Variable binaria igual a 1 si en la solución, el vehículo k realiza el recorrido desde i hasta j o cero (0) de lo contrario

var w{i in NODOS} >=0; # hora de inicio del servicio(en minutos) en el nodo i cuando se sirve al cliente en el vehículo k

# FUNCIÓN OBJETIVO

minimize COSTO_TOTAL:
sum{(i,j) in ARCOS} C[i,j]*X[i,j];

# RESTRICCIONES

# Restricciones de Transporte

# R1 Garantiza la visita de un cliente para una entrega sólo una vez hacia otro cliente para hacer una entrega o una recogida
# regrese al depósito en cada periodo
subject to ENTRADA_CLIENTES{j in CLIENTES}:
sum{ i in NODOS: j<>i}X[i,j]= 1;

# R3 Garantiza la salida de un nodo luego de una entrega tan sólo una vez ya sea desde un cliente al que se le hizo una entrega
o desde otro cliente al que se le realiza una recogida en cada periodo
subject to SAL_CLIENTES{i in CLIENTES}:
sum{ j in NODOS: j<>0 and i<>j}X[i,j]<=1;

# R5 Asegura que desde el depósito se salga por cada ruta únicamente a un cliente para hacer una recogida en cada periodo
subject to SAL_DEP:
sum{j in CLIENTES: j>0 }X[0,j]=1;

# Restricciones de ventanas de tiempo

# R7 Restricción para cumplir ventana de tiempo
subject to VENTANA_T{(i, j) in ARCOS}:
w[i]+ s[i] + T[i,j] - M*(1-X[i,j]) <= w[j];

# R8 hora de servicio debe ser mayor a la apertura de la ventana de tiempo
subject to INICIO_VENTANA{ i in NODOS}:
a[i]<= w[i];

# R9 la hora en la que servimos al cliente debe ser menor a la hora de cierre de la ventana tiempo
subject to CIERRE_VENTANA{ i in NODOS}:
w[i]<= b[i];

# R10 Ventana inicial para depósito
subject to VENTANA_INICIAL{ i in NODOS: i=0}:
w[i]= 0;
```

Anexo 7. Modelo TSPB

```
# MODELO EN AMPL CORRESPONDIENTE AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHICULOS

# Conjuntos
#param N integer > 2; # Numero de nodos

set NODOS;

set ARCOS := {i in NODOS, j in NODOS: i <> j};

set CLIENTES within NODOS;

# PARÁMETROS

param C{(i,j) in ARCOS}; # Costo de transporte del nodo i al nodo j

param M>=0; # Número positivo muy grande

# VARIABLES DE DECISIÓN

var X{(i,j) in ARCOS} binary; # Variable binaria igual a 1 si en la solución, el vehículo k realiza el recorrido desde i hasta j o cero (0) de lo contrario
var u{i in NODOS} >= 0; #Variable de ordinalidad que muestra el orden en que se visitan los clientes por cada ruta, se utiliza para eliminar los subtours

# FUNCIÓN OBJETIVO

minimize COSTO_TOTAL:
sum{(i,j) in ARCOS} C[i,j]*X[i,j];

# RESTRICCIONES

# Restricciones de Transporte

# R1 Garantiza la visita de un cliente para una entrega sólo una vez hacia otro cliente para hacer una entrega o una recogida
o regrese al depósito en cada periodo
subject to ENTRADA_CLIENTES{j in CLIENTES}:
sum{ i in NODOS: j<>i}X[i,j]= 1;

# R3 Garantiza la salida de un nodo luego de una entrega tan sólo una vez ya sea desde un cliente al que se le hizo una entrega
o desde otro cliente al que se le realiza una recogida en cada periodo
subject to SAL_CLIENTES{i in CLIENTES}:
sum{ j in NODOS: j<>23 and i<>j}(X[i,j])<=1;

# R5 Asegura que desde el depósito se salga por cada ruta únicamente a un cliente para hacer una recogida en cada periodo
subject to SAL_DEP:
sum{j in CLIENTES: j<>23 }X[23,j]=1;

