



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN SISTEMAS-INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

**Rediseño de rutas de recolección de residuos sólidos mediante
el Problema de Ruteo de Vehículos Capacitados sobre Arcos**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

P R E S E N T A:

YAZMIN PINEDA AMADOR

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS,
Facultad de Ingeniería
México, D.F. Junio 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Sanchez Larios Hérica
Secretario: M. I. Resendiz Lopez Héctor Daniel
Vocal: Dra. Elizondo Cortés Mayra
1 er. Suplente: Dra. Monrroy Leon Cozumel Allanec
2 do. Suplente: M. en I. Girard Islas Adrián

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: UNAM, Facultad de Ingeniería.

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

Un gran descubrimiento resuelve un gran problema, pero en la solución de cualquier problema hay una pizca de descubrimiento.

Tu problema puede ser modesto, pero si es un reto para tu curiosidad y hace que entren en juego tus facultades de inventiva, y si lo resuelves con tus propios medios, experimentarás la tensión y gozarás el triunfo del descubrimiento.

George Polya.

AGRADECIMIENTOS

A mi amada UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO que me ha dado tanto y que con la conclusión de este trabajo no le digo adiós sino hasta luego.

A mis padres y hermanos por apoyarme siempre en las decisiones que he tomado, en especial a mi mamá por su maravillosa frase en mi cabeza “haz lo que puedas” llevádome lejos más allá de lo que imagine.

A mis amigas y amigos que son lo mejor de la vida junto con la familia.

Al Posgrado de Ingeniería por recibirme con los brazos abiertos, donde encontré nuevos amigos, profesores y valiosos conocimientos con un enfoque distinto al que estaba acostumbrada en Ciencias.

A mis sinodales y directora de tesis por su tiempo paciencia e importantes aportaciones.

En especial a la Dra. Mayra E. por ser mi todo, mi jefa, maestra, tutora y amiga, muchas gracias.

A todos los que hicieron posible la conclusión de este trabajo, en especial a Cesar Cruz y Madrid por su amabilidad, tiempo e información compartida. A Moisés por su paciencia, tiempo y apoyo.

Índice general

Lista de Figuras	7
Lista de tablas	10
Introducción	13
1. Descripción del sistema bajo estudio	15
1.1. Sistema de manejo de residuos sólidos en el Distrito Federal . . .	15
1.1.1. Generación de residuos	16
1.1.2. Recolección de residuos	16
1.1.3. Transferencia de residuos	18
1.1.4. Selección y disposición final	20
1.2. El Sector 2 de la Delegación Iztacalco	22
1.3. Planteamiento del problema	34
1.4. Propuesta de solución	36
1.5. Objetivo general	37
2. Marco de Referencia	39
2.1. Estado del arte del problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos	39
2.1.1. Líneas de investigación	42
2.2. Marco teórico	42
2.2.1. Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos	44
2.2.2. Complejidad computacional de ruteo de vehículos ca- pacitados sobre arcos	49
2.2.3. Métodos Heurísticos	51
2.2.4. Heurística de Fisher and Jaikumar	54
2.3. Estrategia de investigación	54

2.4. Aportaciones de la propuesta	59
3. Desarrollo de la propuesta de solución	61
3.1. Construcción del modelo de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos	61
3.1.1. Ubicación de paradas en Googlemaps	62
3.2. Transformación de ruteo sobre arcos a ruteo sobre vértices . .	63
3.3. Programación del Problema de Asignación Generalizada . . .	64
3.3.1. Modelo matemático de asignación generalizada	64
3.3.2. Pseudocódigo del modelo de asignación generalizada . .	65
3.3.3. Resultados del modelo de asignación generalizada . . .	66
3.4. Programación del Problema del Agente Viajero	69
3.4.1. Modelo matemático del agente viajero	69
3.4.2. Pseudocódigo del modelo del agente viajero	70
3.4.3. Resultados del modelo del agente viajero	71
3.5. Validación del modelo	81
3.6. Resumen ejecutivo	84
Conclusiones	85
Anexos	87
Bibliografía	93

Índice de figuras

1.1. Principales etapas de manejo de los residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia con base en la Gaceta Oficial del Distrito Federal 2010.	16
1.2. Distribución del parque vehicular. Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal 2010.	18
1.3. Tractocamión siendo cargado para trasladar los residuos a la planta de tratamiento o disposición final. Fuente: http://www.el-universal.com.mx/ciudad/110269.html	19
1.4. Mapa con las ubicaciones de las 13 estaciones de transferencia en las delegaciones correspondientes. Fuente: Secretaría de Obras y Servicios, DGSU 2004.	20
1.5. Selección de residuos reciclables. Fuente: http://naturalezaysociedad.blogspot.mx/2010/11/los-residuos-solidos.html	21
1.6. Bordo Poniente sitio de disposición final. Fuente: http://www.el-universal.com.mx/ciudad/103567.html	21
1.7. Ubicación de la Delegación Iztacalco y Sector 2. Fuente: Elaboración propia basado en imágenes de Internet.	22
1.8. Tipo de vehículos recolectores en el Sector 2 de Iztacalco. Fuente: http://nicanmopohua-camiones-recolectores-de-basura-de-la.html	24
1.9. Área comprendida por las siete rutas en el Sector 2 de Iztacalco, cada una delimitada por un color distinto. Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada en el Sector 2.	25
1.10. Ruta 1 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.	26
1.11. Ruta 2 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.	27

1.12. Ruta 3 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.	28
1.13. Ruta 4 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.	29
1.14. Ruta 5 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.	30
1.15. Ruta 6 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.	31
1.16. Ruta 7 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.	32
1.17. Recorrido diario de cada vehículo recolector. Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada en el Sector 2.	33
2.1. Cronología del ruteo sobre arcos. Fuente: Elaboración propia con base en [12].	40
2.2. Bosquejo de la ciudad de Königsberg. Fuente: http://www.expansion.com/accesible/blogs/conthe/2011/08/17/circuito-gallardoniano.html	40
2.3. Ejemplo de una gráfica, con sus elementos: vértices, aristas y arcos. Fuente: Elaboración propia con base en Introducción a la teoría de redes. de Ma. del Carmen Hernández Ayuso.	44
2.4. Gráfica que representa el problema de los puentes de Königsberg sobrepuesta en el mapa. Fuente: www.librosmaravillosos.com	45
2.5. Ruteo de vehículos capacitados sobre arcos. Fuente: Elaboración propia basado en imágenes de http://www.monografias.com/trabajos62/iturbide-mexico/iturbide-mexico.shtml	46
2.6. Problemas decidibles e indecidibles. Fuente: El mundo de las ciencias de la complejidad [21].	50
2.7. Estrategia de solución. Fuente: Elaboración propia inspirado en [22].	55
2.8. Formulación de una red CARP. Fuente: Elaboración propia con base en http://www.mat.ucm.es/catedramdeguzman/modelizaciones/proyectos/proyecto10/caterofp.htm	57
2.9. Transformación CARP a CVRP. Fuente: Elaboración propia inspirado en [22].	58

3.1.	Ejemplo de ubicación de puntos en Googlemaps. Fuente: https://www.google.com.mx/maps/	62
3.2.	Área delimitada por los 8 <i>cluster</i> resultantes en el modelo GAP y comparada con los <i>clusters</i> actuales. Fuente: Elaboración propia con base en resultados de GAP en LINGO.	68
3.3.	Ruta 1 con 22 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	74
3.4.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 1, ahora con 24 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	74
3.5.	Ruta 2 con 23 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	75
3.6.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 2, también con 23 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	75
3.7.	Ruta 3 con 25 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	76
3.8.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 3, con 23 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	76
3.9.	Ruta 4 con 30 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	77
3.10.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 4, ahora con 17 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	77
3.11.	Ruta 5 con 23 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	78
3.12.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 5, con las mismas 23 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	78
3.13.	Ruta 6 (azul) y 7 (verde) con 17 y 16 paradas respectivamente, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	79
3.14.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 6, ahora con 10 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	79
3.15.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 7, ahora con 25 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	80
3.16.	Ruta 8 con 15 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	80
3.17.	Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 8, ahora con 23 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.	81

3.18. Número de paradas por cada ruta en el Sector 2. Fuente: Elaboración propia con base en información del sector 2 y resultados de LINGO.	82
3.19. Kilómetros recorridos en metros por cada ruta en el Sector 2. Fuente: Elaboración propia con base en distancias de <i>Google-maps</i>	83

Índice de tablas

1.1. Rutas totales en cada delegación, con sus respectivas características de número de vehículos, número de colonias y aquellas que cuentan con recolección separada. Fuente: Gaceta Oficial del Distrito federal 2010.	17
2.1. Modelos aplicados a la recolección de residuos. Fuente: Elaboración propia.	43
2.2. Comparación de tiempo de varias funciones de complejidad polinomial y exponencial. Fuente <i>Computers and intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness [9]</i>	51
3.1. Asignación de clientes a cada cliente semilla formando 8 <i>clusters</i> . Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.	67
3.2. Resultado de ruteo de los 8 <i>clusters</i> . Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.	72
3.3. Resultado de ruteo del conjunto de paradas actual. Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.	72
3.4. Distancias en metros recorridas por cada ruta. Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.	73

Introducción

En la literatura existen muchos casos de estudio con aplicación a la recolección de residuos sólidos, en los cuales se tuvo una mejora en la eficiencia del servicio. Esto motivó el tema del presente trabajo, además el origen de los documentos en su mayoría es de otros países y aplican modelos de ruteo de vehículos sobre vértices. Por tanto, nos dimos a la tarea de investigar la situación del sistema de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal, el cual en el año 2011 estuvo a punto de colapsar debido al cierre del Bordo Poniente, siendo este su principal depósito. Sin embargo, los beneficios de este hecho fueron dejar de producir dos millones de toneladas de bióxido de carbono y evitar la contaminación de los mantos acuíferos. Por otro lado, ocasionó problemas como: dónde depositar las 12 mil toneladas diarias generadas en el D.F, los tractocamiones tenían que hacer recorridos más largos y filas de horas para poder descargar en tiraderos del Estado de México. Hasta la fecha, no se sabe con precisión a dónde va a parar tanta basura, ya que desde el 2012 no ha habido reportes y actualizaciones de información acerca del sistema. Otra consecuencia, fue el programa de recolección selectiva para el aprovechamiento y mejora de la disposición de los residuos, suscitando conflictos con los habitantes que se negaban a separar la basura. Por lo tanto, la gente comenzó a depositar su basura sin separar en las calles, originando tiraderos clandestinos y la aparición de vehículos “pirata” que aceptan la basura revuelta y se desconoce donde descargan su camión. También la frecuencia de recolección cambió; haciendo que el personal trabajara horas extra. Sumado a esto, las herramientas de trabajo con que cuenta el sistema para realizar su trabajo son escasas y no son adecuadas.

Tratando de ayudar en la solución de algunos de estos problemas, el propósito de este trabajo es rediseñar las rutas de recolección. Pero, por la naturaleza del problema de ruteo, es inviable tratar con todas las rutas del D.F, debido a la complejidad y costo computacional que representa al incrementar el tamaño de la instancia. Por consiguiente, en la investigación se detectó un área representativa con los problemas mencionados anteriormente, presentes en un sector de la Delegación Iztacalco, para minimizar la distancia recorrida y a su vez el tiempo, aplicando la heurística de Fisher & Jaikumar [8], que consiste primero en crear tantos conjuntos de paradas a visitar como el número de camiones disponibles, para después diseñar una

ruta óptima que indique cómo visitar las paradas junto con su sitio de origen en común, que sería la estación de transferencia, donde cada vehículo recolector deposita los residuos. Por lo tanto, el objetivo de la tesis es modelar el problema de la recolección de residuos sólidos en el Sector 2 de Iztacalco, mediante el Problema de Ruteo de vehículos capacitados sobre Arcos (CARP) y resolverlo con el método de dos fases agrupación- ruteo[25], para rediseñar las rutas y minimizar el tiempo de viaje.

El trabajo tiene la siguiente estructura: En el Capítulo 1 se explica una visión general del sistema de manejo de los residuos sólidos en el Distrito Federal, describiendo cada etapa, desde su generación hasta su disposición final. Después, se acota el tema describiendo al Sector 2 de la Delegación Iztacalco para finalmente plantear el problema encontrado, el objetivo de la tesis y su propuesta de solución. En el segundo Capítulo se expone el objeto de estudio, el ruteo sobre arcos a través de la historia, sus aplicaciones y las líneas de investigación, en particular, en la recolección de residuos. Después, se definen algunos conceptos básicos de las herramientas para resolver el problema y se describe cada etapa de la estrategia de investigación. El Capítulo 3 describe el desarrollo de la investigación, desde cómo se obtuvieron los datos para los modelos de solución, el código de programación y sus resultados. También se presenta la validación del modelo. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 1

Descripción del sistema bajo estudio

En este Capítulo se expone el sistema de manejo de residuos sólidos desde su generación, recolección, transferencia, selección y disposición final, en el D.F., que son sus principales etapas. Se hace referencia al área donde se proporcionó la información para llevar a cabo este caso de estudio, el cual se llama Sector 2 y está ubicado en la Delegación Iztacalco. Resultando este sector un área representativa de todos los conflictos en el manejo de los residuos sólidos según la información y datos obtenidos en las entrevistas con los jefes de limpia en la estación de transferencia ubicada en la Central de Abastos. Después se plantea el problema encontrado y el objetivo de la presente tesis. Por último, se muestra la propuesta de solución.

1.1. Sistema de manejo de residuos sólidos en el Distrito Federal

En el orden siguiente y como se ve en la Figura 1.1, se desarrolla el manejo de residuos en el Distrito Federal. Este proceso conlleva las siguientes etapas: la generación de basura en sus distintas fuentes, por ejemplo comercios, casa habitación, escuelas, etc. La segunda etapa consiste en la recolección de dichos residuos. En seguida, en la tercera etapa, se activa el sistema de transferencia que se encarga de transportar la basura recolectada a las plantas de selección. Posteriormente, se lleva a cabo la selección del material buscando el que pueda ser reciclado; a esta etapa se le llama de tratamiento. El siguiente paso a

seguir, consiste en llevar la basura que no se recicló a los sitios de disposición final, siendo esta la última etapa del manejo y control de los desperdicios.

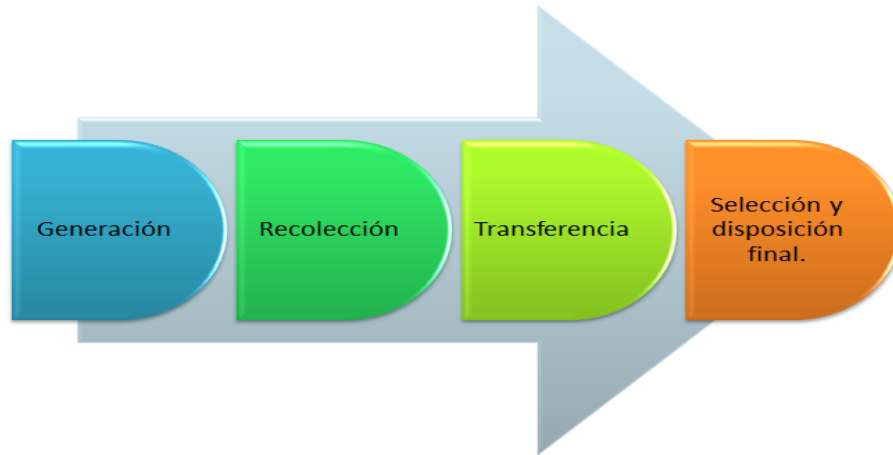


Figura 1.1: Principales etapas de manejo de los residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia con base en la Gaceta Oficial del Distrito Federal 2010.

1.1.1. Generación de residuos

El Distrito Federal tiene una superficie de $1,490km^2$ y una población de 8,851,080 habitantes, y se estima que diariamente se generan alrededor 12,530 toneladas de residuos sólidos, con origen distinto como son: domicilios, comercios, mercados, servicios, diversos y Central de Abastos (CEDA). La mayor fuente de residuos sólidos se genera en los domicilios, con una cantidad del 47% y en su composición física el 60% es inorgánica¹. Para llevar a cabo su recolección, se cuenta con los recursos descritos en la siguiente sección.

1.1.2. Recolección de residuos

Las Delegaciones Políticas, son las entidades responsables de realizar la recolección de los residuos sólidos y su posterior transporte a las estaciones de transferencia. En su conjunto, recolectan 10,760 toneladas de residuos por día. El servicio de recolección en la Ciudad de México se lleva a cabo en

¹Manejo de residuos sólidos en el Distrito Federal. Enero 2004. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/01clave.pdf>

1,730 rutas con 2,485 vehículos que cubren en su recorrido 1,633 colonias². En la Tabla. 1.1 se muestra el número de colonias, vehículos, rutas por delegación y colonia que contaban con recolección separada, en el año 2010³. Se tenía como meta para el 2014, realizar recolección selectiva de los residuos en la totalidad de sus rutas, por lo tanto, los problemas a causa de esta modificación irían en expansión. Además, existen otros tipos de recolección, como son los trabajadores de limpia que pasan por cada calle barriendo y trasportando los desechos en carros muy pequeños.

Delegación	Rutas totales	Rutas de recolección separada	No. de vehículos	No. de colonias	Colonias con recolección separada
Álvaro Obregón	150	72	213	257	72
Azcapotzalco	78	78	157	91	78
Benito Juárez	87	24	136	57	24
Coyoacán	76	3	141	140	3
Cuajimalpa	42	18	66	41	18
Cuauhtémoc	120	41	228	34	41
Gustavo A. Madero	222	36	309	244	36
Iztacalco	61	14	162	36	14
Iztapalapa	249	59	268	157	59
Magdalena Contreras	79	13	90	51	13
Miguel Hidalgo	188	90	179	81	90
Milpalta	75	75	55	12	75
Tláhuac	45	35	62	72	35
Tlalpan	125	48	145	243	48
Venustiano Carranza	92	8	186	70	8
Xochimilco	41	19	88	47	19
Total	1730	633	2485	1633	633

Tabla 1.1: Rutas totales en cada delegación, con sus respectivas características de número de vehículos, número de colonias y aquellas que cuentan con recolección separada. Fuente: Gaceta Oficial del Distrito federal 2010.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), contempló la sustitución del parque vehicular y la recolección en

²Ídem

³Gaceta Oficial del Distrito Federal 13 de septiembre 2010. http://www.consejeria.df.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/4c8afe2c2a738.pdf

dos fracciones: orgánica e inorgánica desde el 2004, con aplicación gradual en cada delegación. Algunas delegaciones adquirieron vehículos de doble compartimento para realizar la recolección selectiva, de tal manera que actualmente se cuenta con 173, esto es sólo el 8% del total ⁴ (Figura 1.2), que muestra la distribución del parque vehicular.

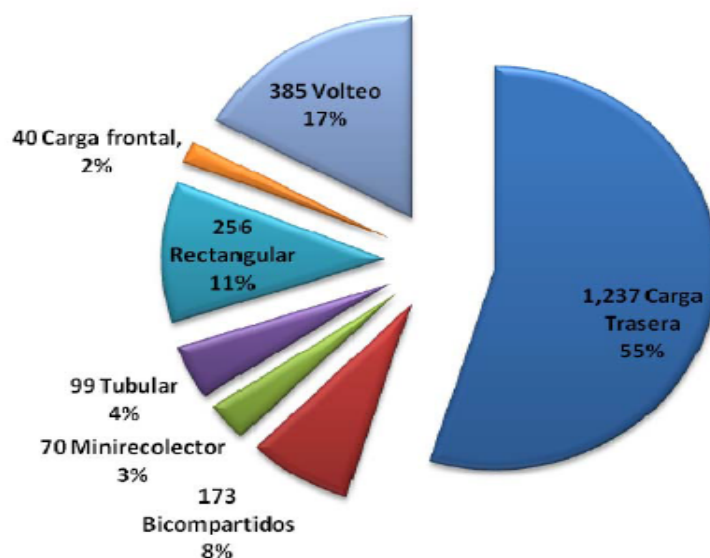


Figura 1.2: Distribución del parque vehicular. Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal 2010.

De la flota total, cincuenta por ciento de los vehículos de recolección se encontraron en condiciones regulares, y solamente 24% están en buenas condiciones; el 26% restante estaba en malas condiciones⁵.

