



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE GEOGRAFÍA



**MODELACIÓN EN LA PROPUESTA DE NUEVAS RUTAS DE RECOLECCIÓN
DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA EL USO EFICIENTE DE
COMBUSTIBLE MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG EN EL MUNICIPIO DE
ATLACOMULCO, ESTADO DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN ANÁLISIS ESPACIAL Y GEOINFORMÁTICA

PRESENTA:

LIC. EN G. JORGE ARTURO FLORES SALAZAR

TUTORA ACADÉMICA:

DRA. RAQUEL HINOJOSA REYES

TUTORES ADJUNTOS:

DR. JUAN CAMPOS ALANÍS

DRA. BRISA VIOLETA CARRASCO GALLEGOS

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2017.



Toluca, Méx., 13 de noviembre de 2017

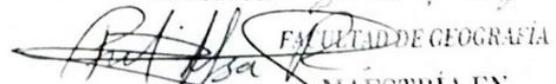
ORDEN DE ELABORACIÓN DEL TRABAJO TERMINAL DE GRADO MODALIDAD TESIS

C. JORGE ARTURO FLORES SALAZAR
EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN ANÁLISIS ESPACIAL
Y GEOINFORMÁTICA
PRESENTE

Le informo que, después de haber concluido y obtenido satisfactoriamente los votos aprobatorios que avalan su trabajo terminal de grado (modalidad tesis) titulado "**MODELACIÓN EN LA PROPUESTA DE NUEVAS RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA EL USO EFICIENTE DE COMBUSTIBLE MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG. EN EL MUNICIPIO DE ATLACOMULCO, ESTADO DE MÉXICO**", se autoriza la elaboración de la portada y los CD's etiquetados con los siguientes datos: nombre del egresado, número de cuenta, nombre del programa de posgrado, nombre del trabajo terminal y fecha de examen de grado, mismos que serán entregados junto con los documentos requeridos en la Coordinación de la Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"


FACULTAD DE GEOGRAFÍA
MAESTRÍA EN
ANÁLISIS ESPACIAL
Y GEOINFORMÁTICA
Dra. Raquel Hinojosa Reyes
Coordinadora de la MAEG



Toluca, Méx., 13 de noviembre de 2017

C. JORGE ARTURO FLORES SALAZAR

EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN ANÁLISIS ESPACIAL
Y GEOINFORMÁTICA
P R E S E N T E

La Coordinación de la Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática de la Facultad de Geografía comunica a Usted que la Comisión Académica de este Programa, conforme con los artículos número 64 y 65 del Reglamento de Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México, ha integrado el sínodo para la sustentación de su evaluación de grado, mismo que está compuesto por:

SÍNODO

PRESIDENTE	Dr. Juan Campos Alanís (Tutor Adjunto)
SECRETARIO	Dra. Brisa Violeta Carrasco Gallegos (Tutora Adjunta)
PRIMER VOCAL	Dr. Leonardo Alfonso Ramos Corona
SEGUNDO VOCAL	Dr. Rodrigo Huitrón Rodríguez
TERCER VOCAL	Dra. Raquel Hinojosa Reyes (Tutora Académica)

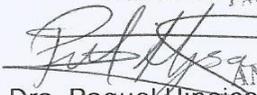
SUPLENTES

PRIMER	Dr. Edel Cadena Vargas
SEGUNDO	Mtra. Esperanza Palma Salgado

Considerando que la fecha para presentar su evaluación de grado se establecerá de acuerdo con lo señalado en el artículo número 66 del Reglamento de Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"
FACULTAD DE GEOGRAFÍA


MAESTRÍA EN
ANÁLISIS ESPACIAL
Y GEOINFORMÁTICA
Dra. Raquel Hinojosa Reyes
Coordinadora de la MAEG



Agradecimientos

Agradezco a la vida por esos parteaguas que me marcaron el rumbo y que me permitieron culminar satisfactoriamente otra etapa a pesar de las adversidades.

Agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de México, en especial a la Facultad de Geografía por ser mi segunda casa.

A la Dra. Raquel Hinojosa Reyes por otorgarme la ayuda, tolerancia, tiempo, dedicación y orientación suficientes para poder efectuar este trabajo, asimismo le agradezco por los consejos y por extenderme la mano para la culminación final de mi etapa en la Maestría.

A La Dra. Angélica por permitirme asistir a sus clases que fueron mucha ayuda para la culminación de este trabajo.

A mis profesores y amigos de la Facultad de Geografía que fueron parte de mi formación en estos largos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado.

A servicios públicos de Atlacomulco por la atención brindada.

¡Gracias!

Dedicatorias

Para mis padres por su apoyo y consejo, en los momentos difíciles, por su sacrificio, por aguantar todos estos largos años de estudio. Gracias por compartir conmigo tristezas, alegrías, éxitos y fracasos. Con amor, admiración y respeto.

A mis abuelitos †††† por mostrarme muchos de los valores y carácter que hoy en día forman parte de mí, por sus sabias palabras para nunca desistir en continuar mis estudios.

A mis hermanos por el cariño y apoyo moral que siempre he recibido de ustedes el cual ha sido importante para culminar este esfuerzo.

A esa persona que ha sido partícipe a lo largo de mi vida le agradezco por sus consejos.

ÍNDICE GENERAL

	Página
INTRODUCCIÓN	11
ANTECEDENTES	12
CONTEXTO GLOBAL	12
CONTEXTO NACIONAL	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
JUSTIFICACIÓN	20
OBJETIVOS	21
Objetivo General	21
Objetivos Específicos	21
Capítulo 1 Marco teórico conceptual	22
1.1 Introducción	22
1.2 Inicios de la geografía del transporte	23
1.3 La geografía del transporte en la revolución cuantitativa	23
1.4 El transporte como sistema	25
1.5 El transporte de carga y el espacio geográfico	25
1.6 Estado del arte del problema de ruteo de vehículos	26
1.7 Las redes o rutas de transporte como objetivo de estudio de la logística	27
1.8 La distancia en la logística	28
1.9 Métodos que se han utilizado	29
1.9 Sistemas de información geográfica (SIG)	31
1.10 SIG aplicados al transporte (SIG-T)	32
1.11 Sistema de transporte de residuos sólidos	34
1.11.1 Método de esquina o de parada fija	35
1.11.2 Método de Acera	35
1.11.3 Método de “Llevar y Traer” o Intradomiciliario	36
1.11.4 Método de Contenedores	36
1.12 Frecuencia de recolección	37
1.13 Composición de los RSU	37

Capítulo 2 Situación actual de la zona estudio, sistema de recolección de residuos sólidos urbanos.....	39
2.1 Localización y características generales	39
2.2 Situación actual de la densidad de población.....	41
2.3 Situación actual de la concentración de sectores económicos	42
2.2 Descripción estructural de la red vial urbana	46
2.3 Diagnóstico del sistema actual del sistema de recolección de residuos sólidos	47
2.4 Sistema de limpia con camión recolector.....	48
2.5 Recolección con contenedores fijos	56
Capítulo 3 Metodología.....	57
3.1 Enfoque metodológico general.....	58
3.1.1 Método Estructural sistémico	58
3.1.2 Enfoque cuantitativo	58
3.2 Determinación de la información base	59
3.3 Diagnóstico	59
3.4 Obtención de la red vial	60
3.5 Información requerida por la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL).....	61
3.6 Diseño de rutas	62
3.8 El problema del agente viajero.....	63
3.9 Los puentes de Königsberg y la Teoría de Grafos	64
3.10 El problema de rutas de vehículos	65
3.10.1 VRP con aplicaciones en recolección de residuos sólidos urbanos	67
3.10.2 El problema de rutas de vehículos con ventanas de tiempo	67
3.11 Tratamiento de información del problema de recolección de RSU	69
3.11.1 Red vial.....	70
3.11.2 Estacionamiento y sitio de transferencia de los residuos sólidos	72
3.11.3 Generación de residuos sólidos urbanos en el municipio	73
3.12 Solución del problema de recolección de basura en TransCAD Vehicle Routing With Time Windows	75

Capítulo 4 Resultados y Discusión.....	79
4.1 Introducción	79
4.2 Análisis de rutas de recolección de residuos sólidos	79
Conclusiones y Recomendaciones.....	117
Introducción	117
Conclusiones	117
Recomendaciones.....	119
ANEXOS	120
BIBLIOGRAFÍA	122