# R6 Asegura que se llegue al depósito por cada tan sola una vez desde un cliente para cada periodo
subject to LLEG_DEP:
sum{i in CLIENTES: i<>23 }X[i,1010]=1;

# R7 Relación de variables, asegura que se visita a un cliente sólo si el vehículo ha sido asignado para recorrer el arco
en cada periodo ya sea para una entrega o una recogida
subject to REL_VAR{h in CLIENTES}:
sum{i in NODOS: h<>i}(X[i,h])-sum{j in NODOS: j<>h}(X[h,j])=0;

# R9 Restriccion de eliminacion de subtours
#Elimina posibilidad de formar circuitos cerrados como subconjuntos de clientes backhauls
subject to ELIM_SUBTOURB{ (i,j) in ARCOS:i>=1 and j>0}:
u[i] + 1 <= u[j] + M*(1-X[i,j]);
```

Anexo 8. Resultado Escenario 1. RUTA 1

Resultado TSPTW

```
*****  
RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW  
*****
```

COSTO TOTAL = 42.1

Secuencia de clientes a establecer =

```
X :=  
0 75 1.0  
3 68 1.0  
9 34 1.0  
30 56 1.0  
34 23 1.0  
39 84 1.0  
45 9 1.0  
47 3 1.0  
51 53 1.0  
53 86 1.0  
56 47 1.0  
58 77 1.0  
68 70 1.0  
70 72 1.0  
72 45 1.0  
75 80 1.0  
77 30 1.0  
80 39 1.0  
84 51 1.0  
86 58 1.0  
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=  
3 240.0  
9 445.7  
23 480.0  
30 207.4  
34 467.5  
39 82.6  
45 434.6  
47 227.9  
51 110.8  
53 121.1  
56 217.6  
58 155.8  
68 270.0  
70 400.0  
72 413.1  
75 60.0  
77 186.1  
80 72.5  
84 96.4  
86 131.8  
;
```

Resultado TSPB

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 37.0

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      123   130   134   139   145   147   151   :=
23     1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
153    0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0
156    0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
168    0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0
175    0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0
177    0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0
180    0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0

:      153   156   158   168   170   172   175   :=
130    0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0
147    0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
158    0.0   0.0   .    0.0   1.0   0.0   0.0
184    1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
186    0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0
213    0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0
219    0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0

:      177   180   184   186   213   219   1010   :=
123    0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
134    0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0
139    0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0
145    0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0
151    0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0
170    0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0
172    1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=
130   181.9
134   266.9
139    31.5
145   224.0
147   161.4
151    70.2
153    59.9
156   171.7
158   104.6
168   139.3
170   119.1
172   192.8
175   256.8
177   203.2
180    21.5
184    45.4
186    80.6
213   129.1
219   235.1
1010  1424.0
;
```

Resultado TSPBTW

```

*****
RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW
*****

```

COSTO TOTAL = 85.3

Secuencia de clientes a establecer =

```

X [*,*]
:      3      9      23      30      34      39      45      :=
23      0.0      0.0      .      0.0      1.0      0.0      0.0
34      0.0      1.0      0.0      0.0      .      0.0      0.0
45      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      .
47      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
72      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
77      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
80      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0

:      47      51      53      56      58      68      70      :=
3      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
30      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
51      0.0      .      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
56      1.0      0.0      0.0      .      0.0      0.0      0.0
68      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      .      1.0
84      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
86      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0

:      72      75      77      80      84      86      123      :=
0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
39      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
53      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
58      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
70      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
75      0.0      .      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
180     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0

:      130     134     139     145     147     151     153      :=
123     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
151     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      .      1.0
156     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
168     0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
177     0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
184     0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
186     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0

:      156     158     168     170     172     175     177      :=
130     0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
134     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
145     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
147     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
170     0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0
172     0.0      0.0      0.0      0.0      .      0.0      1.0
213     0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0

:      180     184     186     213     219     1010      :=
9      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
139     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
153     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
158     0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
175     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
219     0.0      0.0      0.0      1.0      .      0.0
;