1.1.3. Transferencia de residuos

La estación de transferencia, es donde se reciben los residuos sólidos de vehículos recolectores para transferirlos a un vehículo de mayor capacidad y

⁴Gaceta Oficial del Distrito Federal 13 de septiembre 2010. http://www.consejeria.df.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/4c8afe2c2a738.pdf

⁵Ídem

así ser transportados a la planta de tratamiento o al sitio de disposición final. El objetivo de las estaciones de transferencia es incrementar la eficiencia del servicio de recolección y, con ello, reducir el tiempo de traslado de los vehículos, así como disminuir el tiempo de descarga de los residuos. El Gobierno del Distrito Federal (GDF) cuenta con 13 estaciones de transferencia (Figura 1.4), que durante la investigación estaban ubicadas en puntos intermedios entre las diversas fuentes generadoras y el sitio de disposición final.



Figura 1.3: Tractocamión siendo cargado para trasladar los residuos a la planta de tratamiento o disposición final. Fuente: <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/110269.html>

El horario de operación de las estaciones, por lo general es de 6:00 a 22:00 horas, aunque las estaciones Central de Abastos, Coyoacán y Cuauhtémoc trabajan las 24 horas. Para el traslado y transferencia de los residuos se cuenta con 238 tractocamiones, cada uno con caja; su servicio se encuentra subcontratado por la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU). Para la recepción de los residuos orgánicos, se ha dispuesto específicamente de tolvas verdes para la descarga de esta fracción que corresponde a los residuos orgánicos. Las estaciones de transferencia cuentan con capacidad para la recepción de los residuos mayor a la que recibían, con excepción de la Delegación Coyoacán, donde la cantidad de residuos transferidos diariamente se aproxima a la capacidad instalada. Ésta se calculó bajo la condición de que los vehículos recolectores tuvieran una frecuencia de arribo distribuida homogéneamente durante el día; sin embargo, se consideró que en el momento de la investigación, el 80% de los viajes coincidían entre las 11:00 y las 14:00 horas, provocando saturación al ingresar a la estación de transferencia. Desde las estaciones de transferencia, se trasladaba la fracción inorgánica a las plantas de selección, la fracción orgánica a la planta de composta que

se ubicaba en Bordo Poniente, el resto, que ya no tenía utilidad, al Relleno Sanitario.

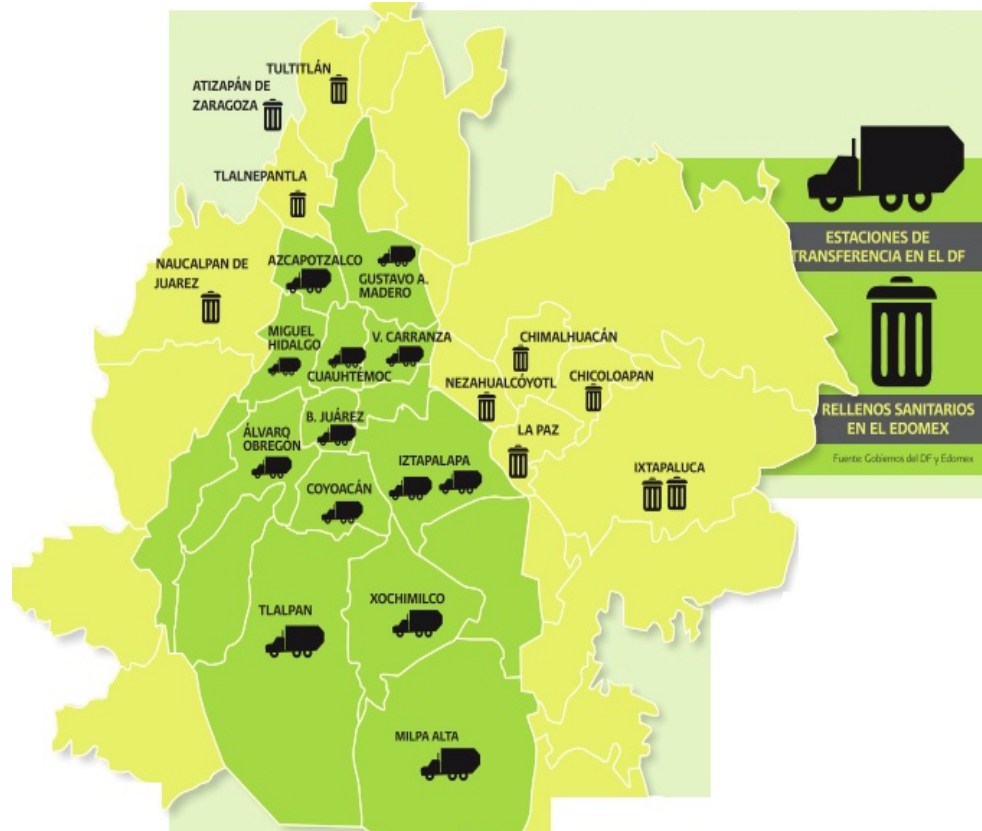


Figura 1.4: Mapa con las ubicaciones de las 13 estaciones de transferencia en las delegaciones correspondientes. Fuente: Secretaría de Obras y Servicios, DGSU 2004.

1.1.4. Selección y disposición final

El Distrito Federal cuenta con tres plantas de selección de residuos sólidos (Santa Catarina, Bordo Poniente y San Juan de Aragón), en las que se realiza la recuperación de materiales reciclables. Las plantas eran propiedad del Gobierno del Distrito Federal; su administración y mantenimiento se encontraba a cargo de la DGSU, mientras que la operación la llevaban a cabo los gremios de selectores.



Figura 1.5: Selección de residuos reciclables. Fuente: <http://naturalezaysociedad.blogspot.mx/2010/11/los-residuos-solidos.html>.

Los sitios de disposición final son la última etapa en la gestión integral de los residuos sólidos, que deberían corresponder únicamente al destino de aquellos residuos que no fueron susceptibles de compostear, volver a usar y reciclar. En ninguna de las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal existen sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, ya que éstos se depositan en espacios destinados para tal efecto en entidades colindantes. Además, desde el cierre del Bordo Poniente, hasta la fecha no está claro, lo que realiza el Gobierno del Distrito Federal con respecto al trato y disposición final de los residuos sólidos que se generan en la Ciudad.

Una vez mostrado el panorama general del sistema de manejo de residuos sólidos en el Distrito Federal, se describe a continuación el sistema de recolección de la Delegación Iztacalco que es donde se realizó la investigación.



Figura 1.6: Bordo Poniente sitio de disposición final. Fuente: <http://www.el-universal.com.mx/ciudad/103567.html>.

1.2. El Sector 2 de la Delegación Iztacalco

Como se mencionó en la sección anterior, el presente trabajo se acotó a un sector de la Delegación Iztacalco. Esto fue debido a que este sector presenta los problemas característicos de la recolección de residuos sólidos en todo el D.F, resultando un área representativa, además tiene un tamaño razonable para tratarlo. Como se verá más adelante, la complejidad y costo computacional que representa el incrementar el tamaño de la instancia en problemas de ruteo como este, puede ocasionar que el problema sea imposible de resolver. También por que es el lugar que facilitó la información para llevar a cabo la investigación.

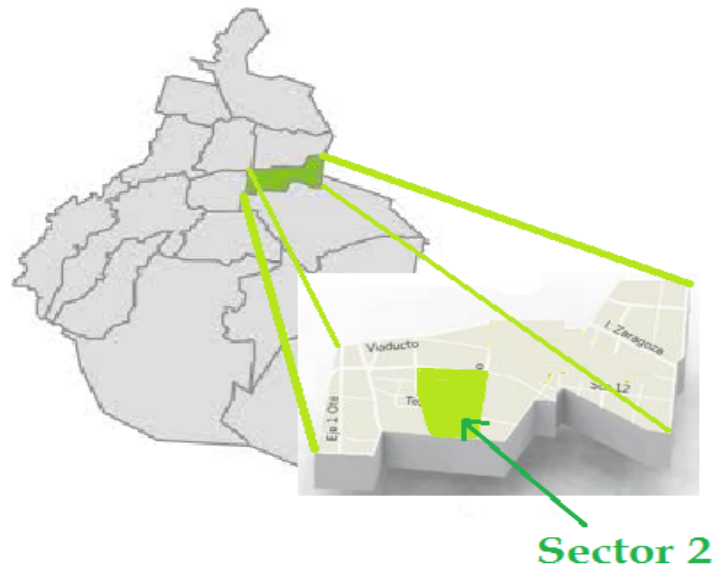


Figura 1.7: Ubicación de la Delegación Iztacalco y Sector 2. Fuente: Elaboración propia basado en imágenes de Internet.

La Delegación Iztacalco se ubica al oriente del Distrito Federal, cuenta con una extensión territorial de 23.3 km^2 y una población de 411,321 habitantes (Figura. 1.7). Para atender al total de la población, cuenta con 61 rutas de recolección de residuos sólidos que son atendidas por 162 vehículos, con un horario matutino.

Características generales del Sector 2

La generación promedio de residuos sólidos en la Delegación es de 800 toneladas por día⁶. En cada delegación del Distrito Federal, la recolección de residuos sólidos se divide en sectores con un cierto número de rutas y vehículos que cubren el servicio de las distintas colonias en ese sector. La Delegación Iztacalco está dividida en nueve sectores y este estudio se delimita al Sector 2, el cual cuenta con 7 rutas de recolección de residuos sólidos, y 10 vehículos, de los cuales 7 son de carga trasera, 2 camiones de doble separación y uno rectangular (Figura. 1.8).

El diseño de rutas en el Sector 2, fue hecho sólo por división de colonias y su recorrido fue elaborado conforme a la experiencia de cada operador del vehículo. Cada ruta tiene asignado un vehículo y sobran tres que funcionan como relevos. Cada ruta incluye de 12 a 30 paradas durante el día. Las siete rutas cubren las siguientes colonias:

1. Gabriel Ramos Millán;
2. Gabriel Ramos Millán sección Tlacotal;
3. Tlazintla;
4. Mosco Chinampas;
5. Juventino Rosas;
6. INPI Picos;
7. Picos Iztacalco;
8. Infonavit Iztacalco Norte;
9. Infonavit Iztacalco Sur.

Cada una tiene asignado uno o dos vehículos recolectores como los que se muestran en la Figura 1.8 los de carga trasera tienen una capacidad de 6 a 7 toneladas aproximadamente, las rutas que tienen asignado este tipo

⁶Avances de la separación y recolección selectiva de residuos sólidos en las 16 Delegaciones del Distrito Federal. (2006). http://centro.paot.org.mx/documentos/sma/avances_separacion_recoleccion_residuos_solidos_diciembre2006.pdf

de vehículo realizaban cada tercer día la visita a la mitad de las paradas correspondientes a su ruta y la siguiente mitad el siguiente día. Y con el programa de separación tienen que pasar a diario por todas las paradas en su ruta, provocando horas extra de trabajo sin pago extra. Los vehículos de doble separación tienen una capacidad de 2 a 3.5 toneladas para los residuos orgánicos y de 5 a 6 toneladas para los inorgánicos teniendo como ventaja recolectar de los dos tipos de residuos como se hacía antes del programa. Por último los vehículos del tipo rectangular apoyan al sector recogiendo la basura de algunos tiraderos clandestinos.



Figura 1.8: Tipo de vehículos recolectores en el Sector 2 de Iztacalco. Fuente: <http://nicanmopohua-camiones-recolectores-de-basura-de-la.html>.

Rutas del Sector 2

La Figura 1.9, muestra el área que cubren las siete rutas en el Sector 2 de la Delegación Iztacalco, cada una delimitada con un color distinto y numeradas, donde cada vehículo hace su primer viaje de 7 a 10:30 hrs y el segundo de las 11:30 a las 14 ó a las 18 hrs.

Sector 2 de Iztacalco

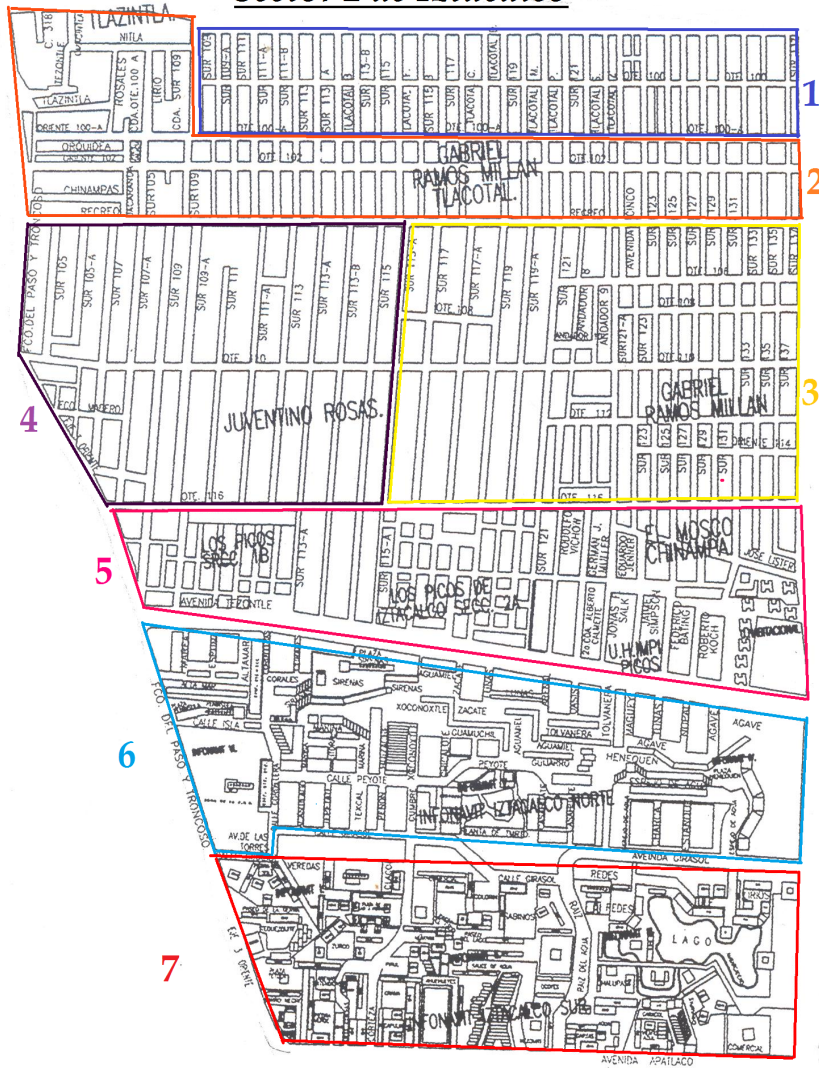


Figura 1.9: Área comprendida por las siete rutas en el Sector 2 de Iztacalco, cada una delimitada por un color distinto. Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada en el Sector 2.

A continuación se muestra por separado, el conjunto de paradas por cada una de las siete rutas en un mapa mostrando a detalle la ubicación de los puntos donde se lleva a cabo la recolección de los residuos, cada uno prece-

dido de una tabla con las características de cada ruta como son: la colonia o colonias donde se ubica, tipo de camión, capacidad del vehículo, la frecuencia con que visita, número de paradas, longitud de la ruta y tiempo promedio en cada parada. Es importante aclarar que en este trabajo se muestran las secuencias de recorrido de las paradas de forma gráfica en los mapas (forma euclidiana) y no específicamente por las calles que recorre, como se observa en los últimos mapas que muestran las secuencias de visita en la solución con sólo aplicar agente viajero y la solución aplicando el problema de ruteo sobre arcos.

Conjunto de paradas de la ruta 1

RUTA 1	Área delimitada por línea azul en la Figura 1.9
Colonia	Gabriel Ramos Millán sección Tlacotal
Tipo de camión	Carga trasera.
Capacidad	De 5-6 toneladas
Frecuencia	Recolección diaria ayudado por un camión relevo
No. Paradas	22 ubicadas con iconos de color azul en la Figura 1.10
Tiempo en cada parada	De 10 a 15 minutos
Longitud de ruta	13.7km

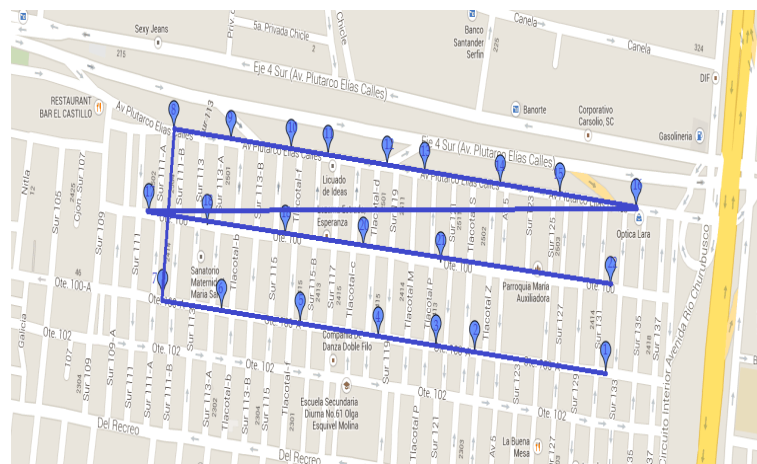


Figura 1.10: Ruta 1 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpieza.

Conjunto de paradas de la ruta 2

ruta 2	Área delimitada por línea naranja en la Figura 1.9
Colonia	Tlazintla y Gabriel Ramos Millán sección Tlacotal
Tipo de camión	Doble separación
Capacidad	De 2 a 3.5 toneladas
Frecuencia	Lunes, miércoles y viernes del 1 al 10 y martes jueves, sábado y domingo del 11 al 23
No. Paradas	23 ubicadas con iconos de color naranja en la Figura 1.11
Tiempo en cada parada	De 10 a 15 minutos
Longitud de ruta	17.8Km

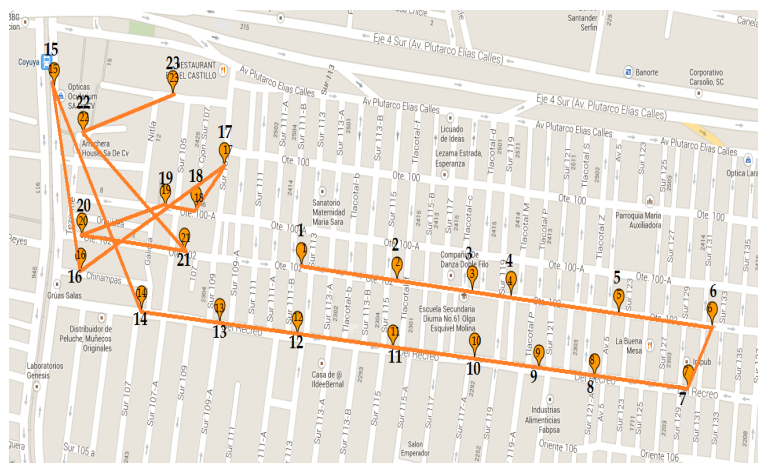


Figura 1.11: Ruta 2 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpieza.

Conjunto de paradas de la ruta 4

ruta 4	Área delimitada por línea morada en la Figura 1.9
Colonia	Juventino Rosas
Tipo de camión	Carga trasera.
Capacidad	De 5-6 toneladas
Frecuencia	Alternado
No. Paradas.	46 ubicadas con iconos de color morado en la Figura 1.13
Tiempo en cada parada	De 10 a 15 minutos
Longitud de ruta	16.09Km

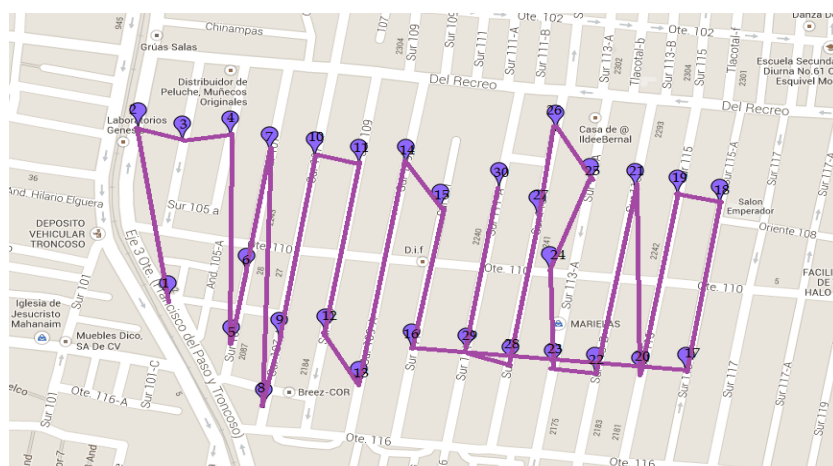


Figura 1.13: Ruta 4 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpieza.