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema metodológico del trabajo de investigación	57
Figura 2. Fases del enfoque cuantitativo	59
Figura 3. Diagrama de la ciudad de Königsberg por Euler	64
Figura 4. Diagrama de puntos hecho por Euler	65
Figura 5. Ejemplo de solución de ruta mínima.....	66
Figura 6. Atributos de la red vial	71
Figura 7. Red conectada y con sentidos de circulación	71
Figura 8. Tipo de vía con velocidades	72
Figura 9. Atributos de la capa deposito.....	72
Figura 10. Ubicación del sitio de disposición final y estacionamiento.....	73
Figura 11. Atributos de la demanda a recoger.....	74
Figura 12. Ubicación basureros a recoger.....	74
Figura 13. Módulo para resolver el VRPTW en TransCAD	75
Figura 14. Pestaña “Depot” VRPTW en TransCAD	76
Figura 15. Pestaña “Stop” VRPTW en TransCAD.....	76
Figura 16. Pestaña “Matrix” VRPTW en TransCAD	77
Figura 17. Pestaña “Matrix” VRPTW en TransCAD.....	77
Figura 18. Guardado de archivos de salida	78
Figura 19. Sectores de recolección de RSU actuales.....	115

ÍNDICE DE MAPAS

	Página
Mapa 1. Mapa de localización.....	40
Mapa 2 Densidad de población	41
Mapa 3 Concentración de actividades secundarias.....	43
Mapa 4 Concentración de actividades terciarias	43
Mapa 5. Red vial de la cabecera municipal de Atlacomulco	47
Mapa 6. Ubicación de contenedores de basura.....	56
Mapa 7. Rutas de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco.....	80
Mapa 8. Rutas de recolección de RSU y densidad de población	81
Mapa 9. Ruta 1 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	82
Mapa 10. Ruta 2 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	84
Mapa 11. Ruta 3 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	87
Mapa 12. Ruta 4 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	89
Mapa 13. Ruta 5 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	91
Mapa 14. Ruta 6 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	93
Mapa 15. Ruta 7 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	95
Mapa 16. Ruta 8 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco	97
Mapa 17. Ruta 9 y 10 de recolección de RSU en Tecoaac, San José del Tunal y San Pedro del Rosal.....	99
Mapa 18. Ruta 11 de recolección de RSU en Santiago Acuitzilapan.....	103
Mapa 19. Ruta 12 de recolección de RSU en San Antonio Enchisi	105
Mapa 20. Ruta 13 de recolección de RSU en San Lorenzo Tlacotepec.....	107
Mapa 21. Ruta 14 de recolección de RSU en Manto del Río.....	109
Mapa 22. Ruta 15 de recolección de RSU en San José Toxi y San Gerónimo	111
Mapa 23 Propuesta de rutas en la cabecera municipal.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Tiempo de incubación y crecimiento de la mosca (cifras en días)	37
Tabla 2 Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN)	44
Tabla 3 Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN)	45
Tabla 4. Unidad 1 Diésel.....	49
Tabla 5. Unidad 2 Diésel.....	49
Tabla 6. Unidad 3 Diésel.....	50
Tabla 7. Unidad 4 Diésel.....	50
Tabla 8. Unidad 5 Diésel.....	51
Tabla 9. Unidad 6 Diésel.....	51
Tabla 10. Unidad 7 Diésel.....	52
Tabla 11. Unidad 8 Diésel.....	52
Tabla 12. Unidad 9 Diésel.....	53
Tabla 13. Unidad 10 Diésel.....	53
Tabla 14. Unidad 11 Diésel.....	54
Tabla 15. Unidad 12 Diésel.....	54
Tabla 16. Unidad 13 Diésel.....	54
Tabla 17. Parque vehicular de camiones recolectores	55
Tabla 18. Atributos de los Insumos para la investigación.....	69
Tabla 19. Itinerario de la ruta 1 de recolección de residuos sólidos urbanos	83
Tabla 20. Itinerario de la ruta 2 de recolección de residuos sólidos urbanos	86
Tabla 21. Itinerario de la ruta 3 de recolección de residuos sólidos urbanos.....	88
Tabla 22. Itinerario de la ruta 4 de recolección de residuos sólidos urbanos	90
Tabla 23. Itinerario de la ruta 5 de recolección de residuos sólidos urbanos	92
Tabla 24. Itinerario de la ruta 6 de recolección de residuos sólidos urbanos	94
Tabla 25. Itinerario de la ruta 7 de recolección de residuos sólidos urbanos	96
Tabla 26. Itinerario de la ruta 8 de recolección de residuos sólidos urbanos	98
Tabla 27. Itinerario de la ruta 9 de recolección de residuos sólidos urbanos	101
Tabla 28. Itinerario de la ruta 10 de recolección de residuos sólidos urbanos	102
Tabla 29. Itinerario de la ruta 11 de recolección de residuos sólidos urbanos	104
Tabla 30. Itinerario de la ruta 12 de recolección de residuos sólidos urbanos	106
Tabla 31 Itinerario de la ruta 13 de recolección de residuos sólidos urbanos	108
Tabla 32. Itinerario de la ruta 14 de recolección de residuos sólidos urbanos	110
Tabla 33. Itinerario de la ruta 15 de recolección de residuos sólidos urbanos	112
Tabla 34. Resultados de las rutas de recolección de RSU.	113
Tabla 35. Recolección de RSU actuales por día.....	114

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo el análisis espacial de la propuesta de nuevas alternativas en relación a las rutas de recogida de residuos sólidos urbanos en el municipio de Atlacomulco, Estado de México, utilizando herramientas SIG.

Partiendo de lo anterior esta investigación busca la reestructuración de las rutas estudiadas en relación al orden secuencial que éstas deben seguir al recolectar residuos por las colonias ya establecidas, estas nuevas secuencias de recorrido se pretenden llevar a cabo en menor tiempo, costo y así poder tener una cobertura mayor de usuarios. En conclusión se espera optimizar el servicio existente y ayudar a los tomadores de decisiones utilizando este tipo de herramientas.

Este trabajo de investigación se encuentra conformado por 4 capítulos, los cuales el lector podrá encontrar los siguientes aspectos:

En el capítulo 1 se aborda el marco teórico-conceptual en donde se aprecia todo lo referente a los fundamentos geográficos, asimismo hace referencia al estado del arte del sistema de transporte y como estos han tenido soporte en los sistemas de información geográfica. También contempla de forma desglosada los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos.

En el capítulo 2 hace referencia a la situación actual del municipio de Atlacomulco, esto quiere decir que se describe el funcionamiento del sistema de recolección de residuos sólidos, pero también contempla la red vial del municipio.

El capítulo 3 engloba la metodología que se siguió para obtener la propuesta de rutas de recolección, antes de esto se menciona el enfoque que lleva como resultado a la implementación de método Vehicle Routing Problem With Time Windows (VRPWT) y sus modificaciones para aplicarlo al municipio de Atlacomulco.

En el capítulo 4 hace referencia a la discusión de los resultados obtenidos, es decir, se llega al análisis, considerando todos los aspectos involucrados que nos llevaron a la obtención de diversos escenarios. Por último se hace una serie de conclusiones y recomendaciones.

ANTECEDENTES

Recientemente los estudios de transporte se han dirigido con mucho énfasis a la planificación territorial, en términos generales para dos objetivos; uno para evaluar las condiciones e impactos de los diferentes modos de transporte en ciertos territorios; y la segunda ligada a la planificación sostenible del transporte de acuerdo con las condiciones socio-económicas-ambientales de los territorios que conectan.

La realidad urbana por su naturaleza es compleja, es por ello que se requiere disponer de una abundante cantidad de información territorial, y sobre todo es una realidad dinámica que se encuentra en constante cambio y evolución. Por lo tanto los estudios de transporte específicamente los de asignación de rutas de recogida emplean técnicas eficaces que dan solución en gran medida a la problemática existente.

Algunos de los estudios realizados con enfoque espacial a la asignación de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos ha sido una temática de interés en diferentes partes del mundo y en nuestro país. En las siguientes secciones se hace un breve recuento de las soluciones aplicadas para dar respuesta a esta problemática.

CONTEXTO GLOBAL

A continuación se presenta algunos trabajos relacionados con la generación de rutas para la recolección de residuos sólidos, cabe mencionar que muchos de ellos son resueltos mediante la implementación de algoritmos formulados con base a programación lineal, es por ellos que se consideraron los siguientes:

Simón et al. (2012) presentó una metodología para la determinación de un conjunto de rutas óptimas para la recolección de residuos infecciosos en la ciudad de Río Cuarto, Argentina. La recolección la realizan vehículos con restricciones de capacidad. El caso puede ser formulado como un problema de programación lineal entera mixta y está catalogado como NP-Hard por su complejidad computacional, es decir, se requiere un tiempo muy elevado para obtener la solución óptima. También propone mejorar las soluciones obtenidas mediante un algoritmo de búsqueda exacto, a través de una heurística de búsqueda local. Ésta inspecciona el entorno de dichas soluciones mediante mecanismos

diferentes asegurando la explotación intensiva de las regiones promisorias del espacio de búsqueda. Se presenta la metodología y su desempeño para resolución de diferentes problemas extraídos de la literatura y para la determinación de un conjunto de rutas óptimas.