```

```

Hora estimada de servicio =

w [*] :=
3 240.0      72 413.1      156 571.0
9 473.4      75 60.0       158 635.6
23 439.1     77 186.1      168 538.6
30 207.4     80 72.5       170 528.4
34 461.6     84 105.6      172 592.1
39 82.6      86 149.7      175 1419.9
45 424.3     123 1387.4     177 602.5
47 227.9     130 581.2     180 718.8
51 120.0     134 1409.9     184 694.9
53 139.0     139 708.8     186 649.6
56 217.6     145 623.3     213 518.4
58 173.7     147 560.7     219 493.4
68 270.0     151 670.1     1010 1440.0
70 400.0     153 680.4
;

```

Anexo 9. Resultado Escenario 1. RUTA 2

Resultado TSPTW

```
*****
RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW
*****

COSTO TOTAL =          13.3

Secuencia de clientes a establecer =

X :=
0  6    1.0
4  25   1.0
5  40   1.0
6  32   1.0
7  74   1.0
8  7    1.0
21 67   1.0
25 28   1.0
28 49   1.0
31 73   1.0
32 8    1.0
40 4    1.0
49 65   1.0
50 22   1.0
54 21   1.0
65 54   1.0
67 50   1.0
73 5    1.0
74 31   1.0
;

Hora estimada de servicio =

w [*] :=
4  397.6
5  130.4
6   9.5
7  60.0
8  49.9
21 480.0
22 660.0
25 409.6
28 419.7
31 90.3
32 19.8
40 140.5
49 429.8
50 639.9
54 459.9
65 439.9
67 629.8
73 120.4
74 70.3
;
```

Resultado TSPB

```
*****  
RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW  
*****
```

COSTO TOTAL = 13.3

Secuencia de clientes a establecer =

```
X :=  
22 122 1.0  
121 154 1.0  
122 150 1.0  
125 173 1.0  
128 125 1.0  
131 174 1.0  
132 216 1.0  
140 214 1.0  
149 128 1.0  
150 167 1.0  
154 165 1.0  
165 149 1.0  
167 121 1.0  
173 131 1.0  
174 215 1.0  
214 217 1.0  
215 140 1.0  
216 1010 1.0  
217 218 1.0  
218 132 1.0  
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=  
121 40.3  
125 120.7  
128 110.6  
131 142.8  
132 1400.4  
140 1359.8  
149 100.5  
150 10.1  
154 60.4  
165 80.4  
167 30.2  
173 132.7  
174 172.8  
214 1369.8  
215 1349.8  
216 1410.7  
217 1380.1  
218 1390.2  
1010 1430.2  
;
```

Anexo 10. Resultado Escenario 1. RUTA 3

Resultado TSPTW

```
*****  
RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW  
*****
```

COSTO TOTAL = 21.3

Secuencia de clientes a establecer =

```
X :=  
0 11 1.0  
10 26 1.0  
11 88 1.0  
13 14 1.0  
14 46 1.0  
26 42 1.0  
27 57 1.0  
29 66 1.0  
42 13 1.0  
43 10 1.0  
44 43 1.0  
46 55 1.0  
55 20 1.0  
57 44 1.0  
64 27 1.0  
66 64 1.0  
88 29 1.0  
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=  
10 220.0  
11 65.1  
13 252.5  
14 262.7  
20 440.0  
26 230.2  
27 173.2  
29 120.0  
42 240.5  
43 210.0  
44 195.5  
46 293.7  
55 304.8  
57 184.9  
64 161.5  
66 151.3  
88 88.9  
;
```

Resultado TSPB

RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 21.3

Secuencia de clientes a establecer =

X :=
20 120 1.0
110 144 1.0
111 1010 1.0
113 142 1.0
114 113 1.0
120 155 1.0
126 143 1.0
127 164 1.0
129 188 1.0
142 126 1.0
143 110 1.0
144 157 1.0
146 114 1.0
155 146 1.0
157 127 1.0
164 166 1.0
166 129 1.0
188 111 1.0
;

Hora estimada de servicio =

W [*] :=
110 105.6
111 1405.0
113 63.1
114 32.9
126 85.4
127 137.9
129 1340.1
142 75.2
143 95.5
144 115.7
146 21.9
155 10.8
157 126.2
164 1318.6
166 1328.8
188 1371.2
1010 1430.3
;