Conjunto de paradas de la ruta 5

RUTA 5	Área delimitada por línea rosa en la Figura 1.9
Colonia	INPI Picos y Picos Iztacalco
Tipo de camión	Carga trasera.
Capacidad	De 5-6 toneladas
Frecuencia	Recolección diaria.
No. Paradas	23 ubicadas con iconos de color rosa en la Figura 1.14
Tiempo en cada parada	De 20 a 25 minutos
Longitud de ruta	18.15Km

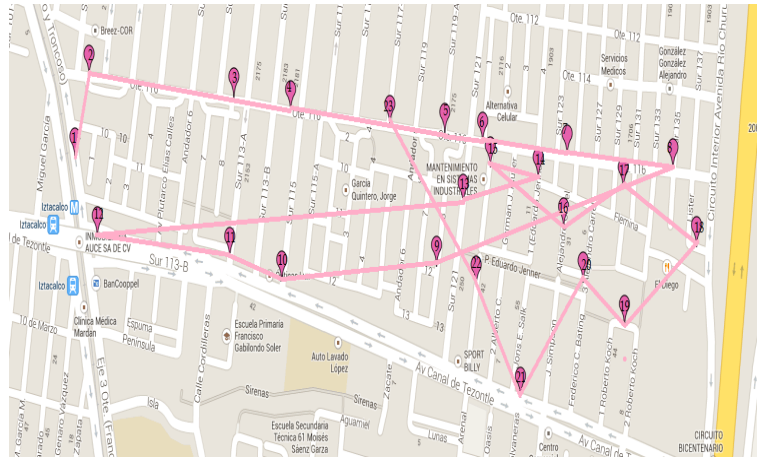


Figura 1.14: Ruta 5 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpieza.

Conjunto de paradas de la ruta 6

ruta 6	Área delimitada por línea azul claro en la Figura 1.9
Colonia	Infonavit Iztacalco Norte
Tipo de camión	Doble separación ayudado por uno de carga trasera.
Capacidad	De 2 a 3.5 y 5-6 toneladas respectivamente
Frecuencia	Recolección diaria ambos
No. Paradas	33 ubicadas con iconos de color azul claro en la Figura 1.15
Tiempo en cada parada	De 20 a 25 minutos
Longitud de ruta	15.89Km y 12.18Km

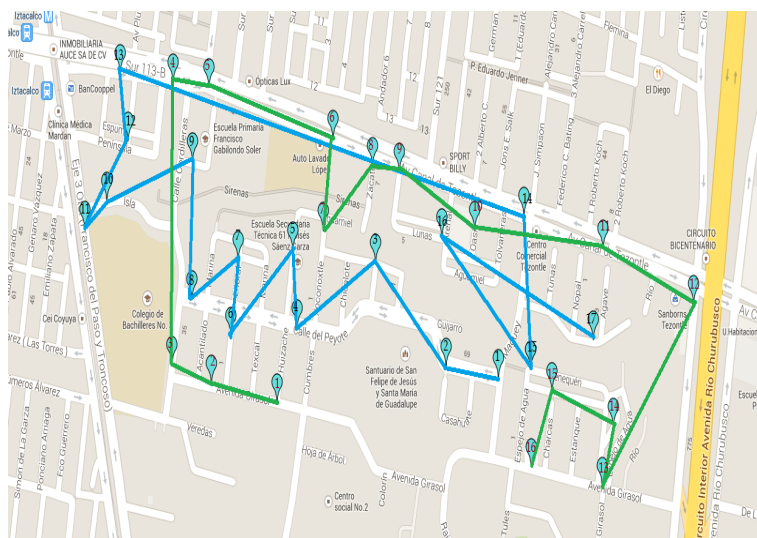


Figura 1.15: Ruta 6 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpieza.

Conjunto de paradas de la ruta 7

RUTA 7	Área delimitada por línea roja en la Figura 1.9
Colonia	Infonavit Iztacalco Sur
Tipo de camión	Carga trasera.
Capacidad	De 5-6 toneladas respectivamente
Frecuencia	Recolección diaria
No. Paradas	15 ubicadas con iconos de color rojo en la Figura 1.16
Tiempo en cada parada	De 15 a 20 minutos
Longitud de ruta	11.05Km

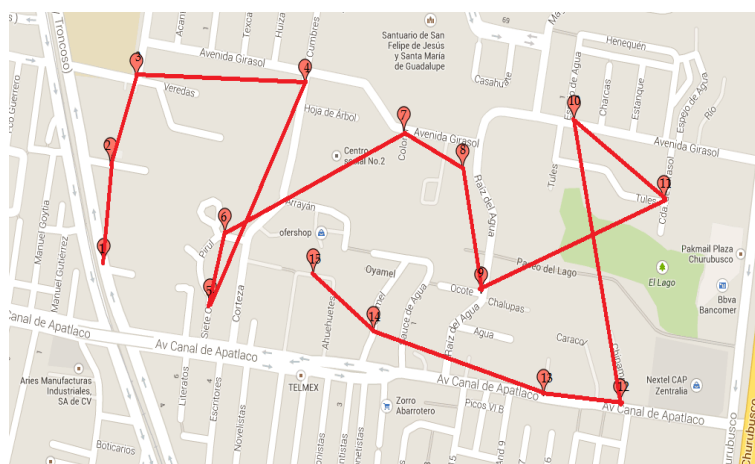


Figura 1.16: Ruta 7 del Sector 2 de Iztacalco. Fuente: Elaboración propia con base en la información dada por el Jefe de limpia.

Todas las rutas realizan el recorrido mostrado en la Figura 1.17, con las fotos e imagen de los lugares que recorren. Iniciando su jornada entre las 5 y 6 hrs. en el campamento ubicado en la Central de Abastos, donde se resguardan los camiones recolectores, después pasan a la estación de transferencia (ubicada también en la Central de Abastos) a depositar su carga y acuden a registrar su asistencia a la oficina Sector 2 de Iztacalco, para dar inicio al recorrido en la ruta de recolección. La mayoría de los operadores tiene que hacer dos viajes al día al llenar la capacidad de sus vehículos a la mitad de la ruta y regresan a la estación de transferencia de la Central de Abastos, para que al final de su jornada regresen el vehículo al campamento.

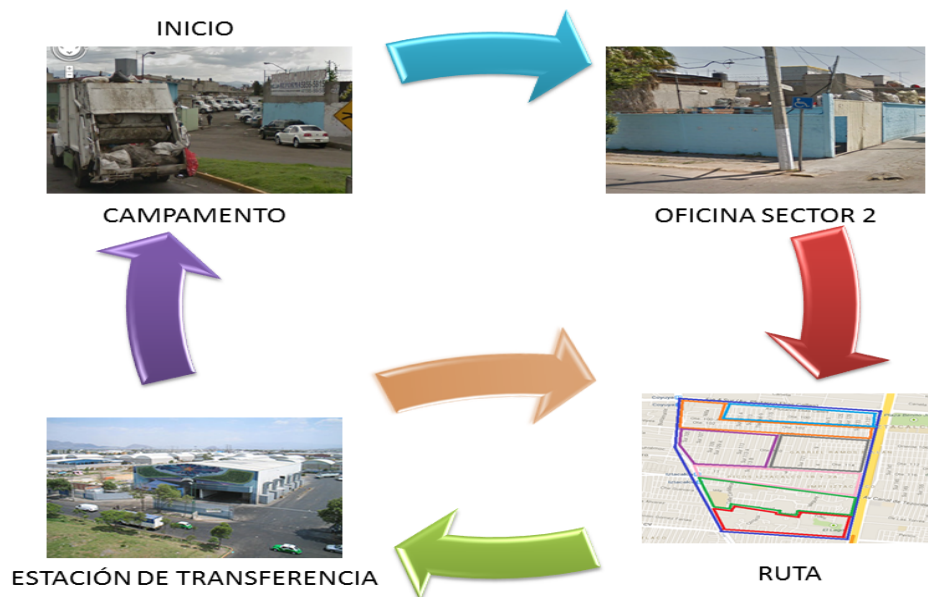


Figura 1.17: Recorrido diario de cada vehículo recolector. Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada en el Sector 2.

En las entrevistas con el Jefe de Campamento de vehículos de limpieza, ubicado frente a la Central de Abastos en Iztapalapa, que tiene la función de distribuir los vehículos recolectores en la Delegación Iztacalco, planteó los siguientes problemas a partir del programa de recolección selectiva:

1. Los habitantes se niegan a separar la basura;
2. Los trabajadores de limpia, además de recolectarla, tienen que separarla;
3. Los trabajadores de limpia tienen que trabajar horas extra por el mismo salario;
4. Sólo cuentan con dos vehículos bicompartidos.

El punto número 1 provocó conflictos con los trabajadores de limpia; el punto 2 hizo que los trabajadores negaran el servicio si no estaba separada la basura, originando tiraderos clandestinos y aparición de vehículos recolectores “pirata”, además de que esa no es su función; el punto 3 se debe a que

tienen que cumplir con el programa y en promedio aumentaron a dos viajes por día y el punto 4 si tuvieran más vehículos de este tipo la recolección no generaría horas extra de trabajo.

En general, se presentaban estos problemas en todo el Distrito Federal, pero el jefe de campamento mencionó que había un sector en especial, que tenía estos problemas, como el Sector 2 de la Delegación Iztacalco, por lo que se tuvo una segunda entrevista con el Jefe de limpia del Sector 2, que tiene como funciones la distribución, coordinación y supervisión de barrido manual y mecánico, facilitando todos los datos y mapas necesarios para llevar a cabo este trabajo, expuestos en la sección 1.2.

1.3. Planteamiento del problema

En el Distrito Federal se ha presentado un incremento importante en la cantidad de residuos sólidos que se generan en la ciudad (19.7% del total generado nacional ⁷), con alrededor de 12,513 toneladas diariamente, debido principalmente a la explosión demográfica y a los hábitos de consumo de los habitantes. El origen de estos residuos es del 60.97% domiciliaria, principal fuente de generación, y el 30.02% industrial y comercial, la cual se puede dividir en dos principales tipos, que son orgánica e inorgánica con 60% y 40% respectivamente.

El manejo de los residuos sólidos comprende diversas etapas, incluyendo su almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final. El manejo de grandes volúmenes de desperdicios representa problemas de difícil solución y enormes costos económicos para los gobiernos de la ciudad y para la ciudadanía. Por lo tanto, fue necesario tomar medidas como la nueva Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal implementada desde 2004 en la Ciudad de México, un programa de separación de basura y reciclaje que modificó el sistema de tal forma que se recolectan los residuos de la siguiente manera: lunes, miércoles, viernes y domingo se recoge la basura inorgánica; martes, jueves y sábados se recoge la basura orgánica, con el principal propósito de reducir la cantidad de residuos que se depositan en el relleno sanitario por medio del reciclaje. Más tarde en 2011, el Relleno Sanitario del Bordo Poniente fue cerrado definitivamente, ocasionando problemas a los

⁷Informe de la situación del medio ambiente en México.(2012). http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdfCap7_residuos.pdf, 31-05-2014

trabajadores que laboran más de ocho horas diarias sin pago extra, filas de camiones para poder descargar en los centros de transferencia que tardaban horas y buscar en dónde depositar las 12 mil toneladas recibidas diariamente.

Sumado a esto, la pobre infraestructura con que cuenta el sistema, ya que los camiones son viejos e inadecuados para el nuevo programa de recolección, donde muy pocos camiones son de compartimiento doble, lo cual implica que se tenga una recolección ineficiente al no aprovechar al máximo la capacidad del camión los días de recolección orgánica y generando horas extra de jornada laboral de los trabajadores. Tanto la capacidad y tipo de camiones, las distancias que se deben recorrer, el crecimiento acelerado de nuevos centros de población, junto con el mal diseño de rutas, ya que en la mayoría de los casos las rutas se diseñan de forma intuitiva, contribuyen a que el servicio de recolección no cumpla con las expectativas esperadas. En el medio mexicano, el sistema más usado para el diseño de rutas de recolección de los residuos sólidos urbanos ha sido el juicio y experiencia del jefe de limpia, o bien de los choferes de los vehículos recolectores. El criterio y experiencia tanto del jefe de limpia como de los choferes, no es siempre el mejor por que no tienen un fundamento técnico que asegure que la ruta es la óptima, es decir no se tiene una manera cuantitativa de demostrar que la ruta es la mejor opción, además no existe una visión sistémica de todas las rutas y la problemática completa, por lo cual la mayoría de las rutas de recolección diseñadas por ellos dejan mucho que desear en cuanto a aspectos de operación y funcionamiento. Un mal diseño de rutas de recolección, trae como consecuencia graves daños al sistema de recolección, entre los que se pueden citar los siguientes: deficiente operación y funcionamiento del equipo, por que puede ser que una ruta tenga puntos excesivos de recolección y no alcanza a cubrir toda la ruta de acuerdo con el programa; desperdicio de personal; reducción de las coberturas del servicio de limpia y la proliferación de tiraderos clandestinos si el servicio no llega a todos los lugares donde se requiere e incremento de los costos del servicio de limpia. También, los residuos sólidos ocasionan problemas como: bloqueo de coladeras y drenajes, provocando inundaciones en épocas de lluvia, deterioro de lugares de recreación además de generar problemas sanitarios y ambientales, contaminación del agua y generación de malos olores.

Además, el transporte es una de las etapas más caras, ya que esta actividad llega a consumir el 60 % del costo total del manejo integral de los

residuos.⁸ [30].

Considerando todo lo anterior, este trabajo se enfoca en el proceso de recolección de los residuos sólidos domiciliarios, con la finalidad de ayudar a la solución de algunos problemas se busca minimizar la distancia recorrida por cada ruta que a su vez minimiza el tiempo de recorrido, con ello, disminuir gastos de combustible y desgaste del equipo de recolección. Esto se puede lograr con el rediseño de rutas pero no es tarea fácil, debido a la complejidad y costo computacional que representa al incrementar el tamaño de la instancia o en otras palabras al incrementar, el número de puntos de recolección. Por esta razón en particular, nos centraremos en la recolección de residuos sólidos domiciliarios de un sector de la Delegación Iztacalco. Como no es en el único sector en el que se presentan este tipo de dificultades, el enfoque tratado en esta tesis puede llevarse a otras áreas del D.F.

1.4. Propuesta de solución

Existen varios enfoques para tratar la problemática de la recolección de la basura, pero la propuesta de este trabajo es aplicar una metodología de la Investigación de Operaciones.

En la literatura podemos encontrar diversos modelos de ruteo aplicados a distintas empresas en su área de logística. Ejemplo de lo anterior es la aplicación a un caso logístico del problema de ruteo vehicular múltiple (m-VRP) [13], dentro de una empresa clasificada como Pequeña y Mediana Empresa (PyME), dedicada a la distribución de productos de papelería y oficina. También aplicaciones en la industria de bebida, comida, lácteos y periódico[25].

En particular, los problemas de ruteo y sus variantes son aplicados a la recolección de residuos sólidos como son: recolección comercial, domiciliaria, *Roll-on-Roll-off* y recolección de residuos especiales entre otros. Las variantes se dan con los distintos tipos de restricciones como son múltiples depósitos, ventanas de tiempo, flota heterogénea y homogénea, como se verá más adelante en la sección 2.1.2 [25].

⁸Dr. Fabián Robles Martínez. (2009). Manejo integral de residuos I. <http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/residuos%20manual/Manual%20de%20>

Para este caso, se propuso el modelo de Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (CARP), el cual tiene una flota de camiones determinada con capacidad limitada y tiene que recorrer sólo un subconjunto de calles, por donde tiene que pasar a recolectar los residuos, ya que por las características del área a estudiar que tiene calles muy angostas llamadas andadores por donde el camión no puede pasar, por tal motivo no se eligió el problema del cartero chino [17], que tiene que visitar todas las calles. Además tiene un único punto de partida o depósito, que en este caso es la estación de transferencia y al final regresar a este punto para descargar todos los residuos. Por otro lado, debido al gran número de paradas por las cuales se recolectan los residuos, y además de que las paradas no siempre son en el mismo lugar, es preciso aplicar ruteo de vehículos capacitados sobre arcos. Descartando así al problema de ruteo de vehículos sobre nodos o vértices[19]. A continuación, se expone el objetivo general de esta investigación.

1.5. Objetivo general

Minimizar las distancias de viaje en las rutas de recolección de residuos sólidos en el sector 2 de la delegación Iztacalco, mediante el desarrollo de un modelo de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos y su solución con un método heurístico de agrupación-ruteo.

Para lograr el objetivo general se requiere alcanzar los siguientes objetivos específicos.

Objetivos específicos

- Plantear una metodología para resolver el problema;
- Calcular las matrices de distancias por cada par de arcos;
- Distribuir las paradas por cada vehículo de manera más uniforme;
- Obtener una ruta óptima para cada vehículo;
- Minimizar la distancia recorrida.

En el siguiente Capítulo se verá cómo surgió el problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos, las líneas de investigación que han tratado

el problema de recolección de residuos sólidos, además de conceptos importantes para entender la complejidad de este tipo de problemas y la estrategia de investigación para resolver el problema.

Capítulo 2

Marco de Referencia

El objeto de estudio de este trabajo es la aplicación de un modelo de ruteo a la recolección de residuos sólidos. En este capítulo, se presentan los problemas de ruteo sobre arcos que dieron origen a CARP, las distintas formas o perspectivas con que se ha tratado el problema de recolección de residuos y la justificación del método propuesto para resolverlo. Además, se agregaron algunas definiciones para entender la complejidad computacional y el modelo matemático de CARP. Por último, se describe cada etapa de la estrategia, así como los supuestos usados para resolver el problema.

2.1. Estado del arte del problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos

El Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (*Capacitated Arc Routing Problem* o CARP) [26]; consiste en atender las demandas sobre determinadas calles de una red vial, a través de una flota homogénea de vehículos, los cuales inician y finalizan sus recorridos desde un único depósito. El objetivo del problema es minimizar el costo total de recorrido (distancia o tiempo) de tal manera, que se puedan atender todas las demandas, sin exceder la capacidad de carga de los vehículos involucrados. A continuación se reseña cómo surgió este problema a través de los distintos modelos sobre los arcos de una red.



Figura 2.1: Cronología del ruteo sobre arcos. Fuente: Elaboración propia con base en [12].

Como se observa en la Figura 2.1, el estudio sobre el problema de ruteo de arcos comenzó en 1735 cuando Leonardo Euler hizo la presentación del problema de los puentes de Königsberg [16], que trataba de lo siguiente: En la ciudad de Kaliningrado en Rusia, antiguamente llamada Königsberg, lugar que se situaba a orillas del río Pregel sobre dos islas que se encontraban en el centro de la corriente del río, dividiendo la zona en varias partes y para no perder la comunicación, había un sistema de siete puentes conectores como se muestra en la Figura 2.2. Entonces, el problema consistía en encontrar un recorrido con inicio en algún punto de la isla, pasar por los siete puentes sin repetir ninguno y volver al punto de partida. Euler concluyó que no es posible obtener este recorrido, por lo tanto probó que en general, es posible obtener un recorrido que pase por cada calle, si el número de calles incidentes en cada punto a visitar es par.



Figura 2.2: Bosquejo de la ciudad de Königsberg. Fuente: <http://www.expansion.com/accesible/blogs/conthe/2011/08/17/circuito-gallardoniano.html>

El siguiente problema de ruteo sobre arcos fue el Problema del Cartero Chino (*Chinese Postman Problem* o CPP) el cual fue inicialmente propuesto por Kwan Mei-Ko en 1962 [17], y se define así: Un cartero debe repartir la correspondencia a cada una de las calles de su distrito, siendo la oficina de correos su punto de partida y llegada, deberemos encontrar una ruta óptima para que el cartero camine la menor distancia posible. Por tanto, el cartero debe recorrer cada calle una vez al menos en su recorrido.

En 1974, Orloff propuso el Problema del Cartero Rural (*Rural Postman Problem* o RPP) [5], el cual se define como el problema del cartero chino, que tiene como punto de partida y llegada la oficina de correos, con la diferencia de que el cartero debe repartir la correspondencia sólo a un subconjunto de las calles, y también tiene como objetivo recorrer la menor distancia posible.

Por último, el Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (*Capacitated Arc Routing Problem* o CARP) fue sugerido por primera vez por Golden & Wong en 1981 [12], como una extensión del problema del Cartero Rural, con restricciones de capacidad.

La importancia de los cuatro problemas anteriores radica en su aplicación real en organismos públicos y empresas, en ambos casos se busca ofrecer un servicio de mejor calidad al menor costo posible. Por ello, el estudio de estos problemas está motivado por la necesidad de ofrecer mejores y variadas alternativas de solución a aquellas organizaciones que deben tratar cotidianamente con problemas de ruteo y logística [4]. Además, pertenecen a la clase de problemas *NP-Difícil*, que es sinónimo de difícil de resolver, es decir, se requiere de un tiempo de cómputo elevado. Conforme el tamaño del problema crece el tiempo requerido para resolverlo crece exponencialmente. En la sección 2.2 se dará una introducción a estos conceptos.