Larumbe (2009) realizó una aplicación de la Optimización Combinatoria para optimizar el ruteo de vehículos en la Ciudad de Buenos Aires. Dada una zona con distintos puntos por los que el vehículo debe pasar exactamente una vez, el programa desarrollado devuelve un orden de los puntos para que la distancia sea mínima. Este problema se conoce como el Problema del Viajante de Comercio (Traveling Salesman Problem “TSP”).

Se modela el mapa de la ciudad como un grafo y se implementa el algoritmo para calcular recorridos mínimos entre puntos del mapa. El modelo y el algoritmo están planteados para que calcule un recorrido mínimo que puede realizar un vehículo, por lo que se consideran los sentidos de las calles y los giros según si hay semáforo o no en una intersección.

Se desarrolla un programa en Visual Works SmallTalk que permite resolver las instancias del problema y presentar las rutas obtenidas en forma de listados de direcciones, de imágenes y de animaciones. Se utiliza una extensión llamada Takenoko que permite dibujar gráficos en una ventana. Se utiliza Quantum GIS para leer el mapa de la ciudad en archivos de formato Shapefile (SHP), una base de datos relacional PostgreSQL con extensiones geométricas PostGIS y un programa que resuelve el Problema del Viajante de Comercio en forma exacta.

Alves, L. Gonçalves, M. (2008) realizó un análisis de un Sistema de Información Geográfica - SIG como una herramienta para el enrutamiento de los vehículos de recogida de residuos sólidos domésticos. El software utilizado fue el TransCAD, versión 3.2, que permitió desarrollar rutas utilizando algoritmos que incluyen procedimiento de enrutamiento arqueada. El objetivo fue reducir al mínimo la longitud total a ser cubierto mediante la recopilación de vehículos. El estudio de caso se llevó a cabo en la ciudad de Ilha Solteira, Sao Paulo, Brasil. Los datos recogidos y los resultados de TransCAD se procesaron en el software Microsoft Excel. Los resultados mostraron porcentajes de

reducción de hasta el 41% de la distancia total recorrida y el 68% en el tiempo total de viaje desde el servicio actual.

Roviriego, L. F. V. (2005) en su trabajo busca contribuir a una mejor comprensión de los costos involucrados en la operación de recogida de estos residuos en Sao Carlos, Sao Paulo, Brasil. En este trabajo se analizó la cuesta de tres sistemas de recogida selectiva de residuos sólidos: puntos de entrega voluntaria (PEVs), de puerta a puerta, y un sistema híbrido entre los dos anteriores. El análisis tuvo en cuenta los costos de transporte, incluidos los costos de operación y costos de capital para cada una de las alternativas. Hace mención que un SIG-T se utiliza para determinar la distancia recorrida por el vehículo y un procedimiento para determinar el coste total ha sido desarrollado de acuerdo con la distancia recorrida y la cantidad de mano de obra y equipos utilizados. Se llegó a la conclusión que el mejor método siempre será estrechamente vinculado a las características del lugar donde se desplegará. La comparación de los tres sistemas, se observó que para la zona y las condiciones se optó por el sistema de puerta a puerta resultó ser el más eficaz.

Ayala (2001) realizó una asignación de rutas de vehículos para un sistema de recolección de residuos sólidos en la acera, utilizando estos modelos de asignación aunado a la aplicación de una formulación matemática que consiste en agregar una serie de variables de decisión que representa una nueva red idéntica a la definida en donde la variable definida representa la red de recolección de carga y la red formada representa el desplazamiento del transporte, lo cual permite diferenciar claramente si un vehículo atraviesa un arco realizando actividades de recolección o si el vehículo utiliza este arco como un punto de tránsito que le permite desplazarse de un nodo a otro.

La información de entrada para la realización de este trabajo fue la siguiente; configuración de la red, estimación de la demanda, tiempos de proceso, disponibilidad del vehículo, disponibilidad de la tripulación y por último el costo.

Posteriormente se implementó bajo distintos escenarios, la zona en la que fue implementada es Santa Fé de Bogotá en los cuales se modificaron las restricciones de tiempo y capacidad con el fin de analizar su comportamiento y determinar las variaciones

entre los recorridos generados en cada microruta, obteniendo los siguientes resultados, en términos de distancia genera un ahorro de 458.13 m respecto a la ruta actual. En términos de tiempo se logra un ahorro de 4.47 minutos en el cual podría incrementarse notoriamente en caso de llegar a utilizar factores de penalización por giros a la izquierda, en U y arcos repetidos. En cuanto a la estructura del itinerario, se obtiene un ahorro del 50 % en que se refiere a los giros en U y a la izquierda, los cruces de calle aumentan, quiere decir que se incrementan los trayectos en línea recta y el número de arcos repetidos se reduce en un 25%.

Esta diferenciación facilitó la elaboración y trazado del itinerario de recolección, generando resultados por separado para cada vehículo respecto a la distancia recorrida en cada red y su permanencia en la misma, a la vez que permite determinar la tasa de utilización por vehículo y el tiempo empleado por tripulación.

CONTEXTO NACIONAL

Pineda (2015) trata sobre la situación actual del sistema de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal, donde se busca un lugar que sirva para depositar las 12 mil toneladas diarias generadas en el D.F, de los cuales, los tractocamiones no tengan que hacer recorridos más largos y filas de horas para poder descargar en tiraderos del Estado de México, partiendo de lo anterior realizó este tipo de rediseño de rutas para dar una alternativa a este tipo de problemática.

Este caso de estudio se acotó solo al sector de la Delegación Iztacalco, con el fin de minimizar la distancia recorrida y a su vez el tiempo, aplicando la heurística de Fisher & Jaikumar, que consiste primero en crear tantos conjuntos de paradas a visitar como el número de camiones disponibles, para después diseñar una ruta optima que indique como visitar las paradas junto con su sitio de origen en común, que será la estación de transferencia, donde cada vehículo recolector deposita los residuos.

Para resolver el problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos (CARP), primero se hizo una transformación a un problema del tipo ruteo de vehículos capacitados CVRP, para luego aplicar a este la heurística, que pertenece a los métodos de dos fases bajo la secuencia cluster first-route second.

González (2011) realizó un estudio en relación de casos y experiencia de la recolección de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) del conjunto urbano los Sauces, ubicado en el Estado de México, muestra los pasos necesarios para el diseño de rutas el cual se centra en identificar y analizar la forma en cómo se debe realizar el estudio, es por ello que se divide en pasos donde el primero menciona la necesidad de contar con un mapa de escala adecuada para distinguir el trazado de la ciudad o de las zonas donde se puedan establecer los puntos de recolección: localización, frecuencia de recolección, número de contenedores o casas habitación a atender. El segundo indica la importancia de calcular la cantidad de residuos a ser recogidos de los sitios de carga los cuales requieren ser recolectados en múltiples ocasiones durante la semana. Tercero, usar el volumen efectivo del vehículo de recolección (volumen nominal de recolección de vehículos por eficiencia de carga), determinar la cantidad de residuos que deben ser recolectados cada día de las áreas de servicio. Una vez que se obtuvo la información, la asignación de las rutas de recolección pudo realizarse. Para áreas grandes que han sido subdivididas y que son servidas diariamente, fue necesario establecer rutas básicas en cada área subdividida, en algunos de los casos, dependerá del número de viajes que sean hechos por día.

Gutiérrez (2008) realizó un análisis del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el centro histórico de Morelia, aplicando SIG, en donde se utilizó el software TransCAD. Utilizó una serie de atributos de la red vial, como: nombre, sentido, ancho y velocidad de la vía. Así como los tiempos empleados en la operación de las rutas de recolección para determinar los tiempos de vaciado dependiendo del método empleado, el tiempo de recorrido y el tiempo muerto.

Con la aplicación de la metodología en la zona de estudio se logró realizar el rediseño de cada una de las rutas analizadas en cuatro escenarios distintos variando el horario de recolección, el método de recolección y/o el equipo empleado, logrando reducciones de hasta un 50% del tiempo original.

Racero y Pérez (2006) realizaron un estudio en Cd. Victoria, Tamaulipas basado en una metodología enfocada en dos principales puntos, en el primero se identifican los modelos matemáticos (métodos simples, gráfico, analítico entre otros) que han ido utilizando en la literatura para posteriormente realizar un análisis comparativo entre ellos.

Además los modelos son ampliados mediante la incorporación de nuevas restricciones tales como la capacidad de flota o número de operarios. Los diferentes modelos son comparados con las actuales rutas donde se intenta mejorar la eco-eficiencia que no es otra cosa que el proceso continuo de maximizar la productividad de los recursos, minimizando desechos y emisiones, y generando valor para la empresa, sus clientes, sus accionistas y demás partes interesadas.