Resultado TSPBTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 42.6

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      10      11      13      14      20      26      27      :=
0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
10      .      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
13      0.0      0.0      .      1.0      0.0      0.0      0.0
42      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
43      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
55      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
64      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0

:      29      42      43      44      46      55      57      :=
14      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
26      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
27      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
44      0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0
46      0.0      0.0      0.0      0.0      .      1.0      0.0
57      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      .
88      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0

:      64      66      88      110      111      113      114      :=
11      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
29      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
66      1.0      .      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
114      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      .
143      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
146      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
188      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0

:      120      126      127      129      142      143      144      :=
20      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
110      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
113      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
126      0.0      .      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
142      0.0      1.0      0.0      0.0      .      0.0      0.0
157      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
166      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0

:      146      155      157      164      166      188      1010      :=
111      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
120      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
127      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
129      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
144      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
155      1.0      .      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
164      0.0      0.0      0.0      .      1.0      0.0      0.0
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=
10 215.6      55 300.4      129 1349.9
11 15.0       57 184.9      142 1253.9
13 248.1      64 161.5      143 1274.3
14 258.3      66 151.3      144 1294.4
20 311.2      88 38.8       146 1200.6
26 225.8      110 1284.3     155 1189.5
27 173.2      111 1414.8     157 1305.0
29 120.0      113 1241.8     164 1328.3
42 236.0      114 1211.7     166 1338.6
43 205.6      120 1178.7     188 1380.9
44 195.5      126 1264.1     1010 1440.0
46 289.3      127 1316.7
;
```

Anexo 11. Resultado Escenario 1. RUTA 4

Resultado TSPTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 38.9

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
: 1 2 17 18 19 33 35 36 :=
0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
2 0.0 . 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
17 0.0 0.0 . 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
18 0.0 0.0 0.0 . 1.0 0.0 0.0 0.0
38 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
52 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
82 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
83 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

: 37 38 41 48 52 59 60 61 :=
33 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
35 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
41 0.0 0.0 . 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
48 0.0 0.0 0.0 . 0.0 0.0 1.0 0.0
59 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 . 0.0 0.0
60 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 . 1.0
81 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
85 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0

: 62 63 79 81 82 83 85 :=
1 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
19 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
36 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
37 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
61 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
62 . 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
63 0.0 . 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=
1 330.0 35 155.8 52 210.0 79 510.0
2 75.4 36 52.6 59 176.0 81 199.1
17 88.3 37 187.3 60 381.1 82 40.0
18 2.7 38 120.0 61 485.0 83 62.8
19 15.0 41 165.9 62 495.4 85 357.5
33 108.9 48 369.7 63 345.5
;
```

Resultado TSPB

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 27.7

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      117      118      119      133      135      136      137      :=
117      .      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
119      0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0      0.0
138      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
159      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
163      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
179      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
181      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0

:      138      141      148      152      159      160      161      :=
135      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
136      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
141      1.0      .      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
160      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      .      0.0
161      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      .
162      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
211      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0

:      162      163      179      181      182      183      185      :=
79      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
118      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
137      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
148      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
152      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
183      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      .      0.0
185      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      .