En la siguiente sección, se muestra cómo el problema de recolección de residuos ha sido modelado de distintas formas a lo largo de once años, entre ellos CARP, tomando en cuenta diferentes aspectos de la recolección, como son, el tipo de flota, ventanas horarias, frecuencia de visita de rutas, número de depósitos y tipo de recolección.

2.1.1. Líneas de investigación

Como podemos ver en la Tabla 2.1, durante los últimos años han existido diversas aplicaciones a la recolección de residuos. Sobre todo en países con ciudades muy pobladas. Utilizando modelos como: el problema del agente viajero TSP[28], ruteo de vehículos con ventanas de tiempo VRPTW[25], el problema de ruteo en arcos ARP[1] y el capacitado CARP[12], el problema del cartero chino, el problema del ciclo hamiltoniano, el problema de ruteo de vehículos capacitados CVRP[25], entre otros.

En la actualidad, los que más predominan son del tipo VRP[25] con sus diversas variantes y extensiones, como son ventanas de tiempo y recolección periódica. La primera se aplica principalmente a la recolección comercial, ya que los puntos de paro son fijos y la segunda variante a la recolección en clima cálido, debido a la pronta descomposición de los desechos y tamaño de demanda del servicio, dando prioridad a éstos. Otras características son el tipo de flota (homogénea o heterogénea) y el número de depósitos.

Por otra parte, en segundo lugar, predomina la aplicación de ARP, frecuentemente enfocado a la recolección de residuos domiciliarios y sin ventanas de tiempo. Una de sus variantes con mayor aplicación es CARP, ya sea en su forma simétrica o dirigida y mixta. Sin embargo, en instancias muy grandes como las que se presentan en la vida real, para resolverlo se recurre a una transformación de CARP a CVRP, las ventajas de esto se verán más adelante en el marco teórico.

Por las características del problema planteado en el presente trabajo, el modelo a utilizar es el problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos CARP, descrito en la siguiente sección.

2.2. Marco teórico

Para poder entender y plantear el problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos es necesario introducir conceptos de Teoría de gráficas. Por otra parte, debido a su complejidad para resolverlo, es necesario definir conceptos de complejidad computacional y heurísticos.

Año	Autor	Título	Modelo y tipo de recolección	Método de solución	Software y tamaño	Tipo de Flota y #Depósitos
1999	Dang Vu Tung y Anulark Pinnoi [7]	<i>Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi</i>	-VRS - Domiciliaria	Heurística de construcción y mejora (Solomon)	-C++ -100 nodos	-Heterogénea -1
2004	Vittorio Maniezzo [22]	<i>Algorithms for large directed CARP instance: urban solid waste collection operational support</i>	-DCARP -Urbana	- <i>Multistart-Genetic-Data Perturbation</i>	-ESRI's ArcView-55,97 y 179 arcos	- Heterogénea -1 o más
2005	Gianpaolo Ghiani et al. [10]	<i>Waste collection in southern Italy: solution of a real-life arc routing problem</i>	-CARP -Urbana	Heurística <i>Cluster-first, Route-Second</i>	Visual C -84 arcos	Heterogénea -1
2006	Jesus Racero Moreno y Edgar Pérez Arriaga [18]	Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios	-CPP - Domiciliaria	<i>Branch and Bound</i>		
2009	Flavia Bonomo et al. [3]	Optimización de la recolección de residuos en la zona sur de la ciudad de Buenos Aires	-TSP - Domiciliaria	Dijkstra	Concord-SmallTalk -98 nodos	- Homogénea -1
2010	Alejandra Mendez et al. [24]	Dos enfoques para la solución del problema de ruteo de vehículos: Aplicación a un caso real de recolección de residuos	CVRP- Infeciosos	GAMS -58	Homogénea -1	

Tabla 2.1: Modelos aplicados a la recolección de residuos. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos

Para poder plantear el Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (CARP) en redes es necesario definir los siguientes conceptos.

Una **gráfica** es una pareja ordenada de conjuntos $[V, A]$, donde V es un conjunto finito de puntos llamados **vértices o nodos** y A es un multiconjunto de pares no ordenados de vértices, que se denominan lados o **aristas**. Se denota con $G = [V, A]$. Si los elementos de A tienen una dirección, representada con una flecha, se llaman **arcos** y se dice que la gráfica G es dirigida u orientada. Si no tienen dirección se llaman **aristas** y G es no dirigida. Figura 2.3

Se dice que una gráfica es **conexa** si para cualquier par de vértices existe una sucesión de aristas que los une. Otra definición útil es la de **grado** de un vértice que es el número de aristas que inciden en él. [6]

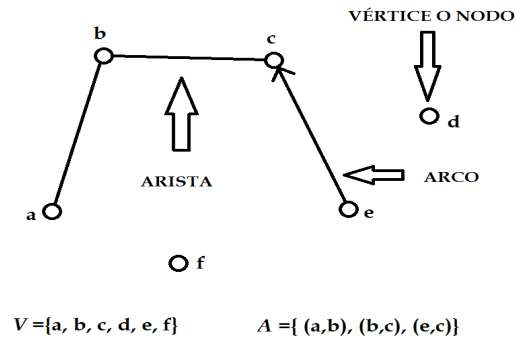


Figura 2.3: Ejemplo de una gráfica, con sus elementos: vértices, aristas y arcos. Fuente: Elaboración propia con base en Introducción a la teoría de redes. de Ma. del Carmen Hernández Ayuso.

Por ejemplo, podemos replantear el Problema de los puentes de Königsberg: sea una gráfica conexa $G = [V, A]$, encontrar un recorrido que visite cada arista de A exactamente una vez o bien informar que no es posible obtenerlo. Euler probó que es posible obtener tal recorrido siempre que el grado de cada nodo de V sea par, y su representación gráfica se muestra en la Figura 2.4, donde los vértices representan los pedazos de isla a visitar marcados con las letra A, B, C y D, las aristas representan los siete puentes

conectores.



Figura 2.4: Gráfica que representa el problema de los puentes de Königsberg sobrepuesta en el mapa. Fuente: www.librosmaravillosos.com

El problema del cartero chino se puede definir como una gráfica conexa no dirigida $G = (V, E)$, donde a cada arista se le asigna un costo, el problema consiste en encontrar un recorrido tal que visite cada arista al menos una vez al menor costo posible. Edmonds y Johnson probaron que si la gráfica asociada al problema es completamente dirigida o completamente no dirigida, *CPP* puede ser resuelto en tiempo polinomial. Pero cuando G es mixta, se convierte en un problema NP-Difícil.

Entonces si se tiene un sistema de calles a visitar la gráfica asociada al problema se construye relacionando por cada calle una arista y los vértices representan las esquinas de cada calle. Si a este problema le agregamos la restricción de visitar sólo algunas aristas se convierte en el Problema del Cartero Rural (*Rural Postman Problem* o *RPP*) el cual se define de la siguiente manera: sea una gráfica no dirigida $G = (V, E, C)$ donde C es una matriz de costos, encontrar un recorrido de costo mínimo tal que éste visite cada arista de $R \subseteq E$ al menos una vez. La diferencia entre *CPP* y *RPP* es que en el problema del Cartero Rural sólo un conjunto de aristas deben ser visitadas. En 1976, Lenstra y Rinnoy Kan demostraron que *RPP* es NP-Difícil [15].

Como podemos observar estos problemas consisten en encontrar un recorrido que comience y termine en el mismo punto, para *CARP* se requiere encontrar tantos recorridos como vehículos disponibles, además se le agregan restricciones de capacidad de los vehículos y al igual que *RPP* sólo requiere visitar un subconjunto de todos los arcos o aristas en la gráfica, dejando claro que si llega a ser difícil encontrar un sólo recorrido mínimo, aun más será encontrar más de uno. Por lo tanto, se puede revisar en [12] la demostración de que *CARP* es NP-Difícil.

A continuación se presenta el planteamiento matemático de CARP en gráficas y como problema de programación lineal, donde se plantean las restricciones que hacen que el problema sea difícil. En la sección 2.2.2 se explica la clasificación de los problemas por su dificultad para resolverlos, dividido principalmente en dos clases de complejidad P y NP .

Modelo matemático de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos

El problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (CARP) consiste en atender las demandas sobre determinadas calles de una red vial a través de una flota homogénea de vehículos, los cuales inician y finalizan sus recorridos desde un único depósito. El objetivo del problema es minimizar el costo total de recorrido de manera tal que se atiendan todas las demandas sin exceder la capacidad de carga de los vehículos involucrados. Como se observa en la Figura 2.5 el ruteo es sobre arcos (en caso de calles con sentido vial), representados por las calles marcadas de color verde, rojo y azul, por donde es obligatorio que pase el vehículo recolector, iniciando y terminando su recorrido, las tres rutas (en color café, rosa y verde), en un único depósito marcado en color amarillo.

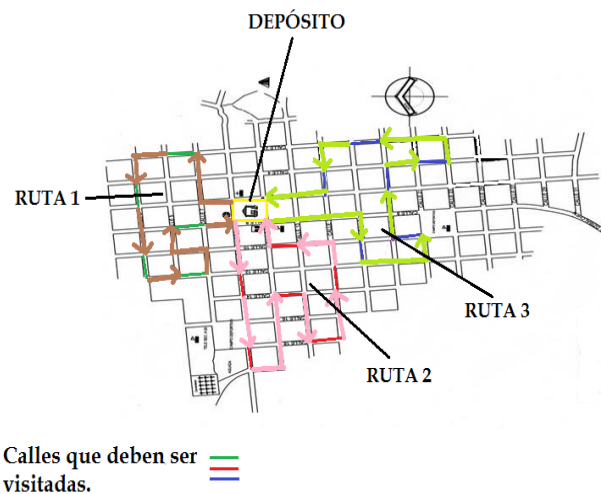


Figura 2.5: Ruteo de vehículos capacitados sobre arcos. Fuente: Elaboración propia basado en imágenes de <http://www.monografias.com/trabajos62/-iturbide-mexico/iturbide-mexico.shtml>.

El problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos también tiene una representación gráfica y su modelo matemático es el siguiente: Los problemas de ruteo de arcos son definidos mediante una gráfica $G = (V, E \cup A)$ donde V es el conjunto de vértices o nodos, E el conjunto de pares no ordenados (i, j) de vértices de V o aristas y A el conjunto de pares ordenados (i, j) de vértices de V o arcos. Una gráfica G es dirigida cuando el conjunto E es vacío, es no dirigida cuando A es vacío y mixto, si ambos conjuntos son no vacíos. El costo c_{ij} de recorrer una arista de E es positivo. Un recorrido T (o ciclo) puede ser representado mediante un vector (v_1, v_2, \dots, v_n) donde (v_i, v_{i-1}) es una arista de E ($i = 1, \dots, n - 1$) y $v_1 = v_n$.

Veamos ahora la formulación como problema de programación lineal para *CARP* [22]. Sea:

- * $G = (V, E)$ una gráfica, en este caso será la red de calles en el Sector 2 de Iztacalco;
- * V el conjunto de vértices, representa las esquinas de cada calle;
- * E el conjunto de aristas, representa cada calle en el Sector 2;
- * $R \subseteq E$ el conjunto de aristas requeridas, representa las calles que el vehículo debe visitar para recolectar los residuos;
- * $V_r \subseteq V$ el conjunto de vértices conteniendo los extremos de las aristas de R , más el vértice asociado al depósito;
- * $K = 1, \dots, M$ la flota de vehículos con capacidad de carga Q ;
- * c_{ij} el costo de recorrido de la arista (i, j) perteneciente a E , en este caso el costo es la distancia que debe ser recorrida en cada calle;
- * q_{ij} la demanda asociada a la arista (i, j) perteneciente a E , en este caso el costo es la cantidad promedio de Kg de residuos sólidos que se recolecta en cada parada;

$$q_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } (i, j) \notin R \\ > 0 & \text{si } (i, j) \in R \end{cases}$$

- * Las variables de decisión se definen como

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \text{ es recorrida por el vehículo } k \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

Entonces, la variable $x_{ijk} = 1$ cuando algún vehículo k pasa por la calle con extremos i y j , cuando vale cero quiere decir que no pasará por el arco o calle (i, j) .

La formulación matemática de CARP es la siguiente:

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad (2.1)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad (i, j) \in R \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in V_r - \{0\}} \sum_{k \in K} x_{okj} = |K| \quad (2.3)$$

$$\sum_{(i,j) \in R} q_{ij} x_{ijk} \leq Q \quad k \in K \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in V_r} x_{ijk} = \sum_{j \in V_r} x_{jik} \quad i \in V_r, k \in K \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijk} \geq \sum_{j \in V} x_{hjk} \quad S \subseteq V_r - 0, k \in K, h \in S \quad (2.6)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in R, k \in K \quad (2.7)$$

Donde la función objetivo (2.1) busca minimizar el costo total de recorrido, es decir, en este caso buscamos minimizar la distancia total recorrida por cada vehículo, sujeta a las siguientes restricciones:

- ★ El conjunto de restricciones (2.2) asegura que cada parada será atendida por un sólo vehículo;
- ★ El conjunto de restricciones (2.3) quiere decir que el número de vehículos a usar es igual al número de vehículos disponibles;
- ★ El conjunto de restricciones (2.4) asegura que no se exceda la capacidad de los vehículos disponible.

Además, de estas restricciones, se agregan las siguientes:

- ★ El conjunto de restricciones (2.5) le da continuidad a las rutas, es decir, si el vehículo k entra a una calle debe salir de ella.
- ★ El conjunto de restricciones (2.6) es de eliminación de sub-recorridos, garantiza que no haya ciclos dentro de la ruta antes de regresar al depósito. Debido a esta restricción el problema se vuelve difícil de resolver, ya que para cada vehículo se deben eliminar todos los sub-recorridos en su ruta, y dependiendo del tamaño de la instancia el número de restricciones para eliminar los subrecorridos crece exponencialmente.

2.2.2. Complejidad computacional de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos

La Teoría de la Complejidad computacional, estudia la eficiencia de los algoritmos en función de los recursos requeridos para resolver un problema, como son el tiempo de ejecución y el espacio requerido en la computadora o almacenamiento de datos; por su parte, la teoría de la computabilidad se interesa en expresar los problemas como algoritmos y hallar una solución a un problema, más no se interesa en cómo pueda implantarla.

Entonces, se puede clasificar a los problemas por su dificultad para resolverlos, esto resulta importante para poder decidir entre buscar el algoritmo más eficiente o definitivamente declarar que no existe ninguno.

En general, pueden identificarse dos tipos de problemas (Figura 2.6): aquellos que son computables y aquellos que no lo son (decidibles e indecidibles). En el primer caso, se puede distinguir entre problemas que pueden resolverse con un algoritmo determinista, en un tiempo polinomial conocido como problemas **P** y aquellos que pueden resolverse de forma aproximada con algún algoritmo no determinista en un tiempo igualmente polinomial, son llamados problemas **NP**, dentro de estos es posible identificar los problemas llamados **NP-completos** que son los más difíciles entre los **NP** y los **NP-difícil** son aquellos que al menos son tan complejos como los **NP**, pero no necesariamente pueden identificarse como **NP**. En el segundo caso, se trata de problemas para los cuales el algoritmo que lo resuelve es de tiempo exponencial o bien se trata de problemas para los cuales no se conoce un algoritmo que logre resolverlos.

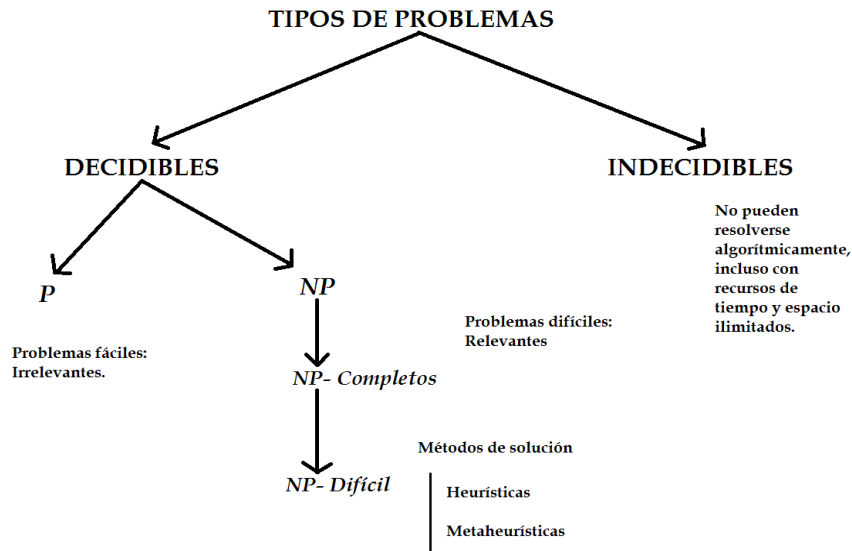


Figura 2.6: Problemas decidibles e indecidibles. Fuente: El mundo de las ciencias de la complejidad [21].

Es importante aclarar los siguientes términos, primero cuál es la diferencia entre los algoritmos deterministas y no deterministas. Los algoritmos deterministas son aquellos cuyo resultado es totalmente predictivo, es decir; si se conocen sus entradas el resultado siempre será el mismo. Así es como trabajan las computadoras de hoy en día, al programar un algoritmo se puede ver como una secuencia de estados que describen qué es lo que tiene que hacer la máquina en un instante particular y su estado actual determina cuál será su próximo estado, es decir, su paso por el conjunto de estados está predeterminado. Los algoritmos no deterministas son aquellos que, en cada paso de la ejecución tienen que adivinar qué estado es el siguiente, para lo cual no existe ninguna computadora que trabaje de esta forma.

El segundo punto importante a aclarar, es el significado de que los algoritmos resuelvan problemas en tiempo polinomial. Quiere decir, que la relación entre el tamaño del problema y su tiempo de ejecución es polinomial, ya que el número total de operaciones que ejecuta en cada paso está acotado por un polinomio. Por ejemplo, supongamos que el total de operaciones requeridas para resolver CARP está acotado por el polinomio $n^3 + 2n^2 + 2$, y el tamaño de la instancia está dada por el número de arcos n , si $n = 10$ a lo más el número

de operaciones que tiene que realizar son 1202 ($10^3 + 2(10^2) + 2 = 1202$), además esto se multiplica por una constante c que es el tiempo de ejecución de la máquina al realizar cada operación. En la Tabla 2.2, se observa la comparación del tiempo de ejecución en las funciones típicas de complejidad, las cuatro primeras son polinomiales y las dos últimas son exponenciales. Notemos cómo el crecimiento en las funciones exponenciales llega a ser radical con tan sólo una diferencia de tamaño de 10 unidades.

Tamaño \ Tiempo	10	20	30	40	50	60
n	.00001s	.00002s	.00003s	.00004s	.00005s	.00006s
n^2	.0001s	.0004s	.0009s	.0016s	.0025s	.0036s
n^3	.001s	.008s	.027s	.064s	.125s	.216s
n^5	.1s	3.2s	24.3s	1.7m	5.2m	13.0m
2^n	.001s	1.0s	17.9m	12.7 días	35.7 años	366 siglos
3^n	.059s	58m	6.5 años	3855 siglos	2×10^8 siglos	1.3×10^{13} siglos

Tabla 2.2: Comparación de tiempo de varias funciones de complejidad polinomial y exponencial. Fuente *Computers and intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness* [9]

Por lo tanto, dada la complejidad de algunos problemas, se buscaron opciones como la aplicación de técnicas heurísticas existentes, que no garantizan una solución óptima, pero que pueden proporcionar una buena solución aproximada en un tiempo razonable. Estas técnicas se enlistan a continuación y se presentan las propuestas para CARP y algunos métodos exactos. La demostración de que CARP es *NP-Difícil* fue presentada en 1981 por Golden y Wong en el artículo [12].

2.2.3. Métodos Heurísticos

Los métodos heurísticos son procedimientos sistemáticos y lógicos, no arbitrarios, que tienen un alto grado de intuición y subjetividad. Se basan en un conjunto de reglas que buscan buenas soluciones a un costo computacional razonable, pero no aseguran la optimalidad de las soluciones. Las reglas son obtenidas a partir del estudio y conocimiento del problema. [23]

Durante la década de los 80s, los métodos más utilizados para resolver problemas CARP fueron los heurísticos. Los clásicos fueron los tres primeros de la siguiente lista y más recientemente, en el 2005, se propusieron los dos últimos heurísticos en la lista. Estos métodos se pueden revisar en [20] y [27]:

- ▷ Algoritmo de *Construct-Strike*;
- ▷ Algoritmo de *Path Scanning*;
- ▷ Algoritmo de *Augment-Merge*;
- ▷ Algoritmo de *Double Outer Scan*;
- ▷ Algoritmo de *Node Duplication*.