Reyes (2005) realizó un diseño del programa de recolección de residuos sólidos domiciliarios para el municipio de Atizapán de Zaragoza, en donde determinó un modelo matemático donde los nodos (colonias) se traduce en la secuencia de las colonias a recolectar a partir del Patio hasta su regreso a este mismo punto, considerando los siguientes parámetros:

- El patio correspondiente al estacionamiento de las unidades de recolección sea el nodo de inicio y fin
- Todos y cada uno de los nodos (colonias) sean visitados exactamente una vez, finalizando en el relleno sanitario antes de llegar nuevamente al patio
- El tiempo total de recolección sea el menor posible

Una vez cargada la base de datos correspondiente se hizo uso del software denominado TORA, en donde se eligió la opción de Modelos de redes en su apartado denominado Árbol de Expansión Mínima, el cual permite acceder directamente a vaciar los datos del problema para que el software realice las iteraciones necesarias.

Los resultados obtenidos de este estudio fueron realizados a las colonias que presentan mayor oportunidad de mejora y a las que se puede aprovechar mejor los ahorros de tiempos en los recorridos.

Por último es relevante saber cómo se ha resuelto el problema del ruteo para la recolección de basura tanto a nivel global como nacional, es preciso mencionar que aunque muchos de estos antecedentes son netamente de corte ingenieril estos se pueden adaptar perfectamente al aspecto geográfico dado que muchos de estos métodos se aplican en el aspecto espacial.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de los residuos sólidos urbanos a nivel mundial ha crecido de forma progresiva afectando tanto al ser humano como al medio ambiente, esto da pauta a que se realicen estudios para entender sus múltiples dimensiones. El proceso de expansión urbana ha generado entre otros problemas presiones crecientes sobre los servicios e infraestructura, entre ellos la recolección y disposición final de residuos sólidos urbanos. Partiendo de lo anterior se puede decir que una forma de mitigar el problema es teniendo una buena gestión de manejo

En el ámbito Nacional sólo el 43% de las ciudades medias del país realiza un diseño de rutas a través de un método técnico para llevar a cabo la recolección, por lo que sólo el 27% de las ciudades disponen de rutas eficientes de recolección y un 73 % no son suficientes. Por lo anterior se puede observar que existe un número mayoritario de ciudades que no disponen de un diseño de rutas y que éstas son insuficientes, lo cual refleja que los municipios aparte de no contar con los suficientes recursos económicos, tampoco disponen de una buena planeación para ampliar su cobertura adecuadamente y con menores costos (SEDESOL, 2010).

Por lo anterior, la capacidad de los camiones, como el inadecuado método de recolección en ciertas áreas de la zona urbana, aunado al mal diseño de rutas contribuyen a que el servicio de recolección no cumpla con las expectativas, además de generar una serie de externalidades negativas como congestionamiento y contaminación. También en muchos de los casos las rutas se diseñan de forma intuitiva lejos de tener un método para determinarlas y así reducir tiempos y costos de recogida, ayudando a reducir el consumo de combustible en las unidades recolectoras. Las personas también contribuyen con este problema al depositar en lugares inadecuados sus residuos complicando los procesos de recolección y obligando a los camiones a detenerse por más tiempo en el lugar o recorrer más distancia fuera de las programadas en la ruta original de recolección. Todo esto sin contar que no se tiene una adecuada separación de los residuos sólidos por parte de la población, así como la carencia de sitios adecuados para la disposición final

En el municipio de Atlacomulco la generación de basura es de 35 toneladas en la cabecera del municipio y 53 toneladas en las localidades a las que se brinda el servicio teniendo un total de 88 toneladas diarias, (H. Ayuntamiento de Atlacomulco, 2015).

Por lo tanto se pretende crear nuevas alternativas de ruteo para la recolección de los residuos sólidos aplicando análisis espacial con ayuda de los sistemas de información geográfica, con el fin de hacer más eficiente los tiempos y costos de recorrido de los camiones recolectores.

JUSTIFICACIÓN

La necesidad de proporcionar una herramienta que facilite la toma de decisiones en el municipio de Atlacomulco, Estado de México, debido a la problemática que presenta relacionada con los residuos sólidos urbanos, los cuales se extienden más allá de la correspondiente a la disposición final, ya que abarca todo un sistema de gestión de residuos.

En este marco se tiene que contar con elementos para la elaboración de un diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio teniendo como prioridad la prestación del servicio de limpia cuyo objetivo principal es proteger la salud pública y del medio ambiente, lo anterior significa que el servicio se debe de ofrecer de manera eficiente.

Teniendo en cuenta la organización del municipio en relación a las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos, permitirá contar con elementos para la realización de un análisis espacial utilizando herramientas SIG y a su vez dar respuestas a los diferentes procesos de modernización de ruteo ante la creciente población y demanda de este servicio, aunado a la estructura urbana con la que cuenta el municipio

Otra de las razones que conlleva a dicha investigación es que de acuerdo con el plan de desarrollo del municipio, en un futuro cercano no tendrá la capacidad necesaria para atender las necesidades de una creciente población.

Parte fundamental para la elaboración de este estudio es la utilización de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta importante en el desarrollo de distintos procesos que den pauta a diversas alternativas para la toma de decisiones en el ámbito local y regional en la planificación de la recogida de basura, debido a que los SIG permiten esa integración de varios elementos que van desde los datos, para posteriormente implementar distintos métodos y a su vez procesarlos con ayuda de las tecnologías (Hardware y Software).

OBJETIVOS

Objetivo General

- Proponer a partir de la modelación y el análisis espacial nuevas rutas de recolección de residuos sólidos, para la optimización del servicio, mediante análisis espacial y herramientas SIG en el Municipio de Atlacomulco, Estado de México.

Objetivos Específicos

- Inventariar, recopilar y analizar el sistema actual de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos.
- Construir una metodología para el diseño de rutas de recogida de basura.
- Diseñar y proponer nuevas rutas utilizando la herramienta SIG, a través del análisis espacial y modelación de la información.

Capítulo 1

Marco teórico conceptual

1.1 Introducción

En este capítulo se presentan los aspectos teóricos metodológicos que deben ser considerados y que nos servirán como referencia para conocer más sobre la geografía del transporte, teoría general de sistemas, sistemas de información geográfica, sistemas de transporte, recolección de residuos y lo referente a la asignación de recolección de residuos sólidos urbanos.

La Geografía del transporte es la rama de la Geografía humana que se ocupa del estudio de los sistemas de transporte en los distintos espacios geográficos o territorios. Maurice Wolkowitsch (citado por Pons, J.,1991) la definió como: “el conocimiento de los sistemas de transporte que hacen frente a las necesidades de desplazamiento de los hombres y sus mercancías un espacio dado: la ciudad, el estado, el continente.”

El desplazamiento entre un origen y un destino es el elemento espacial más distintivo del tipo de movimiento que llamamos transporte, la medida real de la variable «distancia» es la que, en un principio, dio valor a ese movimiento. Durante miles de años la lucha del hombre por conquistar la distancia se ha librado en el campo técnico, de manera que los esfuerzos iban encaminados simplemente al hallazgo de mecanismos y formas de energía que permitieran aumentar la separación espacial de los trayectos a la vez que a reducir la distancia temporal en los mismos (Seguí y Petrus, 1991).

La única excepción a este panorama general la constituye la aportación de economistas, [Von Thunen (1826)], [A. Weber (1909)] o [Hoover (1948)] cuyas obras plantearon por primera vez el tema de la localización como variable determinante a considerar en el estudio de la actividad económica, pues la posición de las empresas y de los mercados en el espacio podían modificar, según ellos, los costos de producción de una mercancía y en

consecuencia, influir en los precios. La finalidad de sus obras fue, por tanto, enunciar los principios gracias a los cuales podrían minimizarse los costos que derivaran y dependieran de la localización.

1.2 Inicios de la geografía del transporte

Tras la institucionalización de la geografía en las universidades alemanas, puede decirse que comienza propiamente la geografía del transporte aunque el nombre más usual entonces para nombrar a la disciplina era el de geografía de la circulación en clara metáfora orgánica. Alfred Hettner en 1897 publicó un artículo sobre esta rama y la asignó como materia de estudio principal el sistema de flujos de las regiones que metafóricamente eran entendidos como la circulación sanguínea de éstas.

F. Ratzel en 1882 fue de los primeros en construir una aproximación sistemática al estudio de los transportes y la circulación regional. Ratzel desde un punto de vista biologizante, entendía la circulación como un aspecto más de las relaciones hombre – medio. Además formuló una teoría de corte evolucionista sobre el desarrollo de las vías de comunicación basada en la idea o “ley” del mínimo esfuerzo.