:      211      212      1010      :=
133      0.0      1.0      0.0
182      0.0      0.0      1.0
212      1.0      .      0.0
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=
117      11.1      141 1277.2      181      79.6
118 1410.0      148 1363.6      182 1421.6
119 1399.4      152      58.7      183      69.4
133      23.4      159 1307.4      185 1375.8
135 1297.3      160 1352.1      211      47.5
136 1265.2      161 1341.5      212      35.2
137 1318.7      162 1331.2      1010 1433.3
138 1287.3      163 1387.8
;
```

Resultado TSPBTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 66.6

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      1      2      17      18      19      33      35      :=
0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
2      0.0      .      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
17     0.0      0.0      .      0.0      0.0      1.0      0.0
18     0.0      0.0      0.0      .      1.0      0.0      0.0
38     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
52     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
83     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0

:      36      37      38      41      48      52      59      :=
33     0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
35     0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
41     0.0      0.0      0.0      .      0.0      0.0      1.0
59     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      .
81     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
82     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
85     0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0

:      60      61      62      63      79      81      82      :=
1      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
19     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
37     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
48     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
60     .      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
61     0.0      .      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
62     0.0      0.0      .      0.0      1.0      0.0      0.0

:      83      85      117      118      119      133      135      :=
36     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
63     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
117     0.0      0.0      .      0.0      0.0      1.0      0.0
119     0.0      0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0
138     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
163     0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
179     0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0

:      136      137      138      141      148      152      159      :=
135     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
141     0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0
159     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      .
160     0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
181     0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
183     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
211     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0

:      160      161      162      163      179      181      182      :=
79      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
118     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
136     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
137     0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
161     1.0      .      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
162     0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0      0.0
185     0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0

:      183      185      211      212      1010      :=
133     0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
148     0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
152     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
182     0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
212     0.0      0.0      1.0      .      0.0
;
```

```

Hora estimada de servicio =

w [*] :=
1 330.0      62 402.1      148 1370.3
2 75.4       63 345.5      152 485.5
17 88.3      79 416.7      159 1314.1
18 2.7       81 199.1      160 1358.8
19 15.0      82 40.0       161 1348.2
33 108.9     83 62.8       162 1337.9
35 155.8     85 357.5      163 1394.5
36 52.6     117 437.8      179 426.7
37 187.3    118 1416.7     181 1271.9
38 120.0    119 1406.1     182 1428.3
41 165.9    133 450.1      183 1251.7
48 369.7    135 1304.0     185 1382.5
52 210.0    136 1261.9     211 474.3
59 176.0    137 1325.4     212 462.0
60 381.1    138 1294.0    1010 1440.0
61 391.8    141 1283.9
;

```

Anexo 12. Resultado Escenario 2. RUTA 1

Resultado TSPTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 43.9

Secuencia de clientes a establecer =

```

X [*,*]
: 3 4 7 8 9 23 30 34 :=
0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
4 0.0 . 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
8 0.0 0.0 1.0 . 0.0 0.0 0.0
9 0.0 0.0 0.0 0.0 . 0.0 0.0
34 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 .
45 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
47 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
77 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0

: 39 45 47 51 53 56 58 68 :=
3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
23 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
30 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
51 0.0 0.0 0.0 . 1.0 0.0 0.0
56 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 . 0.0
72 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
84 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
86 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0

: 70 72 75 77 80 84 86 :=
7 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
53 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
58 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
68 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
70 . 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
75 0.0 0.0 . 0.0 1.0 0.0 0.0
80 0.0 0.0 0.0 0.0 . 1.0 0.0
;
  
```

Hora estimada de servicio =

```

w [*] :=
3 240.0 30 207.4 53 121.2 75 70.1
4 467.5 34 457.2 56 217.6 77 186.1
7 60.0 39 501.5 58 155.9 80 82.6
8 49.9 45 424.3 68 270.0 84 96.5
9 435.4 47 227.9 70 400.0 86 131.9
23 480.0 51 110.9 72 413.1
;
  
```

Resultado TSPB

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 37.9

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      123   130   134   139   145   147   151   :=
39      0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0
153      0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0
156      0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
168      0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0
175      0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0
177      0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0
180      1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0

:      153   156   158   168   170   172   175   :=
130      0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0
147      0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
158      0.0   0.0   .   0.0   1.0   0.0   0.0
184      1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
186      0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0
213      0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0
217      0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0

:      177   180   184   186   213   214   217   :=
123      0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0
134      0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0
139      0.0   1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
151      0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0   0.0
170      0.0   0.0   0.0   0.0   1.0   0.0   0.0
172      1.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
218      0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   1.0

:      218   219  1010   :=
145      0.0   1.0   0.0
214      0.0   0.0   1.0
219      1.0   .   0.0
.
```

Hora estimada de servicio =

```
W [*] :=
123   21.5   158  105.4   186   81.4
130  182.6   168  140.0   213  129.9
134  287.7   170  119.9   214  298.0
145  224.7   172  193.5   217  267.6
147  162.2   175  277.7   218  257.5
151   70.9   177  203.9   219  235.8
153   60.7   180   10.1  1010 1427.6
156  172.4   184   46.2