Por otro lado, problemas CARP se han tratado con metaheurísticas, que son procedimientos de búsqueda, que tampoco garantizan la obtención de la solución óptima del problema considerado, considerado y se basan en la aplicación de reglas relativamente sencillas. A diferencia de los heurísticos, las técnicas metaheurísticas tratan de huir de óptimos locales orientando la búsqueda en cada momento dependiendo de la evolución del proceso de búsqueda. Las metaheurísticas producen en general mejores soluciones, pero el costo que hay que pagar es un mayor tiempo y esfuerzo computacional.

En la última década se han propuesto las siguientes metaheurísticas para CARP:

- ▷ *Simulated Annealing*;
- ▷ *Tabu Search*;
- ▷ *Genetic*;
- ▷ *Memetic*;
- ▷ *Ant Colony System*;
- ▷ *Guided Local Search*;
- ▷ *Variable Neighborhood Descent*.

La literatura recomienda transformar los problemas CARP en Problemas de Ruteo de Vehículos Capacitados (*Capacitated Vehicle Routing Problem* o VRP) ya que estos últimos y sus variantes, se han estudiado con mayor intensidad que las contrapartes en ruteo sobre arcos [1]. También, debido a la enorme dimensión de las gráficas que representan toda la red de calles a tratar en problemas CARP se descarta la posibilidad de aplicar cualquiera de los métodos exactos o heurísticos sofisticados.

Entre los métodos exactos que se han utilizado para problemas CARP se encuentran *Branch and Bound*, *Cutting Plane* y *Branch and Cut*, encontrando soluciones óptimas, pero el tamaño de las instancias fue relativamente pequeño ya que sólo contenían entre 15 y 50 aristas.

Por lo tanto, para resolver nuestro problema se aplicó una heurística de método de dos fases *cluster-first route-second* desarrollada por Fisher y Jaikumar para CVRP. Esta elección fue motivada por el documento “Un caso logístico del problema de ruteo vehicular múltiple m -VRP” [13], que presenta un caso de aplicación de este método a una empresa dedicada a la distribución de productos de papelería y oficina. Por otro lado, en el Capítulo 5 del libro de Toth y Vigo [25] se describen todas las heurísticas y metaheurísticas propuestas para CVRP, haciendo comparaciones entre los métodos, y expone que la calidad de las soluciones con los heurísticos de dos fases suelen ser mejores con respecto a los métodos constructivos. También en una tabla de este mismo libro (pag. 119), se muestra el resultado de 14 problemas, resueltos con los algoritmos de *sweep*, basado en asignación generalizada, localización y basado en *truncated branch-and-bound*. Para cada uno se muestra el valor de la función objetivo y el tiempo de cómputo en segundos. En la columna final de la tabla se muestra el valor de la mejor solución conocida. Donde también se puede observar que 6 de 14 valores de la función objetivo en el algoritmo basado en asignación generalizada son mejores con respecto a los demás. En segundo lugar, se encuentra el algoritmo basado en *truncated branch-and-bound* con 4 de 14, en tercer lugar es para el algoritmo basado en localización con 3 de 14 valores mejores en la función objetivo con respecto a los otros, y sólo en un caso, los tres reportaron el mismo valor de la función objetivo. Con respecto al tiempo se observa que el algoritmo basado en *truncated branch-and-bound* y el algoritmo basado en asignación generalizada son los más rápidos.

Mostrando así el buen desempeño de esta heurística de Fisher y Jaikumar, comparada con otras dentro de los método de dos fases, además es una de las dos únicas heurísticas que asume que el valor del número de vehículos es

fijo, como lo es en el problema de la recolección de residuos sólidos.

En la siguiente sección se detallan los pasos de la heurística de Fisher y Jaikumar en la metodología de solución para el problema.

2.2.4. Heurística de Fisher and Jaikumar

A continuación se describen los pasos en general a seguir de la heurística de Fisher and Jaikumar:

Paso 1 (Selección de la semilla) Elegir vértices semilla j_k en V para inicializar cada cluster k ;

Paso 2 (Asignación de clientes a las semillas) Calcular el costo d_{ik} de asignar cada cliente i a cada cluster k con la ecuación 2.8.

Paso 3 (Asignación generalizada) Resolver el problema de asignación generalizada (*Generalized Assignment Problem* o GAP) con costo d_{ij} , clientes con peso q_i y capacidad del vehículo Q .

Paso 4 (Solución TSP) Resolver un TSP para cada cluster correspondiente a la solución de GAP.

En la sección 2.3 se describe a detalle la metodología en en cada paso y en la siguiente sección se presenta el modelo matemático para problemas CARP y cuáles son las restricciones que lo hacen difícil de resolver.

2.3. Estrategia de investigación

En esta sección se describe la metodología a seguir para resolver el problema de recolección de residuos sólidos en el Sector 2 de la Delegación Iztacalco, resumida en la Figura 2.7.

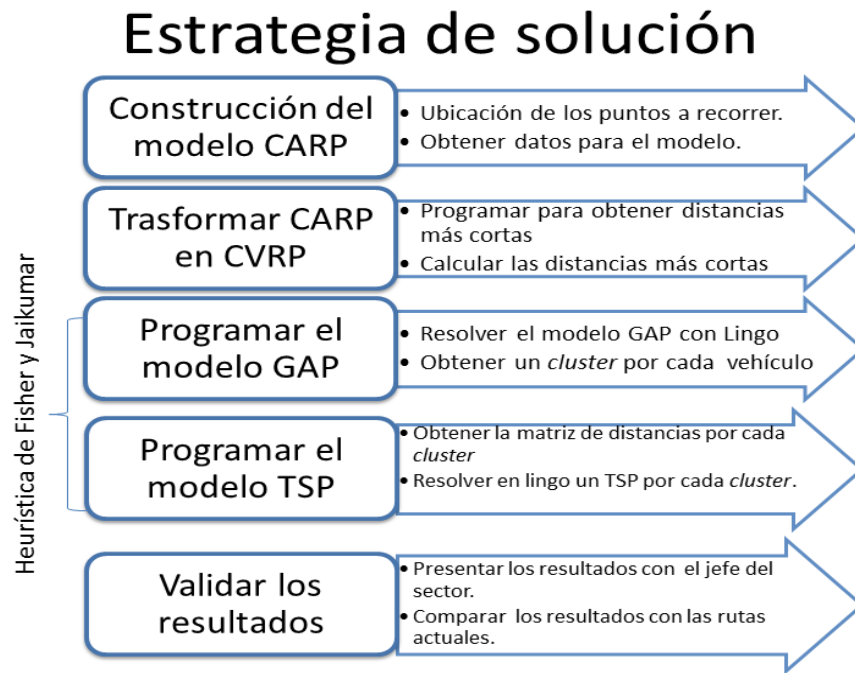


Figura 2.7: Estrategia de solución. Fuente: Elaboración propia inspirado en [22].

Antes de la estrategia de solución, se tuvo que formular el problema, decidir el modelo matemático que mejor se ajusta al problema y el método de solución.

Formulación del problema

Para estructurar el problema, primero se identificó el objeto o sistema que se quería estudiar, esto se logró con la motivación de los casos de estudio en la literatura, aplicados a la recolección de residuos. Entonces se llevó a cabo la recolección de información en Internet y entrevistas con el jefe de campamento de la Central de Abastos. Encontrando el problema planteado en el Capítulo 1, delimitando el estudio sólo a un sector de la Delegación Iztacalco.

Modelo matemático

Para elegir el modelo matemático adecuado se revisó la literatura, en este caso se eligió CARP al ser el que mejor representa el objeto de estudio. El modelo CARP tiene como características un único depósito, una flota de vehículos con capacidad limitada, un subconjunto de arcos a recorrer en la red vial y tiene como objetivo encontrar tantas rutas como vehículos disponibles a costo mínimo. Por otro lado, las características del objeto de estudio son la estación de transferencia como punto de depósito, un número limitado de vehículos con capacidades diferentes, y de igual forma no requiere visitar todas las calles como en el caso del Cartero Chino, ya que por las condiciones de las calles los vehículos no pueden acceder por todas partes, haciendo que visiten sólo un subconjunto de ellas. Además, queremos rediseñar las rutas para minimizar la distancia recorrida por cada vehículo y a su vez el tiempo.

Elección del método de solución y recolección de datos

Para elegir el método de solución también se revisó la literatura, tomando en cuenta las características del modelo y el tamaño de la instancia, justificado en la sección 1.3, por lo que se recurrió a los heurísticos y en particular al recomendado por los autores, que daba mejores soluciones, y que se revisó en la sección 2.2.3. Una vez elegido el modelo y el método de solución, se llevó a cabo otra recolección de datos como fueron la capacidad de los vehículos, la cantidad aproximada de basura recolectada en cada parada y las distancias entre cada punto a visitar. Teniendo como estrategia de solución los siguientes pasos mostrados en la Figura 2.7

Construcción del modelo CARP

Primero se obtuvieron los siguientes datos para el modelo CARP: el mapa del Sector 2 de Iztacalco, con la dirección y la ubicación de cada uno de los puntos a visitar por cada vehículo, el número y la capacidad de los vehículos. Por lo tanto, con base en el mapa se planteó una gráfica, donde una calle está representada por un arco si la calle tiene algún sentido para recorrerla y por una arista en caso de no tener un sentido asignado. Las esquinas de las calles son representadas por vértices. Se resaltan los arcos y las aristas por donde, forzosamente, tiene que pasar un vehículo, en el caso de haber más de dos paradas en una calle ésta se toma como un sólo arco o arista. En la

Figura. 2.8 se muestra como se modela el mapa con las calles a través de una gráfica.

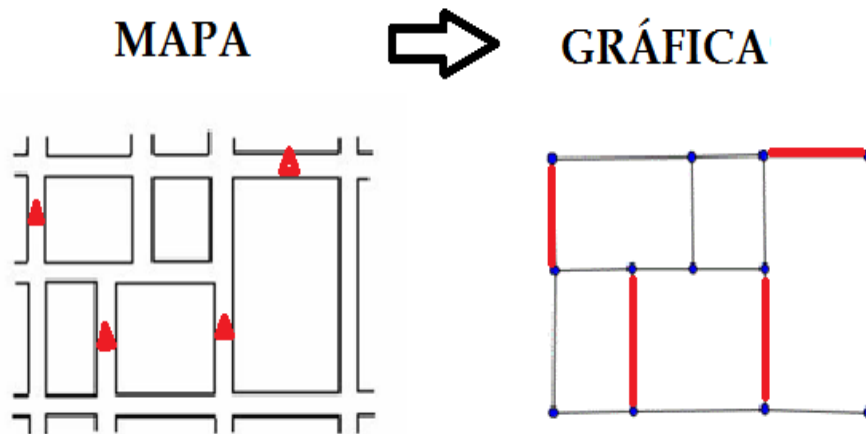


Figura 2.8: Formulación de una red CARP. Fuente: Elaboración propia con base en <http://www.mat.ucm.es/catedramdeguzman/modelizaciones/proyectos/proyecto10/caterofp.htm> .

Esta misma formulación se aplica para el problema del cartero chino sólo que ese problema considera que se tienen que visitar todas las calles y en nuestro caso sólo nos interesa visitar las calles con un triángulo rojo, o bien recorrer los arcos o las aristas de color rojo en la gráfica.

Transformación de CARP a ACVRP

Sea R el conjunto de arcos (i,j) obligados a recorrerse y llamaremos vértice saliente a j y vértice entrante a i .

Para hacer la transformación de una instancia de CARP dirigido a un problema de ruteo de vehículos capacitados asimétrico ACVRP, primero se asocia a cada arco obligado a recorrerse en el CARP un nodo en el ACVRP, el cual hereda la demanda asociada al arco, manteniendo el nodo del depósito, como se muestra en la Figura 2.9. Por ejemplo, el arco $(3,7)$ en la red del CARP ahora es un nodo en la red del CVRP y se mantiene el vértice depósito (cuadro con un cero). En una segunda etapa se calcula la trayectoria más

corta entre cada vértice saliente j (incluyendo el vértice depósito 0) y para cada vértice entrante h (incluyendo el vértice depósito 0), para cada par de vértices $(i,j), (h,l) \in R$. En el caso de la trayectoria más corta desde j agregar la distancia $dist(i,j)$. El resultado de esta transformación es una gráfica con $m + 1$ vértices y a lo más $m^2 + m$ arcos, los cuales definen una instancia de ACVRP. Como se puede observar en la Figura 2.9 la gráfica que resulta es más sencilla, con menos vértices y aristas.

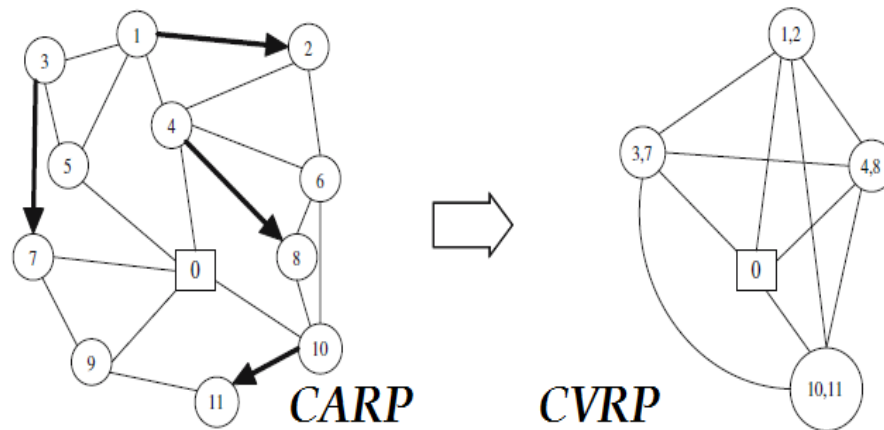


Figura 2.9: Transformación CARP a CVRP. Fuente: Elaboración propia inspirado en [22].

Esta transformación está basada en el trabajo de Maniezzo 2004 [22].

Elección de los clientes semilla

Dentro de la primera fase se fijan los clientes semilla, que son la base para construir los clusters. Pueden elegirse los clientes semilla aleatoriamente o aplicando el problema de la p -mediana como en *Waste collection in Southern Italy: solution of a real-life arc routing problem* [10]. Pero en nuestro caso se consideraron los clientes semilla como las paradas donde actualmente comienza cada ruta.

Programar el modelo GAP

Este modelo requiere de cuatro parámetros: los clientes semilla, la demanda en cada parada, la capacidad de los vehículos y el costo por asignación de

clientes a los clientes semilla. Estos costos se obtienen calculando las distancias del nodo origen N_o o depósito a todos los clientes N_i , de todos los clientes N_i a los clientes semilla S_j , las distancias de todos los clientes semilla a todos los clientes y de todos los clientes al origen. Con estas distancias se calculó el costo c_{ij} de insertar un cliente i al *cluster* j con la siguiente fórmula:

$$c_{ij} = MIN[d_{N_oN_i} + d_{N_iS_j} + d_{S_jN_o}, d_{N_oS_j} + d_{S_jN_i} + d_{N_iN_o}] - [d_{N_oS_j} + d_{S_jN_o}] \quad (2.8)$$

Ya que se obtuvieron los datos de las distancias, la capacidad de los vehículos y las demandas en cada parada, se resolvió el modelo con el software Lingo 9.0. El modelo matemático y el programa se presentan en el Capítulo 3. Como resultados se obtuvieron los conjuntos de paradas llamados *clusters*.

Programar el modelo TSP

A cada conjunto de clientes o *cluster* resultante en el modelo GAP, se le construyó su matriz de costos (distancias), y se diseñó la ruta resolviendo el modelo TSP en Lingo 9.0. El modelo y el programa se presentan en el Capítulo 3. El resultado es el orden en que se visitará cada elemento en un cluster, es decir, la ruta óptima para cada vehículo recolector.

Por último, se obtiene la ruta más corta en el mapa con el uso de la aplicación de *Googlemaps*, esto es, por cada par consecutivo en la secuencia óptima y se obtiene la sucesión de calles a visitar para llegar de una parada a otra.

Validar los resultados

Se verificó que los resultados obtenidos fueran coherentes y útiles. Para validar el modelo se compararon los resultados con lo observado en el sistema actual y también se realizó la validación mediante la retroalimentación con el Jefe de limpia del sector.

2.4. Aportaciones de la propuesta

Aportaciones importantes de este trabajo:

- Propuesta de nuevas rutas para el Sector 2 de la Delegación Iztacalco que minimizan la distancia recorrida por cada vehículo;

- Una metodología para aplicarse a otros sectores con características similares a las de la Delegación Iztacalco;
- Un ejemplo de cómo la teoría algunas veces no funciona tan bien al aplicarla a problemas reales, obligando a ajustar las soluciones obtenidas de los modelos.

Capítulo 3

Desarrollo de la propuesta de solución

Para resolver el problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos CARP, primero se hizo una transformación a un problema del tipo CVRP como en *Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support* [22] para luego aplicar a éste la heurística de Fisher & Jaikumar [8], que pertenece a los métodos de dos fases bajo la secuencia *cluster first-route second*. Para este método, en la primera fase se asignan los *cluster* o conjuntos de clientes (paradas) a los vehículos, y se resuelve con el problema de asignación generalizada GAP, fijando n clientes semilla con $j = 1, \dots, n$ como base para construir los *clusters*. En la segunda fase se realizó el ruteo de cada cluster, mediante la resolución de un problema del agente viajero TSP.

3.1. Construcción del modelo de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos

Como se mencionó en el Capítulo 1, la investigación y parte de la recolección de datos se llevó a cabo en la oficina del Sector 2 de Iztacalco, donde se proporcionó el mapa del sector dividido en las siete rutas actuales (Figura. 1.9), cada una con su número de paradas, la secuencia de visita, el tiempo aproximado en cada parada y el tipo y número de camiones con que cuenta el sector.

El primer paso, fue identificar en el mapa la red de arcos, aristas y vértices como se mostro en la Figura 2.8. Como podemos imaginar, la red sería muy grande al tener al menos un arco por cada calle y un vértice por cada esquina, por tal motivo no se pueden aplicar ni métodos exactos ni heurísticos para el problema CARP, obligando a transformar el problema a uno del modelo CVRP [22]. Pero lo importante es identificar las calles que representan las paradas que deben visitar los vehículos recolectores. Para lo cual se utilizó la aplicación *maps* de *Googlemaps*.

3.1.1. Ubicación de paradas en Googlemaps

Por cada parada se buscó en <https://www.google.com.mx/maps/> el punto medio de la calle a visitar, en su forma de coordenadas, como se muestra en la Figura 3.1. En el puntero rojo aparece la ubicación en forma de coordenadas geográficas (grados, minutos y segundos) dado por $19^{\circ}23'41.7''N$, $99^{\circ}06'08.0''W$, pero en el recuadro de la parte superior izquierda aparece en forma de coordenadas decimales como 19.394916, -99.102210.

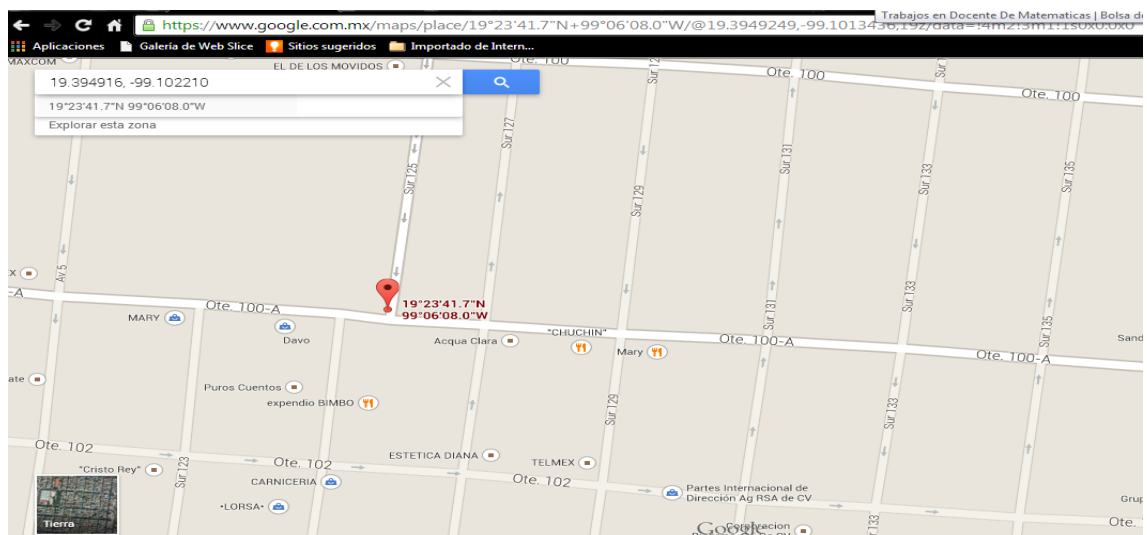


Figura 3.1: Ejemplo de ubicación de puntos en Googlemaps. Fuente: <https://www.google.com.mx/maps/>

En total, se obtuvieron 171 ubicaciones, incluyendo el lugar de depósito que es el centro de transferencia en la Central de Abastos, las coordenadas

se pueden revisar en el anexo A de Microsoft Excel ® llamada “coordenadas de paradas”.