En Francia las ideas de Ratzel serán recibidas y criticadas. Vidal de la Blache con la doctrina del posibilismo en la relación sociedad – medio subraya lo contingente en la evolución de los transportes y promueve una vía de estudio historicista e inductiva centrada siempre en un espacio concreto. Para los años 40 ya se había realizado suficiente investigación, se puede hablar de los primeros geógrafos plenamente especialistas en transporte.

1.3 La geografía del transporte en la revolución cuantitativa

En la geografía estadounidense desde los años 50s se produjeron profundos debates que culminaron en la denominada revolución cuantitativa. Uno de los geógrafos más destacados de este movimiento fue Edward L. Ullman que realizó amplias aportaciones para la renovación de la geografía del transporte. Ullman acuñó la idea de la geografía como el estudio de las interacciones espaciales entre áreas con lo que los fenómenos de transporte cobraban una importancia central. Para Ullman las regiones (diferenciadas bajo criterios económicos) se especializan funcionalmente y esto genera movimientos de mercancías y

personas por complementariedad. Sus ideas se plasmaron en una obra pionera y posteriormente bastante influyente, “American Commodity Flow” (1957).

A los trabajos de Ullman se unieron los de William L. Garrison en 1960 uno de los primeros impulsores de la teoría de grafos en el análisis de redes en geografía. Progresivamente se fueron perfeccionando las técnicas matemáticas para realizar análisis más dinámicos. Taaffe, Morrill y Gould en 1963 realizaron, basándose en estudios empíricos en diversos países africanos, un modelo de la evolución de las redes de transporte en una secuencia ideal de seis etapas. Las ideas cuantitativas pronto se difundieron fuera de los estados unidos principalmente al Reino Unido, Suecia y Polonia. Ya en 1973 aparecía un manual clásico que recogía toda la experiencia de esta tradición, la obra de Taaffe y Gauthier “Geography of Transportation”. Esta obra versa sobre el transporte y la estructura espacial, el transporte y los procesos espaciales, los modelos de gravedad, el análisis de las redes y los modelos de asignación a la red.

En los estudios locacionales, el papel de los transportes fue crucial para el análisis del territorio, aunque no se trataran temas estrictamente relacionados con ellos, como por ejemplo el de las áreas de influencia o el de las localizaciones comerciales o industriales. De hecho, los estudios sobre transportes fueron uno de los motores destacados de la revolución cuantitativa de los años sesenta.

La Geografía Cuantitativa en los transportes ha permitido y permite el desarrollo de un conjunto de temáticas clave para esta disciplina tales como, el análisis de las redes, el tratamiento y análisis de los flujos y las jerarquizaciones territoriales que establecen el planteamiento y la simulación de modelos predictivos de demanda, así como la utilización de forma analógica de diversos modelos procedentes de otras disciplinas.

En los últimos años la relevancia de los estudios de transporte es fundamental dentro de cualquier gestión integral de recursos económicos, ambientales y sociales dentro de cualquier planeación territorial.

1.4 El transporte como sistema

Un sistema es un conjunto de elementos relacionados entre sí y encaminados hacia ciertos objetivos específicos y metas, así por ejemplo: el sistema de actividades de una zona urbana puede considerarse como el conjunto de subsistemas tales como el comercio, la industria, la educación, la salud, los transportes y los servicios entre otros.

El caso del transporte urbano se puede definir como un sistema básico para el funcionamiento de una ciudad en donde su operación influye de manera directa en la eficiencia del conjunto de sus actividades y en la calidad de vida de sus habitantes.

Por ello el papel de los especialistas del transporte se debe enfocar generalmente a encausar los esfuerzos de prestadores de servicio y autoridades para diseñar un sistema que logre la máxima integración o grado de ajuste, entre el sistema y su medio ambiente.

El análisis del sistema de transporte tiene por objeto conocer las interrelaciones complejas de los múltiples elementos encaminados a un mismo objetivo. Estos elementos pueden ser los vehículos, la infraestructura y las técnicas de explotación y operación.

1.5 El transporte de carga y el espacio geográfico

El transporte de carga es una actividad que tiene una expresión espacial ya que integra y articula diferentes aspectos del territorio, pues hace posible el intercambio de bienes en un espacio geográfico determinado (Pohls, 2005).

En el transporte por carretera se utiliza una extensa gama de vehículos, desde pequeñas furgonetas con una capacidad de unos 500 Kg, hasta los grandes camiones rígidos o articulados capaces de transportar más de 25Tn de carga útil. Por otra parte, el personal necesario en la conducción del vehículo, a igualdad de volumen transportado, es mayor por carretera. Como a ello se une el hecho de que, las resistencias al avance son mayores, el costo de funcionamiento de los vehículos por unidad de transporte es mayor que en otros modos (Robusté, 2005).

1.6 Estado del arte del problema de ruteo de vehículos

El Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (Capacitated Arc Routing Problem o 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 (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 distintos modelos sobre los arcos de una red, (Sanne Whlk. 2008).

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, 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, 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.

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, 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), 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 solo 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, 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.

1.7 Las redes o rutas de transporte como objetivo de estudio de la logística

Los primeros estudios de aplicación metodológica de la teoría de las redes de grafos, una de las ramas de la topología desarrollada por el matemático Euler en el siglo XVIII (Giménez y Coadevila, 1986), aparecen en geografía en la década de los años sesenta, siendo el geógrafo Garrison uno de sus pioneros.

Esta teoría puede utilizarse en el estudio morfométricos de redes y constituye un tipo de análisis explicativo que permite conocer, sobre la base de unos datos parciales, qué aspecto tiene la estructura completa de la red o su desarrollo [Potrykowski, Taylor: (1984)]. Permite, además, identificar problemas geográficos a partir de las relaciones entre los asentamientos y las redes de transporte, en función de la propiedad topológica, su conectividad, y no de sus dimensiones (Haggett, 1976).

Los estudios de redes que utilizan la teoría de grafos pueden ser estáticos, índices de forma y conexiones, aunque su desarrollo se produzca a través de una sucesión temporal, y dinámicos, al valorar los elementos de conexión de la red, las vías con variables reales como pueden ser las de distancias kilométricas y horaria, costos, o los flujos que por ella circulan (Seguí, J., 1995).

Los nodos y vértices de la red pueden constituirse por los puntos de origen y destino de los intercambios (ciudades, puertos, aeropuerto o centros de zona, denominado centroide, a los que se les atribuyen las características del área que representan). Los arcos o aristas se identifican con las rutas, tanto si tienen una estructura física de soporte terrestres como si no contarán con ellas (marítimas, aérea, o las referidas a todo tipo de flujo invisible como son los de telecomunicación y telemática), (Hillier, Lieberman, 2014).

En las redes de transporte los nodos pueden venir constituidos por las paradas de las líneas de la red o de forma más simple, por los puntos de origen y destino de las mismas y las aristas las pueden identificarse con los recorridos de líneas.

1.8 La distancia en la logística

Todo el mundo parece tener una idea más o menos clara de lo que es el transporte y cualquier persona asocia este término a la noción de desplazamientos. Sin embargo, son tantos y tan variados los modos en que se puede realizar este movimiento que parece no existir una unidad esencial que dé a esta actividad una base común. No obstante, la unidad esencial existe y viene dada por el significado etimológico del mismo término “transporte”. Como ya explicara Arturo Soria (1980) hace una década, “se llamaba transportar o llevar algo más allá de la frontera, natural o artificial y justamente por donde hay un camino” atravesar una frontera no es en modo alguno un fenómeno accesorio al transporte, sino que es precisamente lo que según la etimología hace de un porte o movimiento cualquiera un transporte (Soria, 1980).

Se ha definido a veces la geografía como “la disciplina de la distancia“. El concepto de la distancia puede ser abordado desde distintos puntos de vista, lo que sugiere dicho concepto, como el propio concepto de espacio, es multidimensional. Un hecho que es común a todas las perspectivas desde las que se estudie la distancia es que dicho término comporta las nociones de proximidad y lejanía, así como la necesidad de tomar como fijo un punto de referencia a partir del cual se miden dichas nociones.

1.9 Métodos que se han utilizado

Importancia del diseño de rutas

La organización del itinerario para la distribución de las cargas constituye un eslabón de gran importancia para el desarrollo de la economía de un país por lo que contribuir a su perfeccionamiento significa brindar una valiosa ayuda al presente y al futuro. Para llegar a un enrutamiento de los vehículos de recolección es necesario disponer de una base informativa, o sea, la estructura vial de la zona, el radio de acción, entre otros. La información primaria a conocer debe estar dada entonces por los datos (ubicación de las vías, cantidad de tramos, longitud de los tramos, entre otros) referentes al conjunto de rutas de la red vial principal, factibles para formar parte, en uno o más tramos de su extensión, de las rutas de menor distancia en la red de distribución resultante. Para la definición de cuales serían dichas vías se parte del conocimiento de la red vial principal en los cuales se encuentran las zonas de distribución, según sus direcciones respectivas, lo cual permite descontar del análisis aquellas vías que no ofrecen vínculos entre estos, si se tiene en cuenta para ello los sentidos de circulación y los movimientos permitidos y no permitidos en las intersecciones.