;
```

Resultado TSPBTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 81.3

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      3      4      7      8      9      23      30      :=
0      0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0
4      0.0      .    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0
8      0.0    0.0    1.0      .    0.0    0.0    0.0
34     0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
45     0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
47     1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
77     0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0

:      34      39      45      47      51      53      56      :=
9      1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
30     0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0
39     0.0      .    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
51     0.0    0.0    0.0    0.0      .    1.0    0.0
56     0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0      .
72     0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0
80     0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

:      58      68      70      72      75      77      80      :=
3      0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
7      0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
58      .    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0
68     0.0      .    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0
70     0.0    0.0      .    1.0    0.0    0.0    0.0
75     0.0    0.0    0.0    0.0      .    0.0    1.0
86     1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

:      84      86      123     130     134     139     145     :=
23     1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
53     0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
134    0.0    0.0    0.0    0.0      .    1.0    0.0
156    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0
175    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
177    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0
180    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0

:      147     151     153     156     158     168     170     :=
147      .    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0
153     0.0    1.0      .    0.0    0.0    0.0    0.0
158     0.0    0.0    0.0    0.0      .    0.0    1.0
168     1.0    0.0    0.0    0.0    0.0      .    0.0
184     0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0
186     0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
213     0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0

:      172     175     177     180     184     186     213     :=
84      0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
130     1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
139     0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0
151     0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0
170     0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0
172      .    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0
214     0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

:      214     217     218     219    1010     :=
123     0.0    0.0    0.0    0.0    1.0
145     0.0    0.0    0.0    1.0    0.0
217     0.0      .    1.0    0.0    0.0
218     1.0    0.0      .    0.0    0.0
219     0.0    1.0    0.0      .    0.0
;
```

```

Hora estimada de servicio =

w [*] :=
3 240.0      70 400.0      158 573.8
4 467.4      72 413.1      168 608.4
7 60.0       75 70.1       170 588.2
8 49.9       77 186.1      172 661.9
9 435.4      80 82.6       175 1364.5
23 479.9     84 504.5      177 1280.4
30 207.4     86 149.7      180 1397.1
34 457.2     123 1408.6     184 514.5
39 104.8     130 651.0     186 549.8
45 424.3     134 1374.5     213 598.3
47 227.9     139 1387.0     214 1354.3
51 120.0     145 1301.2     217 1333.9
53 139.0     147 630.5     218 1344.0
56 217.6     151 539.3     219 1312.3
58 173.7     153 529.1     1010 1440.0
68 270.0     156 640.8
:

```

Anexo 13. Resultado Escenario 2. RUTA 2

Resultado TSPTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 17.2

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
: 5 6 10 21 22 25 26 27 :=
6 0.0 . 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
25 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 . 0.0 0.0
26 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 . 1.0
28 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
31 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
40 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
43 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
50 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0

: 28 29 31 32 40 42 43 44 :=
0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
5 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
10 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
27 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
32 0.0 0.0 0.0 . 1.0 0.0 0.0 0.0
42 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 . 0.0 1.0
57 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
64 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

: 49 50 54 57 64 65 :=
21 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
22 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
29 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
44 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
49 . 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
54 0.0 0.0 . 0.0 0.0 1.0
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=
5 79.9 26 156.1 40 51.5 54 480.0
6 120.2 27 168.1 42 7.7 57 30.0
10 132.0 28 300.0 43 145.9 64 210.0
21 350.5 29 178.8 44 18.2 65 600.0
22 320.2 31 90.0 49 469.9
25 310.1 32 41.2 50 330.3
;
```

Resultado TSPB

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 14.9

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      110  121  122  125  126  127  128  :=
25      0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0  0.0
125      0.0  0.0  1.0  .    0.0  0.0  0.0
129      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0
143      0.0  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0
144      1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
150      0.0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
164      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1.0

:      129  131  132  140  142  143  144  :=
110      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0
126      0.0  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0
128      1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
131      0.0  .    1.0  0.0  0.0  0.0  0.0
140      0.0  1.0  0.0  .    0.0  0.0  0.0
157      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1.0
215      0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0  0.0

:      149  150  154  157  164  165  215  :=
121      0.0  0.0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0
122      0.0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
127      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1.0
149      .    0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0
154      0.0  0.0  .    0.0  0.0  1.0  0.0
165      1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  .    0.0
216      0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0  0.0

:      216  1010  :=
132      1.0  0.0
142      0.0  1.0
:
```