3.2. Transformación de ruteo sobre arcos a ruteo sobre vértices

Como se mencionó en la sección 2.3, para transformar la red CARP a una CVRP, a cada arco donde se ubican las paradas se le asocia un vértice, y estos vértices quedan unidos por aristas que representan las distancias más cortas entre cada par de paradas, sumando la distancia de la calle a recorrer. Las rutas más cortas se calculan con respecto a las distancias reales recorridas por las calles y no las distancias de forma euclidiana como se muestra en los mapas. Para lograr esto, se programó una API en *Google* que es un servicio que proporciona el tiempo y la distancia de viaje para una matriz de orígenes y destinos.

La información obtenida es la ruta más corta calculada entre los puntos de partida y llegada según los cálculos del API de *Googlemaps*. Esto se programó de tal forma que el resultado es la matriz de tiempo y distancia en un archivo de Microsoft Excel. El código no se muestra en el presente trabajo por que es muy extenso, pero se puede revisarse en el Anexo B en el archivo “ruta 3”. La matriz de distancias más cortas se encuentra en el anexo A de Excel llamada “matriz171”.

El resultado es una gráfica completa (unión de todos los vértices con todos) de 171 vértices que representa las calles donde los vehículos tienen que parar para la recolección, las aristas que los unen representan la ruta más corta y tienen asignado un peso que es la distancia. Por lo tanto, se tuvo un problema de ruteo de vehículos capacitados CVRP, que puede resolverse con la heurística de Fisher y Jaikumar como se describe a continuación.

3.3. Programación del Problema de Asignación Generalizada

La primera fase para resolver el problema con el modelo CVRP consistió en resolver el Problema de Asignación Generalizada (GAP), para el cual son necesarios los siguientes parámetros:

Clientes semilla Se tomaron como clientes semilla los puntos donde inicia actualmente cada ruta;

Costo por asignación de clientes a los clientes semilla El costo de asignación de clientes C_{ij} se calculó al aplicar la ecuación 2.8 utilizando los valores de la matriz de distancias más cortas, pero al obtener la solución, los resultados estaban muy alejados de valores coherentes con el problema real, ya que los puntos se apreciaban muy dispersos en su ubicación. Por ejemplo, cuatro puntos muy cercanos quedaban en cuatro *cluster* distintos, lo cual ocasionaría que los camiones se llegaran a intersectar en la jornada. Por esta razón, se decidió asignar como parámetros de costo, sólo las distancias de cada nodo semilla a todos los demás;

Demanda por cada parada Entre los datos proporcionados por el Jefe de limpia del Sector 2 de Iztacalco, estaba la demanda de 250 kg aproximadamente por parada. Tomando en cuenta la capacidad máxima de demanda y la capacidad máxima de los camiones, se observó que la capacidad de los camiones no alcanza para cubrir toda la demanda en el sector;

Capacidad de los vehículos Se utilizó su capacidad máxima de 6 toneladas en los de tipo carga trasera y a uno de doble separación se le asignó lo doble de su capacidad, para poder cubrir con las demandas totales del sector que son 7 toneladas y al segundo camión de doble separación se le asignó su capacidad máxima de 3.5 toneladas.

3.3.1. Modelo matemático de asignación generalizada

El modelo matemático para el Problema de Asignación Generalizada (GAP), puede ser formulado como un problema de programación entera, con el objetivo de minimizar el costo total de la asignación como se presenta

a continuación:

Parámetros:

I : Conjunto de clientes ($i = 1, \dots, n$)

J : Conjunto de clientes semilla S_j ($j = 1, \dots, m$)

a_j : Capacidad del recurso j

b_{ij} : Necesidad de capacidad si el cliente i es asignado al cliente semilla j

c_{ij} : Costo del cliente i si es asignado al cliente semilla j

Las variables son:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } i \text{ es asignado al cliente semilla } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

s.a

$$\sum_{i=1}^n b_{ij} x_{ij} \leq a_j, j = 1, \dots, m \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = a_j, i = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (3.4)$$

La restricción 3.2 describe el cumplimiento con la capacidad del recurso a utilizar; la restricción 3.3 asegura que un cliente i sólo será asignado a un cliente semilla j , ya que la variable x_{ij} es binaria (3.4). Este modelo matemático puede programarse en el *software* LINGO con el siguiente pseudocódigo, al cual sólo se le deben asignar los parámetros.

3.3.2. Pseudocódigo del modelo de asignación generalizada

El siguiente código es el que escribimos en LINGO junto con los parámetros del problema en el lugar que se indica, dando como resultado 8 *clusters*,

uno para cada vehículo disponible en el Sector 2 de Iztacalco.

```
SETS:
1) CLIENTE/1, 2, 3, ... n/:DEMANDA;
2) SEMILLA/S1, S2, S3, ...Sm/:CAPACIDAD;
3) PAR(CLIENTE,SEMILLA):DISTANCIA,D;
ENDSETS
DATA:
4) DEMANDA = Aquí se introduce la columna de demandas ;
5)CAPACIDAD = 120;
6) DISTANCIA = Aquí se coloca la matriz de costos ;
ENDDATA
MIN= @SUM (PAR: D * DISTANCIA);
@FOR (CLIENTE(I):
7) @SUM (PAR(I,J): D(I,J))= 1;);
@FOR ( SEMILLA(J):
8) @SUM (PAR(I,J):DEMANDA(I)* D(I,J))i= CAPACIDAD(J););
@FOR (PAR: @BIN(D));
END.
```

Este código evita el escribir muchas variables y restricciones. SETS define el conjunto de variables a utilizar en el modelo como son: 1) el número de clientes y sus demandas, que en este caso corresponden a las paradas a visitar en cada calle.; 2) El conjunto de clientes semilla donde comenzará su ruta cada camión; 3) La variable de asignación de un cliente a un cliente semilla. El comando DATA define el conjunto de parámetros que se introducen en forma de vector o matriz. En 4) se colocan las demandas en cada parada; en 5) la capacidad de cada camión recolector y en 6) la matriz de distancias de cada semilla a todos los demás clientes. En 7) se definen las restricciones de asignación de clientes a los clientes semilla y por último, en 8) la restricción para que la capacidad del camión no se exceda.

3.3.3. Resultados del modelo de asignación generalizada

Los *clusters* obtenidos se muestran en la tabla 3.1, éstos proporcionaron una mejor solución, comparada con la resultante al introducir los costos

propuestos por Fisher & Jaikumar [8], por lo tanto, se hicieron algunos intercambios de clientes para llegar a un mejor arreglo de conjuntos, es decir más conveniente a la realidad. La numeración corresponde a la asignada en la ubicación de puntos en *Googlemaps*.

Cliente semilla S_j	Clientes asignados al <i>cluster</i> j
$S_1=1$	1, 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 63, 67, 68, 69
$S_2=23$	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 17, 18, 19, 23, 24, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45
$S_3=46$	46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 70, 87, 90
$S_4=71$	71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 99, 100
$S_5=101$	101, 102, 103, 104, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123
$S_6=124$	18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28
$S_7=155$	125, 126, 127, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 154, 155, 156, 158, 159, 160, 163
$S_8=157$	144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 157, 161, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171

Tabla 3.1: Asignación de clientes a cada cliente semilla formando 8 *clusters*. Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.

Para tener una visión más clara de la solución obtenida por GAP la Figura. 3.2 presenta el área comprendida por los nuevos conjuntos de paradas. Las rutas quedan más equilibradas ya que recorren casi el mismo número de paradas. En las rutas propuestas anteriormente había algunas con 15 puntos y otras hasta con 46 puntos. También hay que hacer notar que la ruta azul claro en el conjunto de paradas propuesto, parece tener pocos puntos, pero en su mayoría recorre calles muy largas en las que se requiere hacer dos paradas.

Ahora será necesario, hacer el ruteo, resolviendo un problema tipo TSP por cada *cluster*. En la siguiente sección se muestra la formulación de programación entera, el código para poder resolverlo en LINGO y los resultados.

3.4. Programación del Problema del Agente Viajero

Resolver el Problema del Agente Viajero (TSP) es la segunda fase para resolver el problema CVRP. Su función es encontrar el recorrido óptimo, con inicio y final en el vértice depósito y recorrer cada elemento del *cluster*. Entonces, se toma la información presentada en la tabla 3.1, y por cada *cluster* se calcula su matriz de distancias con la API de Googlemaps programada previamente. Las 8 matrices de distancias más cortas pueden consultarse en el Anexo A llamada “Matrizcluster”. Estas distancias son los únicos parámetros que requiere el modelo.

3.4.1. Modelo matemático del agente viajero

El problema del agente viajero TSP es representado por la siguiente formulación de programación entera, que se programó en LINGO.

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3.5)$$

s.a

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n \quad (3.7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A \quad (3.8)$$

Sea $G = (V, A)$ donde $V = \{1, \dots, n\}$ y $A = \{(i, j) : i, j \in V\}$, una gráfica y sea c_{ij} el costo asociado al arco (i, j) , y x_{ij} la variable de decisión. El modelo

presenta en (3.5) la minimización de c_{ij} en función a los arcos seleccionados x_{ij} , con restricciones (3.6) y (3.7), las cuales aseguran que un sólo camión atenderá a una determinada parada, (3.8) declara que x_{ij} esta en función de una variable binaria. Pero a la formulación de programación entera para TSP, es necesario añadir restricciones para eliminar los subtours que son formados por nodos intermedios. A continuación se presentan las restricciones en 3.9, propuestas por Miller-Tucker-Zemlin.

$$u_i - u_j + px_{ij} \leq p - 1, 1 \leq i \neq j \leq n \quad (3.9)$$

Donde, p denota el máximo número de paradas que pueden ser visitadas por un camión.

3.4.2. Pseudocódigo del modelo del agente viajero

El siguiente código se escribió en LINGO junto con la matriz de distancias. Por lo tanto, se resolvieron 8 TSP's, uno por cada *cluster* obtenido en GAP. La solución es la distancia mínima al recorrer todos los puntos en el *cluster* y la secuencia u orden de cómo recorrerlos.

```

SETS:
1) CITY / 1.. 5/: U; ! U( I)
2) LINK( CITY, CITY):
3) DIST,
4) X;
ENDSETS:
DATA:
5) DIST = MATRIZ DE DISTANCIAS;
ENDDATA
6)N = @SIZE( CITY);
7)MIN = @SUM( LINK: DIST * X);
@FOR( CITY( K):
8) @SUM( CITY( I)— I #NE# K: X( I, K)) = 1;
9) @SUM( CITY( J)— J #NE# K: X( K, J)) = 1;
@FOR( CITY( J)— J #GT# 1 #AND# J #NE# K: U( J) <= U( K) + X
( K, J) -
( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +
( N - 3) * X( J, K)

```

```

);
);
@FOR (PAR: @BIN(D));
@FOR ( CITY( K)— K #GT# 1:
U( K) j= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
U( K) i= 1 + ( N - 2) * X( K, 1)
);
END

```

En 1) se define el número de clientes a visitar incluyendo el depósito, 2) define el enlace de cliente a cliente en términos de 3) y 4). 5) proporciona la matriz de distancias entre los clientes del *cluster* que se construyen en la sección 3.3.3 6) está dado por el número del circuito a formar. En 7) se tiene la función objetivo que consiste en minimizar la distancia recorrida en el circuito, 8) es la restricción que garantiza la asignación a cada parada de un único camión recolector y por último, se tiene la restricción de eliminación de subtours en 9). En la siguiente sección se muestra el resultado y la comparación de las 8 rutas y sus distancias totales recorridas.

3.4.3. Resultados del modelo del agente viajero

En esta sección además de presentar el ruteo por cada cluster obtenido con GAP, se presentan otros 8 ruteos, uno por cada conjunto de paradas en las rutas actuales.

La tabla 3.2 muestra la sucesión a seguir en cada *cluster* comenzando y terminando siempre en el vértice depósito que tiene asignado el número 172 para todos los *clusters*. Para cada cluster se calculó su matriz de distancias más cortas, las cuales se pueden consultar en el Anexo A llamada “Matriz-cluster”. En las Figuras 3.4, 3.6, 3.8, 3.10, 3.12, 3.14, 3.15 y 3.17, presentan los mapas en los que se pueden observar las rutas descritas en la tabla. En cada mapa, las paradas están numeradas en el orden en que deben ser recorridas. El lugar de depósito no se muestra en los mapas, debido a que su ubicación es lejana a cada área de las rutas.

Además, de resolver un TSP para cada *cluster* resultante en GAP, también se resolvió un TSP para el conjunto de paradas en las rutas actuales, calculando su matriz de distancias más cortas, que se pueden consultar en el Anexo A llamado “Matrizact”. Las nuevas secuencias del conjunto de para-

das actuales se muestran en la tabla 3.3, demostrando así que los recorridos actuales no son muy eficientes. En las Figuras 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 3.11, 3.13 y 3.16 podemos observar las rutas actuales en el orden, en que los camiones las recorren actualmente y comparar con las nuevas rutas propuestas para cada vehículo.

Número de Ruta	Sucesión de clientes a visitar por cada <i>cluster</i>
R_1	172→22→16→14→13→12→20→21→4→3→2→1→28 →27→26→25→32→63→67→68→31→69→30→29→172
R_2	172→12→11→10→9→8→37→44→42→38→41→40→7 →6→5→19→18→17→39→43→36→35→34→33→172
R_3	172→46→48→56→57→59→61→60→58→47→49→51→ 50→55→54→66→52→53→87→90→62→64→65→70→172
R_4	172→99→100→85→86→74→73→72→71→75→76→77 →80→79→78→82→84→83→172
R_5	172→118→108→107→117→120→116→114→106→115 →113→109→105→123→103→102→101→112→111→104 →110→122→121→119→172
R_6	172,→93→95→91→89→88→95→96→97→98→92→172
R_7	172→154→143→142→140→133→137→138→139→136 →134→135→159→156→155→160→163→129→130→ 128→141→126→127→131→132→158→172
R_8	172→169→165→164→125→150→124→167→152→153 →151→148→149→166→147→146→145→144→157 →161→162→171→170→168→172

Tabla 3.2: Resultado de ruteo de los 8 *clusters*. Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.

Número de Ruta	Sucesión de clientes a visitar por cada camión
R_1	172→22→16→15→14→13→12→11→10→9→8→17→18 →7→6→5→19→20→21→4→3→2→1→172
R_2	172→28→27→26→25→24→23→43→45→41→40→39→ 37→44→42→38→36→35→34→33→32→31→30→29→172
R_3	172→53→66→54→70→64,62→65→50→51→49→47→ 46→48→57→59→61→60→58→56→55→52→63→67 →68→69→172
R_4	172→93→98→86→83→82→81→80→73→72→71→79→ 78→75→76→77→74→84,15→29→30→26→27→85→99 →100→96→97→94→95→91→92→90→89→88→87→172
R_5	172→118→108→107→117→120→116→114→106→115 →113→109→105→123→103→102→101→112→111 →104→110→122→121→119→172
R_6	172→145→154→133→137→136→134→135→129→131 →130→127→128→126→125→152→124→150→172
R_7	172→146→144→143→142→140→139→138→141→132 →156→155→153→151→148→149→147→172
R_8	172→146→144→143→142→140→139→138→141→132 →156→155→153→151→148→149→147→172

Tabla 3.3: Resultado de ruteo del conjunto de paradas actual. Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.

En la Tabla 3.4 se comparan tres tipos de distancias por cada ruta, la

columna de Rutas actuales, muestra la distancia total recorrida en metros por las rutas actuales, éstas se obtuvieron de la matriz de distancias más cortas y en la realidad puede ser mucho mayor la distancia recorrida. En la columna TSP de rutas actuales, se muestra la distancia total recorrida al aplicar TSP al conjunto de paradas actual por cada ruta. La columna de TSP de nuevas rutas, muestra las distancias totales que tienen que recorrer con las rutas propuestas al aplicar GAP y TSP.

En las columnas TSP rutas actuales y TSP nuevas rutas se presentan los valores óptimos que obtenidos con LINGO 9, excepto el valor marcado con * que sólo dio una solución factible que también mejora la distancia recorrida actualmente. En la última línea la Tabla 3.4 muestra los metros totales recorridos en cada caso, por lo tanto se tiene un ahorro de $24.1km$ con sólo aplicar TSP al conjunto de paradas actuales, y un ahorro de $22.1km$ en la propuesta de nuevas rutas. Pero tiene como ventaja que el trabajo queda mejor distribuido entre los operadores de los camiones. En las rutas actuales el rango de paradas va de 15 a 46, y con las rutas propuestas el rango cambia de 23 a 26 paradas por cada vehículo.

Ruta	Rutas actuales	TSP de rutas actuales	TSP de nuevas rutas
R_1	13702	11529	11609
R_2	17840	12381	13039
R_3	11740	11273	10781
R_4	16096	15810*	13214
R_5	18156	11221	11221
R_6	12184	10926	11187
R_7	15898	10066	11509
R_8	11050	9305	11956
Total	116674	92511	94516

Tabla 3.4: Distancias en metros recorridas por cada ruta. Fuente: Elaboración propia con base en resultados de LINGO.

En las figuras siguientes, se muestran los puntos a recorrer, numerados conforme al orden actual y en segundo lugar el orden de la solución óptima de TSP en Lingo. Las rutas actuales y las propuestas para cada vehículo se distinguen por colores, primero se muestra el recorrido que hacen actualmente y en la segunda figura se muestra el recorrido propuesto.

La Ruta 1. consta actualmente de 22 paradas y es atendida por un camión de carga trasera. La ruta propuesta tiene ahora 24 paradas y a pesar de haberse incrementado en dos paradas recorre 2km menos aproximadamente.

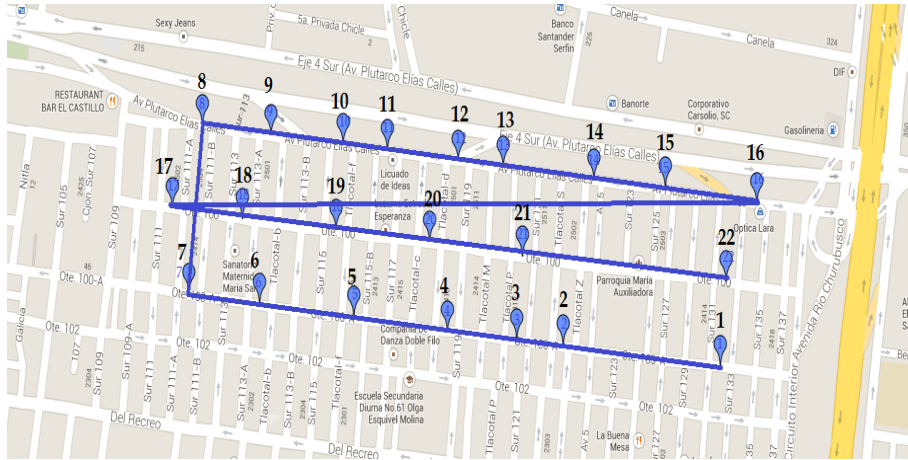


Figura 3.3: Ruta 1 con 22 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

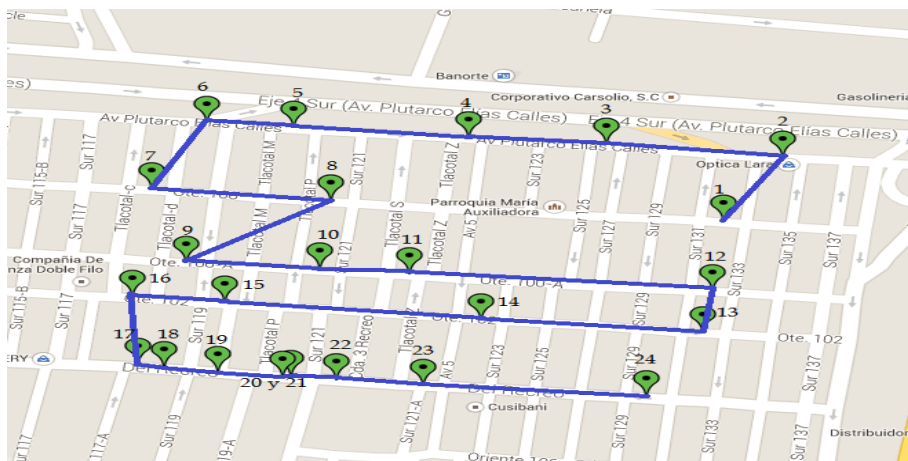


Figura 3.4: Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 1, ahora con 24 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

La Ruta 2. consiste actualmente de 23 paradas y tiene asignada un vehículo de doble separación. La ruta propuesta consta de 23 paradas pero no to-

das ellas están en el mismo lugar que las anteriores y en ellas se recorren, recorriendo 4.8km menos aproximadamente. Para resolver el modelo GAP consideró para el vehículo el doble de su capacidad, que a la mitad de su recorrido deberá regresar a la estación de transferencia a descargar.