La aplicación del diseño de rutas para el transporte ya sea de pasajeros o de mercancías tiene como bondad para las empresas que lo utiliza la disminución de los costos de transporte, la capacidad de ofertar un servicio más rápido y eficiente.

El diseño de rutas no sólo implica un análisis cualitativo de la situación sino que demanda un análisis cuantitativo de la misma aplicando técnicas establecidas a partir de estudios que se vienen realizando desde el surgimiento mismo de la logística. Dichas técnicas se basa en modelos matemáticos que ilustran hasta cierto punto la situación real, teniendo en cuenta los aspectos más importantes para la solución de los problemas.

1. Método de Ford para camino mínimo

El algoritmo de Bellman-Ford determina la ruta más corta desde un nodo origen hacia los demás nodos para ello es requerido como entrada un grafo cuyas aristas posean pesos. La diferencia de este algoritmo con los demás es que los pesos pueden tener valores negativos ya que Bellman-Ford me permite detectar la existencia de un ciclo negativo. El algoritmo

de Bellman-Ford determina la ruta más corta desde un nodo origen hacia los demás nodos para ello es requerido como entrada un grafo cuyas aristas posean pesos. La diferencia de este algoritmo con los demás es que los pesos pueden tener valores negativos ya que Bellman-Ford me permite detectar la existencia de un ciclo negativo.

2. Método Heurístico para el problema del viajante

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

3. Método ROVER

Supone que todos los vehículos poseen la misma capacidad, no hay restricciones en cuanto a la distancia, tiempo o máximo número de paradas permitidas, y las operaciones de carga y descarga no tienen tiempo asociado.

4. Método para el problema del transporte

El problema general de transporte se refiere a la distribución de cualquier bien desde cualquier grupo de centros de suministro, llamados orígenes, a cualquier grupo de centros de recepción, llamados destinos, de tal manera que se minimicen los costos totales de distribución.

El método de transporte se refiere a problemas que tienen que ver con el transporte de productos desde diversos puntos de origen hasta diversos destinos. Los dos objetivos comunes de estos problemas son:

- Minimizar el costo de enviar n unidades hasta m destinos
- Maximizar las utilidades de enviar n unidades a m destinos.

También se han tratado con metaheurísticas, que son procedimientos de búsqueda, se basa en la aplicación de reglas. A diferencia de los heurísticos, las técnicas metaheurísticas son orientadas a 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.

1.9 Sistemas de información geográfica (SIG)

Según G. Korte (2001), Un SIG es una herramienta que integra tecnología informática, personas e información geográfica y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, procesar, editar y representar datos georreferenciados.

La obtención de un mapa en muchos casos constituye la fase final del trabajo, su resultado trata de un documento que proporciona (junto con datos territoriales) un conocimiento integrado del espacio en estudio. En el planteamiento, la cartografía obtenida a partir de la digitalización constituye una variable adicional dentro de un sistema de información integrado para el mejor conocimiento del espacio que los rodea.

Según Olaya (2011). Si bien un SIG tiene una inherente naturaleza integradora y esta puede enfocarse desde muchos puntos de vista, es por ello que el elemento más relevante en este sentido es la propia información que un SIG maneja y las características de esta. Conceptualmente, el verdadero pilar de esa naturaleza integradora del SIG reside en la información geográfica con la que se trabaja, que provee la amalgama adecuada para que un SIG sea un sistema sólido y cohesionado, confiriéndole a su vez sus propias características y su interés como herramienta múltiple.

Los SIG deben ser entendidos al día de hoy como un sistema, la ciencia que los define y en la que se fundamentan debe no sólo describir y servir de soporte a sus elementos, sino también atender a una de las características fundamentales de todo sistema: las interrelaciones existentes entre dichos elementos (Olaya, 2011).

Debido a que los SIG son sistemas complejos que integran una serie de distintos elementos interrelacionados es importante mostrar las propias características de cada elemento y los conceptos necesarios para entender las relaciones entre ellos.

De forma general para entender un SIG es formando una serie de subsistemas, en donde cada uno de ellos está encargado de una serie de funciones particulares. Es habitual citar tres subsistemas fundamentales según (Olaya, 2011).

- Subsistema de datos. Se encarga de las operaciones de entrada y salida de datos, y la gestión de estos dentro del SIG. Permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones con base a ellos.
- Subsistema de visualización y creación de cartografía. Crea representaciones a partir de los datos (mapas, leyendas), permitiendo así la interacción con ellos. Entre otras opciones incorpora también las funciones de edición.
- Subsistema de análisis. Contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.

Según (Olaya, 2011) otra forma distinta de ver al sistema SIG es atendiendo a los elementos básicos que lo componen, de los cuales se desprenden cinco elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto.

- Datos. Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia del mismo.
- Métodos. Un conjunto de aplicaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.
- Software. Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- Hardware. El equipo necesario para ejecutar el software.
- Personal. Las personas encargadas y capacitadas para diseñar y utilizar el software, siendo el motor del SIG.

1.10 SIG aplicados al transporte (SIG-T)

En los últimos años el uso de los sistemas de información geográfica en la gestión y planeación en distintos servicios públicos ha crecido significativamente, fomentando con ello el desarrollo de sistema de información y bases de datos en general.

La redes de transporte se construyen sobre el territorio y sobre ellas se desplazan flujos de personas, de materia y de energía. Los SIG aplicados al área de transporte son un dominio de funcionalidad genérica (Till, 2000). Dada la importancia que han adquirido sus aplicaciones en esta área, en el ámbito anglosajón, se le ha dado una nomenclatura específica conocida como SIG-T (GIS for transport, GIS-T). Estos integran procesos de

modelación manipulación y análisis de datos no siempre incluidos en los SIG convencionales.

El campo de los SIG-T es muy extenso (análisis de redes, evaluación de impactos ambientales, localización y análisis de accidentes, sistemas inteligentes de transporte, solo por mencionar unas). Sin embargo, en el análisis, gestión, y planificación de transportes, el cual señala dos características: la naturaleza multidimensional de los datos, que hace compleja la construcción de las bases de la información y la introducción de las tecnologías la información que han dado lugar a los conocidos Sistemas de Transporte Inteligente (SIT).

Los SIT utilizan los SIG como instrumentos para la construcción, gestión y análisis de sus bases de datos geográficas, lo que les ha permitido ampliar en gran medida sus requerimientos. Estos obligan al desarrollo de nuevos modelos conceptuales de datos SIG (Chapleau y Trepanier 1997; Gottsegen et al., 1994). Muchos SIT utilizan bases de datos navegables que facilitan el acceso, recuperación, análisis y representación de elevados volúmenes de información en tiempo real. También deben ser bases de datos distribuidas que permitan el acceso remoto a los datos (Seguí y Martínez, 2003).

En la actualidad se tienen incorporados a los SIG algoritmos para resolver diversos problemas como los siguientes:

1. Análisis de la ruta mínima.
2. Diseño de las rutas de vehículos.
3. Modelos de flujo de redes.
4. Modelos de partición-agrupación
5. Modelos de ubicación-asignación.
6. Modelos de planeación de transporte (generación –atracción de viajes, distribución de viajes, elección modal y asignación).

Debido a que toda la información necesaria para la resolución de estos problemas, se almacena por medio de matrices de datos, los SIG-T deben poder crear y modificar y revisar matrices de forma continua, para dar una o varias soluciones a un mismo problema cambiando o variando ciertas restricciones.

Para el análisis de sistemas de rutas se debe de crear un modelo de redes, en el cual se digitalizan las vialidades de la zona a estudiar, la cantidad y distribución de las mercancías a recolectar o entregar, para este caso se considera que las mercancías son los residuos sólidos.

Dependiendo de la forma en que las mercancías se recolectan el diseño de las rutas se puede resolver, ya sea mediante el problema de rutas de vehículos o bien mediante las rutas en arco.

1.11 Sistema de transporte de residuos sólidos

Según la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL, 1996). Atendiendo al grado de especialización de los vehículos recolectores utilizados en la prestación del servicio, los métodos de recolección pueden clasificarse en métodos mecanizados, semi-mecanizados y métodos manuales.

Los métodos mecanizados y semi-mecanizados normalmente se utilizan en localidades altamente urbanizadas; mientras que los métodos manuales (que normalmente se efectúan con equipos no convencionales), son más usuales en zonas deprimidas y de difícil acceso, así como en localidades eminentemente rurales.

Ahora bien, según el tipo de demanda por atender, se pueden tener dos tipos de métodos y de recolección; para demandas de tipo continuo y semi-continuo y, para demandas de tipo discreto.