Hora estimada de servicio =

```
W [*] :=
110 1382.2    131 204.6    154 70.5
121 50.4     132 234.8    157 1361.5
122 20.1     140 194.4    164 120.7
125 10.0     142 1412.6   165 90.5
126 1402.4   143 1392.2   215 184.4
127 172.6    144 1372.1   216 1350.4
128 130.7    149 110.6   1010 1430.3
129 141.9    150 30.2

;
```

Anexo 14. Resultado Escenario 2. RUTA 3

Resultado TSPTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 33.6

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
: 11 13 14 17 20 33 35 38 :=
0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
11 . 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
35 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 . 0.0
38 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 .
46 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
55 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
62 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
88 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0

: 41 46 48 55 60 61 62 66 :=
13 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
14 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
17 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
20 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
60 0.0 0.0 1.0 0.0 . 0.0 0.0 0.0
61 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 . 0.0 0.0
73 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
85 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

: 67 73 74 79 85 88 :=
33 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
41 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
48 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
66 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
67 . 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
74 0.0 1.0 . 0.0 0.0 0.0
;
```

Hora estimada de servicio =

```
W [*] :=
11 15.0 35 120.0 60 411.4 74 208.6
13 390.4 38 36.3 61 400.7 79 510.0
14 350.2 41 450.0 62 380.3 85 435.0
17 173.9 46 339.2 66 186.1 88 143.0
20 252.6 48 422.8 67 196.4
33 131.1 55 241.8 73 228.6
;
```

Resultado TSPB

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 29.3

Secuencia de clientes a establecer =

X [*,*]
 : 111 113 114 117 120 133 135 :=
 135 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 .
 138 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
 146 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 155 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
 162 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 185 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 188 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0

 : 138 141 146 148 155 160 161 :=
 111 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 113 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
 120 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 141 1.0 . 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 160 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 . 0.0
 161 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 .
 174 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0

 : 162 166 167 173 174 179 185 :=
 79 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
 114 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 117 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 148 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
 166 0.0 . 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 167 0.0 0.0 . 1.0 0.0 0.0 0.0
 173 0.0 0.0 0.0 . 1.0 0.0 0.0

 : 188 1010 :=
 133 0.0 1.0
 179 1.0 0.0
 :

Hora estimada de servicio =

w [*] :=
 111 1365.3 141 1386.6 167 64.2
 113 1306.9 146 1255.8 173 76.3
 114 1266.8 148 1339.4 174 86.4
 117 41.7 155 109.5 185 1351.6
 120 1244.4 160 1327.9 188 10.8
 133 1417.7 161 1317.3 1010 1433.3
 135 1406.7 162 1296.9
 138 1396.6 166 54.0
 ;

Resultado TSPBTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 60.4

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      11      13      14      17      20      33      35      :=
0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
38      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
41      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
46      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
55      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
62      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
66      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0

:      38      41      46      48      55      60      61      :=
11      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
13      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
20      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
35      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
60      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      .      1.0
61      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      .
79      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0

:      62      66      67      73      74      79      85      :=
14      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
33      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
48      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
67      0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0      0.0
73      0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0
74      0.0      0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0
88      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0

:      88      111      113      114      117      120      133      :=
17      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
141      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
146      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
161      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
162      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
166      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
179      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0

:      135      138      141      146      148      155      160      :=
114      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0
120      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
133      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
135      .      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
138      0.0      .      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
148      0.0      0.0      0.0      0.0      .      0.0      1.0
185      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0

:      161      162      166      167      173      174      179      :=
113      0.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
155      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
160      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
167      0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0      0.0
173      0.0      0.0      0.0      1.0      .      0.0      0.0
174      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      .      0.0
188      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0

:      185      188      1010      :=
85      1.0      0.0      0.0
111      0.0      0.0      1.0
117      0.0      1.0      0.0
;
```

```

Hora estimada de servicio =

w [*] :=
11 15.0      66 222.7      141 1403.5
13 501.3     67 212.5      146 1229.4
14 461.1     73 200.3      148 547.6
17 235.0     74 180.3      155 1251.5
20 438.2     79 390.0      160 559.1
33 165.9     85 525.4      161 569.7
35 120.0     88 245.9      162 590.1
38 36.3      111 1414.8     166 1307.1
41 154.8     113 580.1      167 1296.9
46 426.8     114 1198.3     173 1284.7
48 513.3     117 1319.4     174 1264.7
55 449.0     120 1240.8     179 1361.1
60 405.0     133 1372.3     185 535.4
61 415.6     135 1383.4     188 1330.3
62 491.2     138 1393.4    1010 1440.0
;