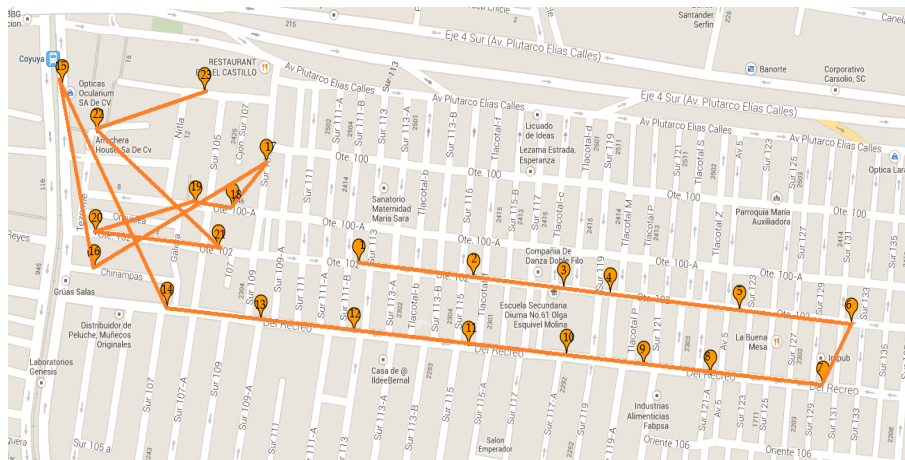


Figura 3.5: Ruta 2 con 23 paradas, secuencia y área actual de recorrido
Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

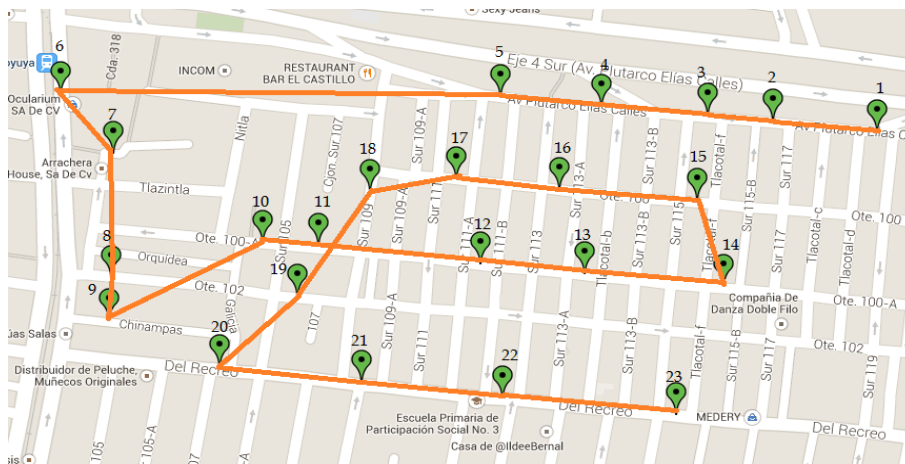


Figura 3.6: Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 2, también con 23 paradas.
Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

La Ruta 3. recorre actualmente 25 paradas con un camión de carga trasera

y la ruta propuesta recorre sólo 23 paradas, con un ahorro de un kilómetro.



Figura 3.7: Ruta 3 con 25 paradas, secuencia y área actual de recorrido
Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

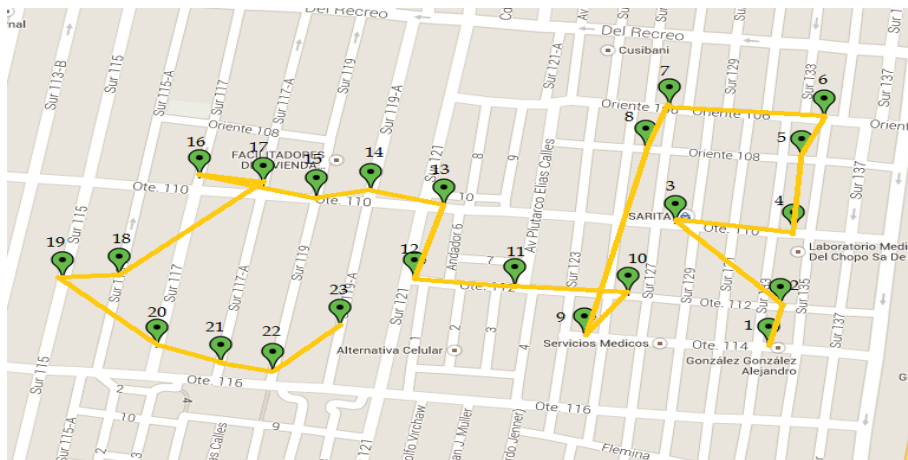


Figura 3.8: Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 3, con 23 paradas.
Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

En la Ruta 4, el camión asignado es de carga trasera y actualmente recorre 30 paradas. En esta ruta la mayoría de las calles son muy largas y esas calles cuentan con dos paradas. La ruta propuesta consta de 17 paradas algunas

dobles, haciendo equilibrado el trabajo con respecto a los otros vehículos del sector. En esta nueva ruta el recorrido tiene 2.8 km menos.

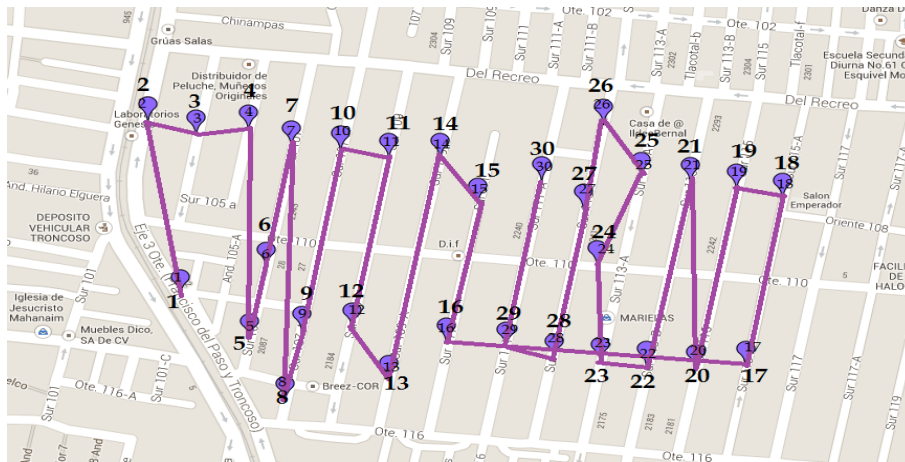


Figura 3.9: Ruta 4 con 30 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

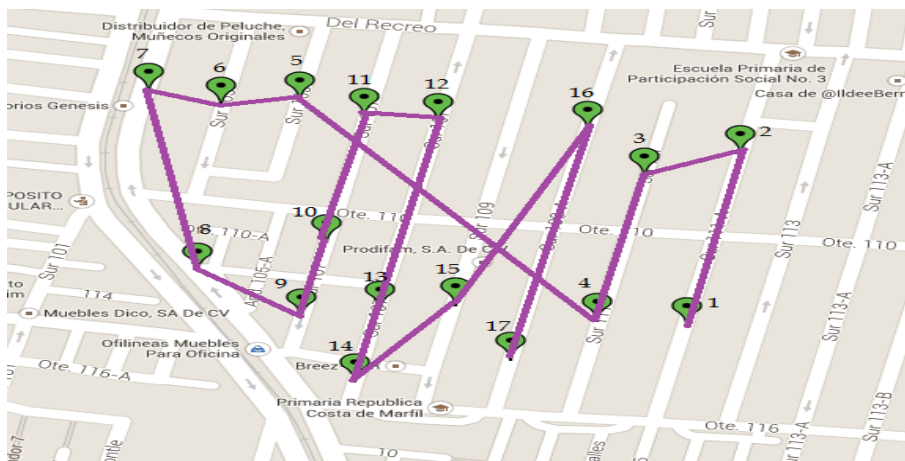


Figura 3.10: Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 4, ahora con 17 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

En la Ruta 5. el camión asignado es de carga trasera. esta es la única ruta que permaneció con el mismo número de paradas y su ubicación. Sin embargo, al cambiar el recorrido se presenta un ahorro de casi 7 Km.

25 paradas aprovechando más su capacidad. El ahorro en distancia recorrida, a partir de estas nuevas rutas es de 1 Km y 4 Km respectivamente.

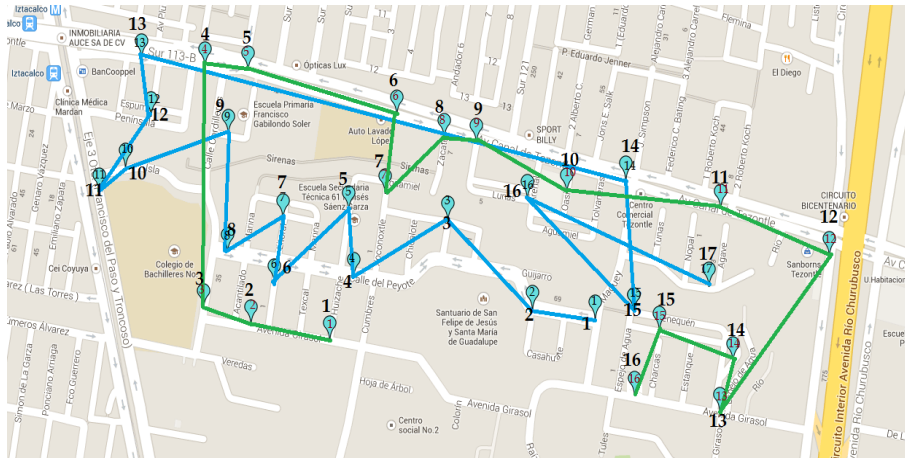


Figura 3.13: Ruta 6 (azul) y 7 (verde) con 17 y 16 paradas respectivamente, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

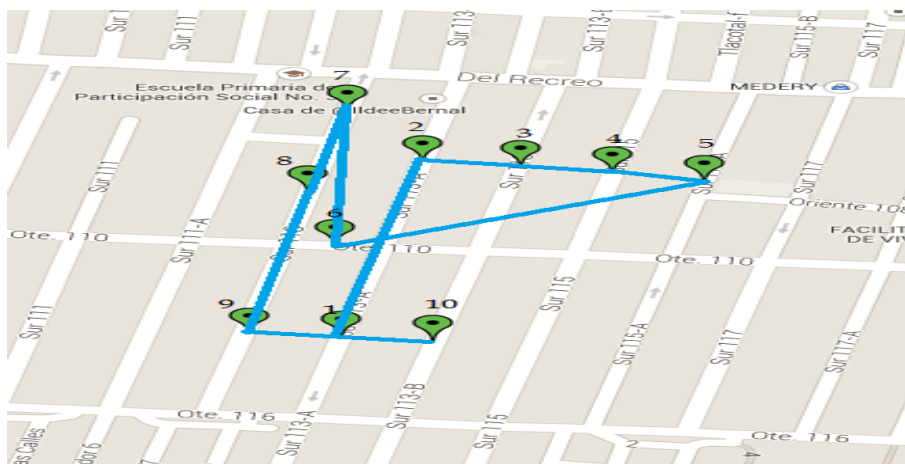


Figura 3.14: Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 6, ahora con 10 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

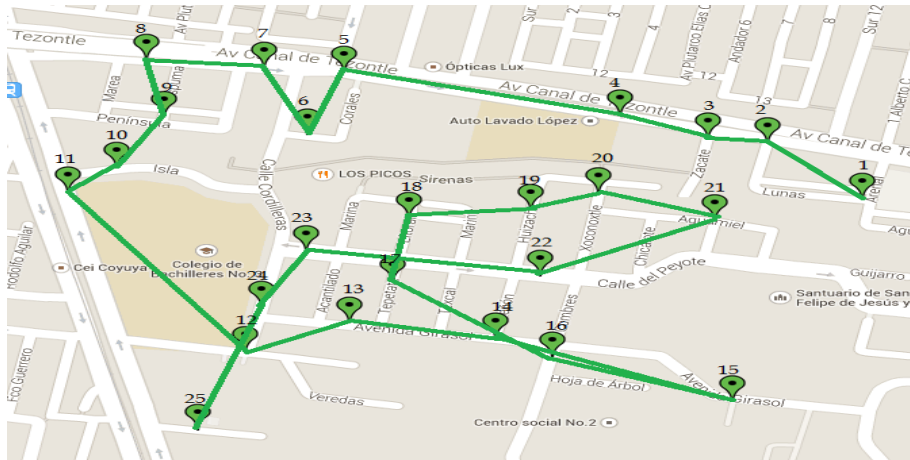


Figura 3.15: Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 7, ahora con 25 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

Por último, en la Ruta 8. el camión asignado es de carga trasera. Actualmente recorre 15 paradas, y en la ruta propuesta recorre 23. El ahorro en distancia recorrida por la nueva ruta es de 2km aproximadamente.



Figura 3.16: Ruta 8 con 15 paradas, secuencia y área actual de recorrido. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

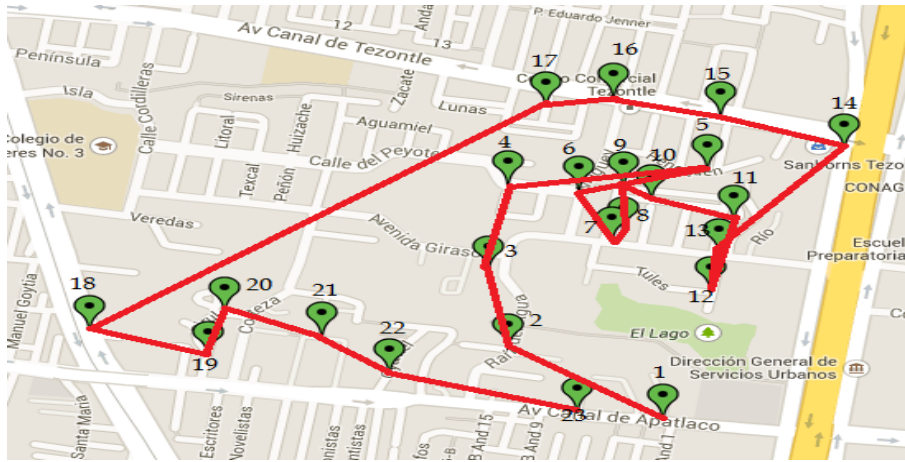


Figura 3.17: Ruta propuesta para el vehículo de la ruta 8, ahora con 23 paradas. Fuente: Elaboración propia con base en Googlemaps.

3.5. Validación del modelo

La validación del modelo conceptual consiste en establecer si con la abstracción que hemos realizado sobre el sistema real, se podrá responderse a las cuestiones planteadas por la investigación. La validación responde preguntas como: ¿Contiene el modelo todos los elementos, sucesos, y relaciones relevantes? ¿Podrá el modelo responder las preguntas de investigación?

En el Capítulo 2 se justifica por qué el modelo CARP es el que mejor representa el sistema real, haciendo una correspondencia uno a uno entre cada elemento del modelo y cada elemento del sistema. Los elementos del sistema son una flota limitada de vehículos, las demandas en cada parada asociadas a la cantidad de residuos que se recolectan, la capacidad de los vehículos, un subconjunto de calles a visitar y no todas las de la red vial, un único depósito que es la estación de transferencia. Cada elemento anterior se puede asociar a los parámetros del modelo CARP.

Además, se tomó en cuenta restricciones viales como: definir andadores por donde los camiones recolectores no pueden pasar, vueltas prohibidas, entre otras. Todas ellas integradas en la API de Googlemaps, también se programó el cálculo de la ruta más corta.

Por otra parte, el modelo pudo responder a las siguientes preguntas: ¿Las rutas actuales pueden mejorarse? y ¿se puede minimizar la distancia recorri-

da?

Otro aspecto en el proceso de validación consiste en comparar los resultados con los del sistema real, confrontando las distancias totales de las rutas actuales implementadas en el sistema de recolección del Sector 2 de la Delegación Iztacalco, con la nueva secuencia de recorridos (sólo usando TSP) y la propuesta de nuevas rutas al aplicar el modelo CARP. Como se vio en la sección 3.4.3, se tiene un ahorro del 19% de la distancia total recorrida con las nuevas rutas. Aunque se tuvo un ahorro del 20.7% con sólo aplicar TSP al conjunto actual de paradas, la solución propuesta es mejor porque tiene como ventaja adicional el balance de trabajo por cada vehículo.

En la siguiente gráfica se compara el número de paradas que tiene actualmente cada vehículo en el sector 2 y el número de paradas que tendrían con la solución propuesta.

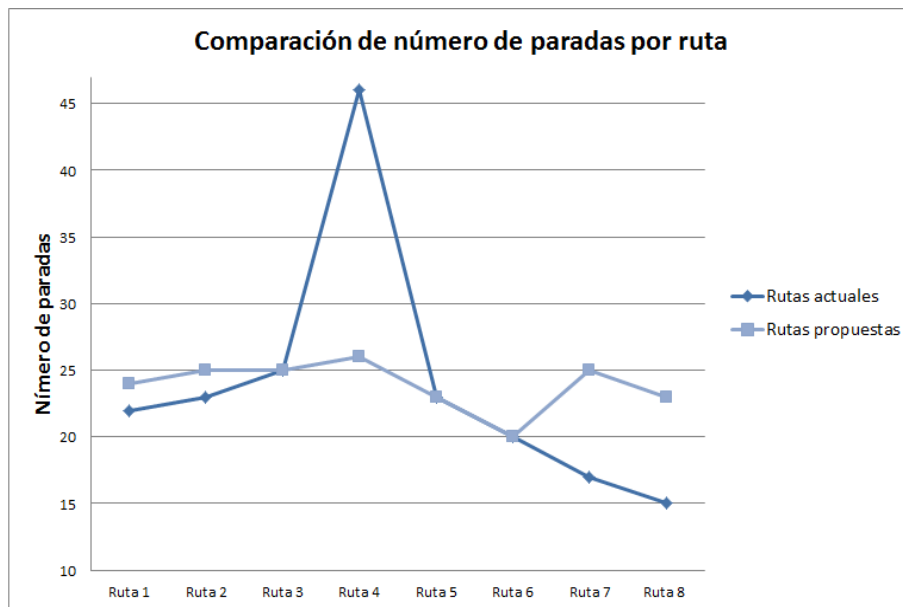


Figura 3.18: Número de paradas por cada ruta en el Sector 2. Fuente: Elaboración propia con base en informacin del sector 2 y resultados de LINGO.

En la Figura 3.18 se puede ver claramente en la gráfica poligonal de color azul claro una mejor distribucin de las paradas por cada ruta, con un rango

de 20 a 26 paradas y en la actual de color azul fuerte el rango era de 15 a 46 paradas haciendo que algunos trabajaran horas extra con respecto a los demás y en cuanto a la distancia también están mejor distribuidos, ya que en el modelo GAP se tenía como restricción que los puntos estuvieran a la mínima distancia y cumplieran con la capacidad del camión. Como se puede observar en la Figura 3.19 compara por cada ruta las distancias recorridas observando que en todas las rutas hubo una disminución salvo en la 8 ya que aumentaron las paradas a recorrer. La diferencia es de 1 a 7 Km por ruta.