De acuerdo con lo anterior, en el medio mexicano se pueden hallar toda la gama de métodos que resultan de la combinación de los dos criterios antes mencionados, aunque predominen los métodos semi-mecanizados de demanda discreta. Con base en lo antes escrito, se puede decir que un método de recolección está definido por el tipo de demanda exigida y por el grado de tecnificación de los equipos utilizados.

Según las demandas del servicio y el grado de tecnificación de los equipos (mismo que se encuentra relacionado de manera directa con el nivel de servicio y, de forma inversa con la participación del usuario mismo en el cumplimiento del servicio), los métodos de recolección a escala nacional se clasifican en:

- **Método de Esquina o de Parada Fija** (demanda discreta semi-mecanizada con alta participación del usuario).
- **Método de Acera** (demanda continua semi-mecanizada con mediana participación del usuario).
- **Método Intradomiciliario o de Llevar y Traer** (demanda semi-continua semi-mecanizada con baja o nula participación del usuario).
- **Método de Contenedores** (demanda discreta mecanizada con alta participación del usuario).

1.11.1 Método de esquina o de parada fija

Se puede decir que es el método más económico y, es aquel mediante el cual los usuarios del sistema llevan sus recipientes hasta donde el vehículo recolector se estaciona para prestar el servicio.

Una vez que los usuarios han llegado hasta el vehículo, forman una fila ordenada para que un operador les tome el recipiente y lo entregue a otro que se encuentra dentro de la carrocería del vehículo, el cual vacía su contenido y lo regresa al operario que se le entregó para que, a su vez, se lo devuelva al usuario, quien después de ser atendido se retira del vehículo. La operación anterior se repite tantas veces como sea necesario, hasta atender a todos los usuarios que lo hayan solicitado.

1.11.2 Método de Acera

En este método, el personal operario del vehículo recolector toma los recipientes con basura que sobre la acera han sido colocados por los usuarios del servicio, para después trasladarse hacia el vehículo recolector, con el fin de vaciar el contenido dentro de la tolva o sección de carga de dicho vehículo; regresándolos posteriormente al sitio de la acera de donde los tomaron, para que los usuarios atendidos los introduzcan ya vacíos a sus domicilios.

Para que se cumpla debidamente lo antes descrito se requiere, además de amplio civismo por parte de los usuarios del sistema, que el vehículo recolector transite a bajas velocidades en ambos sentidos de la calle; por consiguiente, es lógico pensar que este método tiene más

posibilidades de ser implantado ordenadamente en aquellas localidades que cuentan con calles de doble sentido y, de preferencia, con camellones.

Este método, además de ser más costoso que el de esquina, presenta el inconveniente de que animales domésticos y no domésticos (perros, gatos y ratas entre otros), pueden verse atraídos por recipientes con basura sobre la acera, pudiendo en un momento dado, dispersar sobre la misma al buscar su alimento y, dando por resultado que la recolección se lleve a cabo en forma más lenta. Para evitar o atenuar este inconveniente, suele recomendarse el uso de bolsas de polietileno herméticamente cerradas, así como el empleo de canastillas elevadas en las aceras donde se colocan los recipientes con los residuos; sin embargo, esto puede involucrar un costo adicional para los usuarios, que no siempre están dispuestos a cubrir.

1.11.3 Método de “Llevar y Traer” o Intradomiciliario

Este método es semejante al anterior, con la variante de que los operarios del vehículo recolector, entran hasta las casas habitación por los recipientes con basura, regresándolos hasta el mismo sitio de donde los tomaron, una vez de haberlos vaciado dentro de la caja del vehículo. Naturalmente, este método de recolección suele resultar más costoso que el de acera y, aún más que el de esquina.

1.11.4 Método de Contenedores

El Método de Contenedores, es semejante al de esquina en cuanto a que el vehículo recolector debe detenerse en ciertos puntos predeterminados para llevar a cabo la prestación del servicio. Puede decirse que este método es el más adecuado para realizar la recolección en centros de gran generación o de difícil acceso; como pueden ser hoteles, mercados, centros comerciales, hospitales, tiendas de autoservicio y zonas marginadas, entre otras.

La localización de los contenedores, deberá disponerse de tal manera que el vehículo recolector tenga un fácil acceso a ellos y que, además, pueda realizar maniobras sin problemas.

No debe pensarse, que en todos los casos los métodos de recolección mencionados se cumplen tal y como fueron descritos, puesto que de una u otra manera siempre existe

alguna variante en cuanto al equipo, participación del usuario y número de empleados que prestan servicio (por señalar tan sólo algunas de ellas), que los diferencian de los antes mencionados.

1.12 Frecuencia de recolección

La prestación de servicio de recolección es una de las etapas más caras del sistema del manejo de basura y, una de las que presenta mayores oportunidades para la minimización de costos. Uno de los factores que más influye sobre el sistema, es la frecuencia de recolección, la cual deberá prever que el volumen acumulado de basura no sea excesivo y que el tiempo transcurrido desde la generación de basura hasta la recolección para su disposición final no exceda el ciclo de reproducción de la mosca que varía, según el clima, de 7 a 10 días; tal y como se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1. Tiempo de incubación y crecimiento de la mosca (cifras en días)

Temperatura (°C)	Huevo a Pupa	Huevo a Adulta
Promedio de 20°C	10.1	20.5
Promedio de 28°C	5.6	10.8
Promedio de 35°C	5.6	8.9

Fuente: Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales, SEDESOL.

1.13 Composición de los RSU

Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) son muchos los factores que influyen en la composición de los residuos sólidos, entre estos se encuentran el grado de urbanización e industrialización de la localidad, el ingreso per cápita, el clima, las modas, tradiciones, costumbres, hábitos alimenticios, la frecuencia de recolección de residuos y el uso de trituradores domésticos, entre otros.

En donde se incluyen dentro de los residuos sólidos urbanos todos los que se generan en la actividad doméstica, comercial y de servicios, así como los procedentes de la limpieza de calles, parques y jardines. Según la procedencia y la naturaleza de estos residuos se pueden clasificar en:

- Los residuos domiciliarios son residuos sólidos procedentes de la actividad doméstica, como residuos de la cocina, restos de comida, desperdicios de la calefacción, papeles, vidrios, material de embalaje y demás bienes de consumo, adecuados por su tamaño para ser recogidos por los servicios municipales normales. Se incluyen los residuos de domicilios colectivos, tales como cuarteles, residenciales o fraccionamientos.
- Los residuos voluminosos son residuos de origen doméstico, tales como grandes embalajes, muebles o mueblerías y que debido a sus dimensiones no son adecuados para su recolección por los servicios municipales normales, pero que pueden ser eliminados junto con los residuos domiciliarios.
- Los residuos comerciales y de servicios son los residuos generados en las distintas actividades comerciales (tiendas, mercados, almacenes y centros comerciales) y del sector de servicios (bancos, oficinas, centros de enseñanza o de gobierno). Por sus características específicas, no están incluidos aquí los residuos procedentes de la actividad sanitaria, ni los generados en los mataderos.
- Los residuos de limpieza de vías y áreas públicas son los procedentes de las actividades de limpieza de calles y paseos y de arreglo de parques y jardines (hierba cortada, hojarasca, troncos y ramas de hasta un metro de longitud, entre otros)

Capítulo 2

Situación actual de la zona estudio, sistema de recolección de residuos sólidos urbanos

En el presente capítulo se describe a profundidad la situación actual en el municipio de Atlacomulco, Estado de México en relación a la recolección de residuos sólidos urbanos, partiendo de la generación per cápita de basura en la zona de estudio, teniendo en cuenta en dónde se presenta el mayor número de comercios y zonas habitacionales ya que la generación de basura no es la misma en ambos casos y es dónde se puede tener en consideración a la hora de asignar las rutas.