```

Anexo 15. Resultado Escenario 2. RUTA 4

Resultado TSPTW

```
*****  
RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW  
*****
```

COSTO TOTAL = 21.5

Secuencia de clientes a establecer =

```
X :=  
0 83 1.0  
1 2 1.0  
18 19 1.0  
19 63 1.0  
36 82 1.0  
37 59 1.0  
52 1 1.0  
59 81 1.0  
63 37 1.0  
81 52 1.0  
82 18 1.0  
83 36 1.0  
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=  
1 330.0  
2 342.3  
18 67.7  
19 78.4  
36 43.5  
37 103.9  
52 210.0  
59 115.3  
63 90.0  
81 199.1  
82 56.2  
83 33.3  
.
```

Resultado TSPB

```
*****  
RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW  
*****
```

COSTO TOTAL = 17.2

Secuencia de clientes a establecer =

```
X :=  
2 212 1.0  
118 182 1.0  
119 118 1.0  
136 159 1.0  
137 163 1.0  
152 183 1.0  
159 137 1.0  
163 119 1.0  
181 136 1.0  
182 1010 1.0  
183 181 1.0  
211 152 1.0  
212 211 1.0  
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=  
118 123.9  
119 113.3  
136 64.3  
137 87.7  
152 33.5  
159 76.4  
163 101.7  
181 54.3  
182 135.5  
183 44.1  
211 22.3  
212 10.0  
1010 147.2  
;
```

Resultado TSPBTW

 RESULTADOS DEL PROBLEMA VRPTW

COSTO TOTAL = 38.7

Secuencia de clientes a establecer =

```
X [*,*]
:      1      2      18      19      36      37      52      :=
1      .      1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
19     0.0    0.0    1.0      .      0.0    0.0    0.0
52     1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0      .
59     0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0
63     0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0
81     0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0
83     0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0

:      59      63      81      82      83      118      119      :=
0      0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
18     0.0    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0
36     1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
37     0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
82     0.0    0.0    1.0      .      0.0    0.0    0.0
119    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0      .
163    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0

:      136     137     152     159     163     181     182      :=
118    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0
136     .      0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0
137    0.0      .      0.0    0.0    1.0    0.0    0.0
159    0.0    1.0    0.0      .      0.0    0.0    0.0
181    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0      .      0.0
183    0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0
211    0.0    0.0    1.0    0.0    0.0    0.0    0.0

:      183     211     212     1010      :=
2      0.0    0.0    1.0    0.0
152    1.0    0.0    0.0    0.0
182    0.0    0.0    0.0    1.0
212    0.0    1.0      .      0.0
;
```

Hora estimada de servicio =

```
w [*] :=
  1 330.0      81 195.0      163 1389.1
  2 342.3      82 131.6      181 1341.8
 18 120.0      83  50.2      182 1423.0
 19 109.3     118 1411.4      183 1331.6
 36  60.4     119 1400.7      211 1309.7
 37  83.8     136 1351.8      212 1297.5
 52 210.0     137 1375.2     1010 1434.6
 59  72.5     152 1321.0
 63  97.7     159 1363.9
;
```