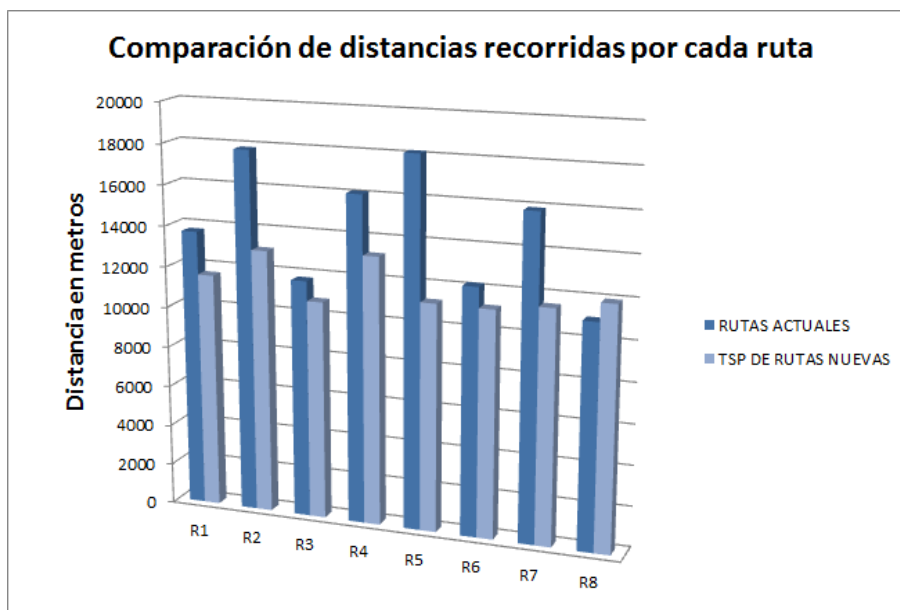


Figura 3.19: Kilometros recorridos en metros por cada ruta en el Sector 2. Fuente: Elaboración propia con base en distancias de *Googlemaps*.

Una tercera prueba para validar relacionada con la usabilidad, es observar si las personas relacionadas con el sistema confían en el modelo y están dispuestas a utilizarlo. Entonces se presentaron los resultados al jefe de limpieza del Sector 2, revisando que los valores obtenidos de la aplicación del modelo tuvieran sentido y que las propuestas pudieran llevarse a cabo. La respuesta al planteamiento fue positiva, con los siguientes puntos a considerar: presentar la propuesta al director del sindicato, justificar por qué se quiere cambiar el sistema utilizado hasta ahora, y demostrar el ahorro que puede generar. Posteriormente, se darían a conocer las órdenes de modificación de rutas a los

trabajadores y habitantes del sector. También, agregó que las nuevas rutas estarían sujetas a los contratiempos que pueden surgir por cierre de calles o avenidas.

3.6. Resumen ejecutivo

Dada la problemática acotada para el Sector 2 de la Delegación Iztacalco y tratando de ayudar con algunos de sus problemas, el objetivo del presente trabajo fue rediseñar las rutas de recolección de residuos sólidos con una visión sistémica y la aplicación de una metodología de Investigación de Operaciones.

Teniendo como parte del objetivo minimizar las distancias recorridas por cada vehículo y a su vez disminuir el tiempo de viaje, el combustible y desgaste de los vehículos, primero se tomó en cuenta la capacidad de los vehículos y las demandas por cada parada, formando nuevos conjuntos de paradas para cada camión, haciendo que la carga de trabajo fuera más equilibrada. Como la capacidad de los vehículos no es suficiente para la demanda total del sector, se tuvo que asignar una mayor capacidad a los vehículos tomando en cuenta que quizá seguirán haciendo dos viajes por día, pero en un menor tiempo al reducir las distancias recorridas. Al estimar las distancias que se recorren actualmente y las que se recorrerían con las rutas propuestas se tiene por lo menos un ahorro del 19% de las distancias totales a recorrer.

Para esto, se optimizó cada conjunto de paradas, es decir se encontró la ruta que minimiza la distancia recorrida con inicio y fin en la estación de transferencia situada en la Central de Abastos en Iztapalapa. A continuación se presenta el conjunto de paradas con sus ubicaciones asignadas a cada vehículo en el Sector 2, enumeradas en el orden que deben ser visitadas.

Conclusiones

La motivación del presente trabajo surgió a partir de los trabajos existentes en la literatura como artículos de investigación y tesis con aplicaciones a la recolección de basura. Estos trataban en todos los casos de mejorar la situación del sistema bajo estudio. Este trabajo también logró obtener una mejora en el servicio.

De tal forma, se realizó un estudio del manejo de residuos sólidos domiciliarios en el Distrito Federal, que inició con la búsqueda de documentos en *internet*, así como información hemerográfica sobre los problemas existentes en el sistema de recolección de basura. Además, se buscó el contacto con personal encargado de esta actividad y se logró trabajar de cerca con el Jefe de Campamento del Sector 2 de la Delegación Iztacalco, que es el encargado de distribuir los vehículos recolectores, señalando a esta zona como representativa de la problemática de todo el D.F.

El manejo de residuos sólidos comprende varias etapas desde su generación, recolección, transferencia, selección y disposición final. En cada una podemos encontrar problemas y aspectos que se pueden mejorar. Muchas acciones se pueden tomar para solucionar otros muchos problemas en el sistema, tales como campañas para reducir la cantidad de residuos y separación de los mismos, ubicación de un nuevo relleno sanitario, renovación y mantenimiento de los vehículos recolectores, mejores herramientas de trabajo para los involucrados, hasta la inversión en tecnología para el aprovechamiento del gas metano de un relleno sanitario, etc. Esta investigación, se enfoca en la etapa de la recolección, siendo una de las etapas más costosas, con mayor fuente de generación de residuos, que adicionalmente se vio afectada con el nuevo programa de recolección selectiva generando diversos problemas como: conflictos entre los trabajadores y habitantes, tiraderos clandestinos, circulación de vehículos recolectores no autorizados, horas extra de trabajo para el personal, entre otros. Entonces, tratando de ayudar en la solución de algunos de estos problemas se decidió: rediseñar las rutas de recolección.

Intentando cumplir con el objetivo de esta tesis, se modeló el sistema de recolección como un problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos (CARP), que es lo que recomienda la literatura y que, según la validación

conceptual propuesta, es el modelo de optimización que mejor representa el sistema real. También, se revisaron los métodos de solución y debido a la complejidad y costo computacional involucrados, se eligieron métodos heurísticos. Así, se diseñó un algoritmo basado en métodos heurísticos para la solución del problema, el cual es una de las aportaciones importantes de este trabajo, que forma parte del campo disciplinario de la Investigación de Operaciones.

Por lo tanto, se considera que el objetivo general de esta tesis se logró, al modelar el problema de recolección de residuos sólidos como un problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos y resolverlo con un método heurístico de agrupación-ruteo, dando como resultado el rediseño de las rutas y minimización de la distancia recorrida por cada vehículo.

En el proceso de lograr el objetivo general, se cumplió también con el objetivo específico de plantear una metodología para resolver el problema, la cual puede aplicarse a otras zonas del D. F. Otro de los objetivos específicos, fue calcular las matrices de distancias más cortas, lo cual, gracias a la tecnología, fue relativamente rápido, evitando calcular una por una las miles de distancias requeridas y hacer mediciones en el área a estudiar. También, se cumplió con el objetivo de agrupar las paradas para cada vehículo, logrando que la carga de trabajo fuera más equitativa en cada una de las rutas. Por último, se alcanzó el objetivo de minimizar la distancia de viaje por cada ruta, resolviendo varios problemas tipo Agente viajero (TSP) con el software LINGO. Al minimizar las distancias, el combustible y el desgaste de los vehículos, haciendo que el servicio de recolección sea más eficiente.

Como trabajos futuros se proponen, la aplicación de la metodología a otros sectores del D.F con problemas similares; hacer una elección de los clientes semilla, resolviendo el modelo de la p-mediana; agregar al modelo ventanas de tiempo; en la primera fase aplicar un modelo de cobertura en lugar del problema de asignación generalizada; rediseñar las rutas para los días de recolección de residuos orgánicos, ya que la cantidad recolectada de estos es menor a la de los inorgánicos.

Anexos

La siguiente página contiene los archivos de Excel y Word con los anexos de matrices de distancias código para programar las rutas ms cortans entre cada par de paradas ubicacin y número asignado a cada parada.

https://www.dropbox.com/sh/bwgeiphgfejzksz/AACkWEcVfJzejM_sdDonuhrwa?dl=0

RUTA 1

1. Sur 131 2505, Tlacotal Ramos Millán, 08720 Ciudad de México, D.F.
2. Av Plutarco Elias Calles, Granjas México, Ciudad de México, D.F.
3. Av Plutarco Elias Calles 2502, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
4. Eje 4 Sur (Av. Plutarco Elías Calles) 117, Granjas México, Ciudad de México, D.F.
5. Av Plutarco Elias Calles, Granjas México, Ciudad de México, D.F.
6. Ote. 100 1862, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
7. Ote. 100 2501, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
8. Ote. 100-A 1871-1875, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
9. Ote. 100-A 1921, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
10. Ote. 100-A 1990, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
11. Ote. 100-A 2455, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
12. Ote. 102 2452, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
13. Ote. 102 2057, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
14. Ote. 102 1908, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
15. Ote. 102 1856, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
16. Del Recreo 1824, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
17. Del Recreo 1818-2301, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
18. Del Recreo 1985, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
19. Del Recreo 1985, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
20. Del Recreo 1955, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
21. Del Recreo 1963, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
22. Del Recreo 2402, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.

RUTA 2

1. Av Plutarco Elias Calles 215, Granjas México, Ciudad de México, D.F.
2. Av Plutarco Elias Calles 243, Granjas México, Ciudad de México, D.F.
3. Av Plutarco Elias Calles 266, Granjas México, Ciudad de México, D.F.
4. Av Plutarco Elias Calles 276, Granjas México, Ciudad de México, D.F.
5. Av Plutarco Elias Calles 290, Granjas México, Ciudad de México, D.F.

6. Eje 3 Ote. (Francisco del Paso y Troncoso) 841, Los Reyes, Ciudad de México, D.F.
7. Cda. Tomazintla 8, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
8. Ote. 102 19, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
9. Chinampas 10, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
10. Ote. 100-A 28, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
11. Ote. 100-A 50, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
12. Ote. 100-A 1612-1616, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
13. Ote. 100-A 1663, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
14. Ote. 100-A 1804, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
15. Ote. 100 1796, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
16. Ote. 100 1654, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
17. Ote. 100 1614, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
18. Sur 109 2428, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
19. Ote. 102 1514, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
20. Del Recreo 372, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
21. Del Recreo 386, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
22. Del Recreo LT31BIS, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
23. Del Recreo 1724, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.

RUTA 3

1. Ote. 114 2301, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
2. Ote. 112 2501, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
3. Ote. 110 2300, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
4. Ote. 110 2511, Ciudad de México, D.F.
5. Oriente 108 2019, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
6. Oriente 106 2508, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
7. Oriente 106 2204, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
8. Oriente 108 2007-2008, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
9. Ote. 114 LT9, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
10. Ote. 112 2204, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
11. Ote. 112 2006, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
12. Ote. 112 MZ3 LT11, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
13. Ote. 110 1801, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
14. Sur 119-A 2242, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
15. Sur 119 1, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
16. Sur 117 2243, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
17. Sur 117-A 2247, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.

18. Sur 115-A 2198, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
19. Sur 115 2202-2206, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
20. Sur 117 2178-2188, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
21. Sur 117-A 2177, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
22. Sur 119 2182, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
23. Sur 119-A 2180-2196, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.

RUTA 4

1. Sur 111-A 2199, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
2. Sur 111-A 2240-2260, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
3. Sur 111 LT14, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
4. Sur 111 2200, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
5. Sur 105-A MZ3LT50, Juventino Rosas, 08700 Ciudad de México, D.F.
6. Sur 105 100, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
7. Eje 3 Ote. (Francisco del Paso y Troncoso) 974, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
8. Eje 3 Ote. (Francisco del Paso y Troncoso) 1002, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
9. Sur 107 2089, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
10. Sur 107 2106-2118, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
11. Sur 107 MZ3 LT12, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
12. Sur 107-A 2262-2276, Tlazintla, Ciudad de México, D.F.
13. Sur 107-A LT45, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
14. Sur 107-A 32, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
15. Sur 109 2203-2221, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
16. Sur 109-A 2365-2387, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
17. Sur 109-A MZ30 LT34, 08700 Ciudad de México, D.F.

RUTA 5

1. Lister 1618-1619, Mosco Chinampa, Ciudad de México, D.F.
2. Sur 135 1702, Mosco Chinampa, Ciudad de México, D.F.
3. Ote. 116, Gabriel Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
4. Sur 131 1618, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
5. 3 Alejandro Carrel 17EXT, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
6. Alejandro Carrel 41EXT, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
7. 1 (Eduardo Jenner) 9EXT, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
8. Ote. 116 1964, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
9. Rodolfo Virchow 65EXT, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.

10. Sur 121 238, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
11. 8 MZ28 LT12, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
12. Sur 119-A 2175, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
13. Ote. 116 1994, Juventino Rosas, 08700 Ciudad de México, D.F.
14. Ote. 116 2114, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
15. Ote. 116 MZ1 LT3, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
16. Eje 3 Ote. (Francisco del Paso y Troncoso) LT22, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
17. Av Canal de Tezontle 8, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
18. Sur 113-A MZ62 LT23, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
19. Ote. 116 2703, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
20. Sur 115, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
21. 1 Alberto C. 49EXT, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
22. Av Canal de Tezontle 562, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
23. 3 Roberto Koch, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.

RUTA 6

1. Sur 113-A 2196-2208, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
2. Sur 113-A, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
3. Sur 113-B 2293, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
4. Sur 115 2254-2260, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
5. Sur 115-A 2260, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
6. Sur 113-A, Tlacotal Ramos Millán, Ciudad de México, D.F.
7. Sur 113 LT46B, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
8. Sur 113 2256, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
9. Sur 113 2199-2203, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.
10. Sur 113-B MZ33 LT16, Juventino Rosas, Ciudad de México, D.F.

RUTA 7

1. Lunas 5, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
2. Lunas 107, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
3. Zacate 98, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
4. Sur 113-B, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
5. Corales 20, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
6. Av Canal de Tezontle 12-13, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.
7. Av Canal de Tezontle 26, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
8. Av Canal de Tezontle MZ62 LT21, Picos Iztacalco 1B y 2a, Ciudad de México, D.F.

México, D.F.

9. Península, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
10. Isla, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
11. Eje 3 Ote. (Francisco del Paso y Troncoso) MZ4A LT17, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
12. Av Girasol 2, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
13. Av Girasol 8-9, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
14. Av Girasol, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
15. Corteza, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
16. Colorín, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
17. Tepetate 18. Litoral 4, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
19. Huizache 7, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
20. Xoconoxtle 13, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
21. Aguamiel 2, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
22. Calle del Peyote 40, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
23. Calle del Peyote 142-143, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
24. Calle Cordilleras 41, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
25. Eje 3 Ote. (Francisco del Paso y Troncoso), Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.

RUTA 8

1. Viento Azul, Los Picos VI B, Ciudad de México, D.F.
2. Ocote, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
3. Raíz del Agua Edificio 6, 08900 Ciudad de México, D.F.
4. Casahuate 12, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
5. Henequén 66-67, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
6. Maguey 21, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
7. Av Girasol 36-37, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
8. Henequén 45, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
9. Espejo de Agua 1, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
10. Charcas 11, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
11. Espejo de Agua, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
12. Av Girasol, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
13. Tules, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
14. Av Canal de Tezontle 157, Jardines Tecma, 08920 Ciudad de México, D.F.
15. Av Canal de Tezontle 168, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
16. Av Canal de Tezontle 566, Impi Iztacalco, Ciudad de México, D.F.

17. Oasis, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
18. Eje 3 Ote. (Francisco del Paso y Troncoso) 14, Purísima Atlazolpa, Ciudad de México, D.F.
19. 7 Cuevas, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
20. Pirul, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
21. Ahuehuetes 7, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
22. Oyamel 26-27, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.
23. Chinampas, Infonavit Iztacalco, Ciudad de México, D.F.

Bibliografía

- [1] A.A. Assad y B.L. Golden. 1995 *Arc routing methods and applications* Handbooks in operations research and management science, Volume 8 - Network routing, pages 375-483.
- [2] R. Baldacci, E. Hadjiconstantinou, y a. Mingozzi 2004. *An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation* Operations Research, vol. 52, no. 5, pp. 723-738.
- [3] Bonomo F., Duran G, Larumbe F y Marengo J. 2009. *Optimización de la recolección de residuos en la zona sur de la ciudad de Buenos Aires* Revista Ingeniería de Sistemas, Volumen XXIII, 71-88.
- [4] C. Haksever, B. Render, R. Russell, y R. Murdick. 2000. *Service Management and Operations*, 2nd ed. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ: 476497.
- [5] C.S Orloff. 1974 *A fundamental problem in vehicle routing*. Networks, 4: 35-64.
- [6] Claverol M, Simó E y Zaragoza M. 2011 *Matemática discreta: Teoría de grafos*. Departamento de Matemáticas Aplicadas IV, EPSEVG-UPC.
- [7] DV. Tung y A. Pinnoi, 1999. *Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi* European Journal of Operational Research, 125(3):449-468.
- [8] Fisher, M y Jaikumar, R 1981. *A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem* Networks 11, 109-124.

- [9] Garey Michael R. y Johnson David S. 1979. *COMPUTERS AND INTRACTABILITY: A Guide to the Theory of NP- Completeness* W.H. Freeman and Company.
- [10] Gianpaolo Ghiani, Guerriero F, Improta G y Musmanno R. 2004. *Waste collection in Southern Italy: solution of a real-life arc routing problem*. International Transactions in Operational Research 12, 135-144.
- [11] Golden, B., DeArmon, J., y Baker, E. 1983. *Computational experiments with algorithms for a class of routing problems*. Computers and Operations Research 10-1, 47-59.
- [12] Golden, B., y Wong, R., 1981. *Capacitated arc routing problems*. Networks 11, 305-315.
- [13] Guerrero-Campanur A, Pérez R. E, Loaiza, Olivares E y Benitez., 2011. *Un caso logístico del problema de ruteo vehicular múltiple m-VRP resuelto con la heurística de Fisher & Jaikumar* IV taller Latino Iberoamericano de Investigación de Operaciones.
- [14] Hertz, A., y Mittaz, M. 2001. *A Variable Neighborhood Descent algorithm for the undirected capacitated arc routing problem*. Operations Research 48, 129-135.
- [15] Hertz, A., Laporte, G., y Mittaz, M. 2000. *A Tabu Search heuristic for the capacitated arc routing problem*. Transportation Science 35-4, 425-434.
- [16] Horst Sachs, Michael Stiebitz, y Robin J. Wilson. 1988. *An historical note: Euler's Königsberg letters*. Journal of Graph Theory. 12(1): 133-139.
- [17] Kwan Mei-Ko. 1962. *Graphic programming using odd or even points*. Chinese Mathematics, 1: 237-277.
- [18] J. Racero Moreno, 2006. *Optimación del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios* Congreso de Ingeniería de Organización.
- [19] Kim, B. I., Kim, S., y Sahoo, S. 2006. *Waste collection vehicle routing problem with time windows*. Computers and Operations Research, 33(12), 3624-3642.

- [20] M. Dror. 2000. *Arc routing - Theory, solutions and applications*. Kluwer Academic Publishers.
- [21] Maldonado Carlos E, Gómez Cruz Nelson A. *El mundo de las ciencias de la complejidad. Una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades*. Laboratorio de Modelamiento y Simulación, Universidad del Rosario.
- [22] Maniezzo, V. 2004. *Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support*. Technical Report UBLCS-2004-16, University of Bologna, Department of Computer Science.
- [23] Marti Cunquero Rafael. *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria* Universidad de Valencia, Departamento de Estadística e Investigación Operativa.
- [24] Méndez A, Silva S, Palumbo D y Carnero M. 2010. *Dos enfoques para la solución del problema de ruteo de vehículos: Aplicación a un caso real de recolección de residuos* Mecánica Computacional Vol XXIX, 9367-9377.
- [25] Paolo Toth y Daniele Vigo. *The Vehicle Routing Problem*. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. S.I.A.M., Philadelphia, PA, 2002.
- [26] Sanne Whlk. 2008. *A Decade of Capacitated Arc Routing*. In Bruce L. Golden, S. Raghavan, and Edward A. Wasil, editors, *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer.
- [27] Sanne Whlk. 2005. *Contributins to arc routing*. PhD thesis, University of Southern Denmark.
- [28] Segura P Esther 2005. *El problema del agente viajero*. Cuadernillo de divulgación 1. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- [29] Ulusoy, G. 1985. *The fleet size and mixed problem for capacitated arc routing*. European Journal of Operational Research 22, 329-337.
- [30] Vazquez, M. Josefina., Mulás A, Alberto., Aguilar Valenzuela O, Sancho J y Cervera. *Manual Técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales*. SEDESOL.