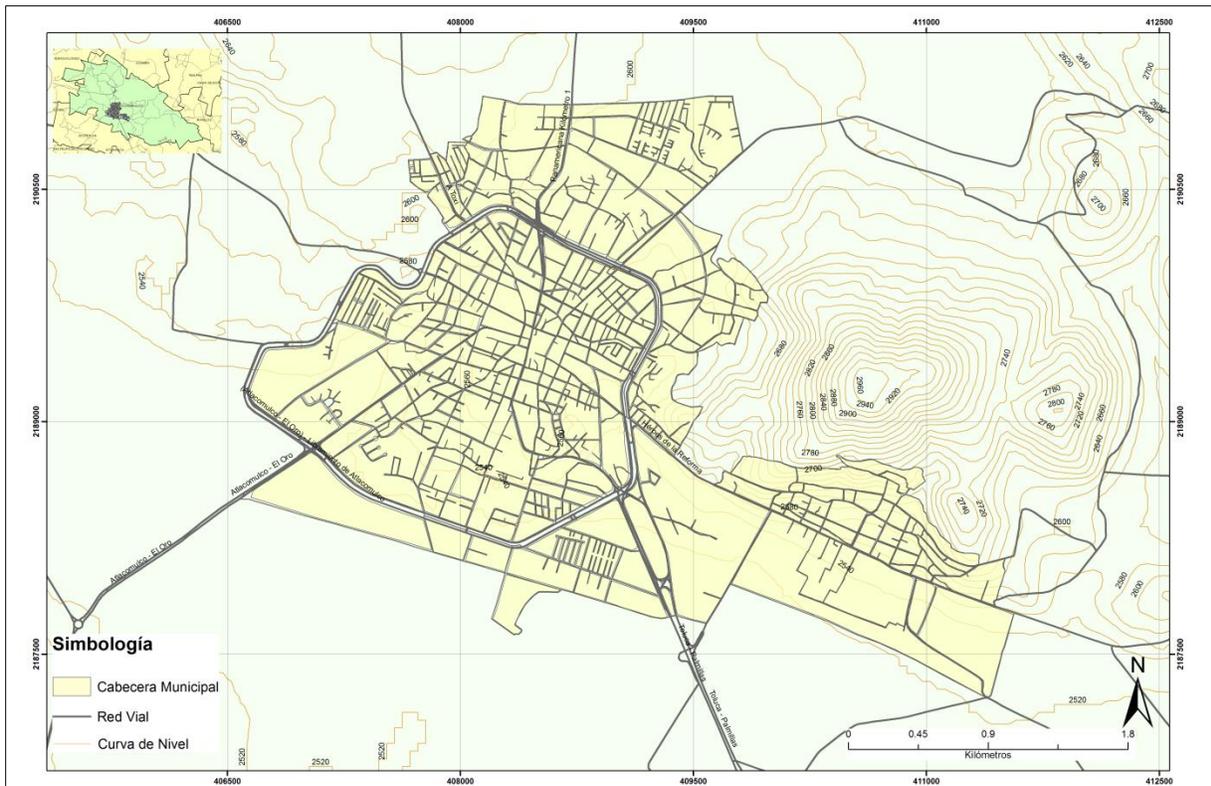
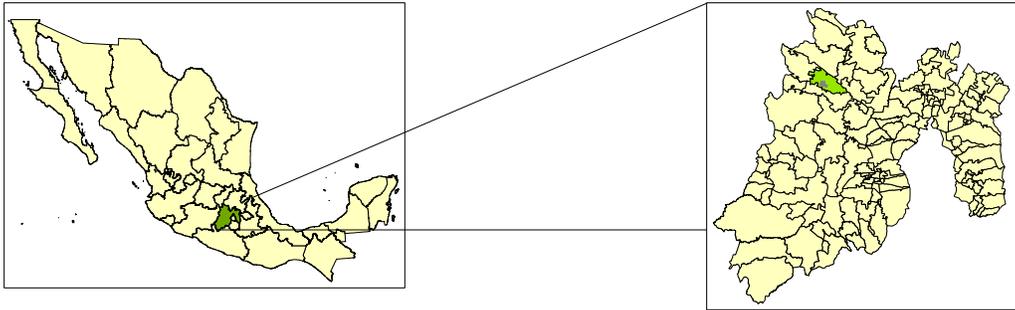
2.1 Localización y características generales

El municipio de Atlacomulco se localiza al norte del Estado de México, colinda al norte con el municipio de Acambay, al sur con Jocotitlán, al este con Morelos y Timilpan, al oeste con Temascalcingo, cuenta con las siguientes coordenadas geográficas extremas: Al norte. 19° 54', al sur 19° 44' de latitud norte; Al este 99° 42', al oeste 99° 58' de latitud oeste.

El Municipio cuenta con una superficie aproximada de 25,827 has; es la cabecera municipal la Ciudad de Atlacomulco de Fabela. Ver Mapa 1.

El clima predominante en la región puede clasificarse como templado sub-húmedo con lluvias en verano (CW) con lluvias en verano según lo establecido por Köppen y modificado por Enriqueta García, la precipitación media anual oscila entre los 800 y 1000 mm teniendo una temperatura promedio de 20°C como máxima y 6°C como mínima.

Mapa 1. Mapa de localización



Fuente: Elaboración propia con base en Open Street Map

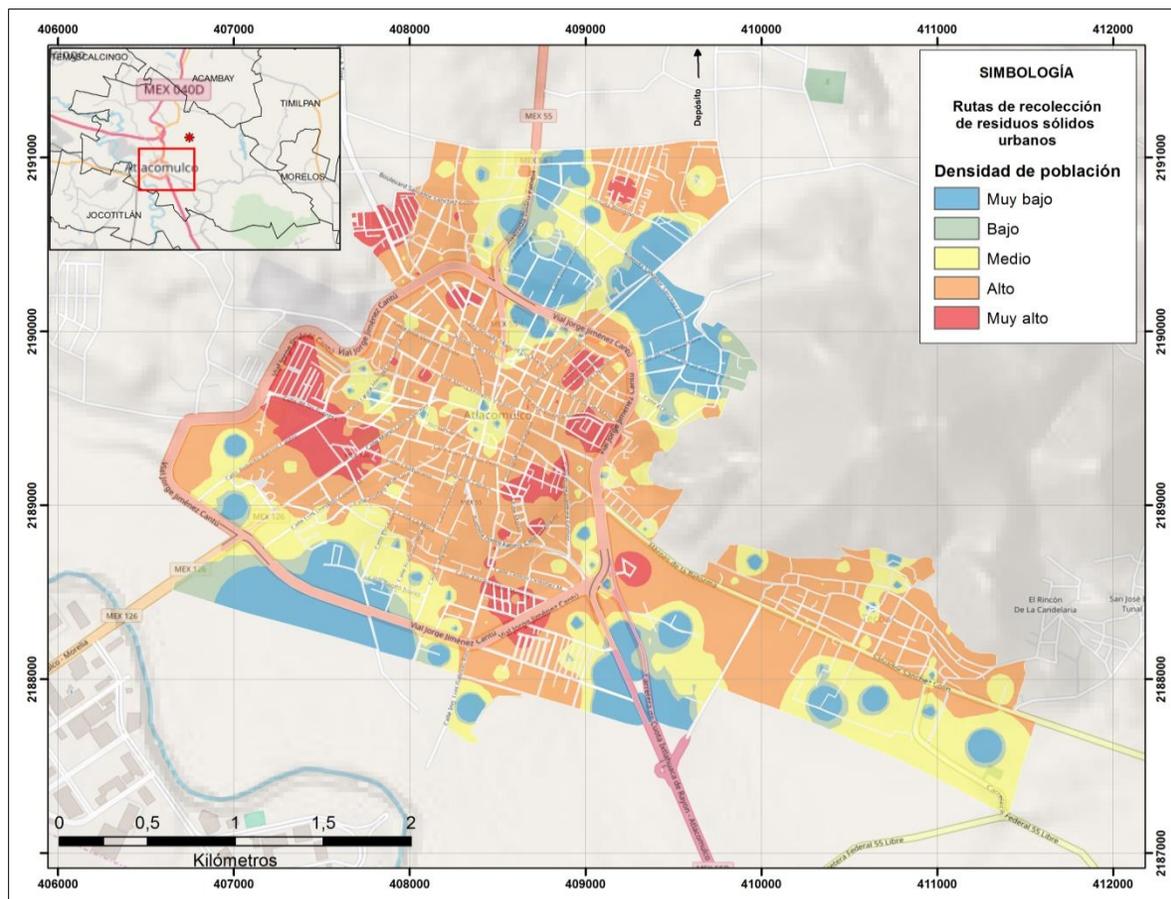
2.2 Situación actual de la densidad de población

Como se puede apreciar en el mapa 2 la densidad de población se generó con información de INEGI del año 2010, se realizó a nivel de manzana, resaltando valores que van de “Muy bajo a Muy alto” .

La densidad alta se localiza en zonas por lo regular en zonas con fraccionamientos, los cuales se encuentra en el oeste de la cabecera de Atlacomulco en la colonia Miguel Portilla Saldaña al sur de la colonia la Mora, en la zona Este y Noreste en las colonias los Electricistas y Morelos respectivamente. Por ultimo en la zona norte en la colonia El Jazmín.

Por otro lado la densidad baja se presenta principalmente en la zona norte ubicada cerca de la terminal de autobuses, en la zona sur los valores bajos predominan debido a la ubicación de zonas industriales y presencia de centros comerciales.

Mapa 2 Densidad de población



Fuente: Elaboración propia con información del INEGI (2015).

2.3 Situación actual de la concentración de sectores económicos

La distribución de los sectores económicos predominantes en el municipio de Atlacomulco se obtuvo a partir de la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del año 2015.

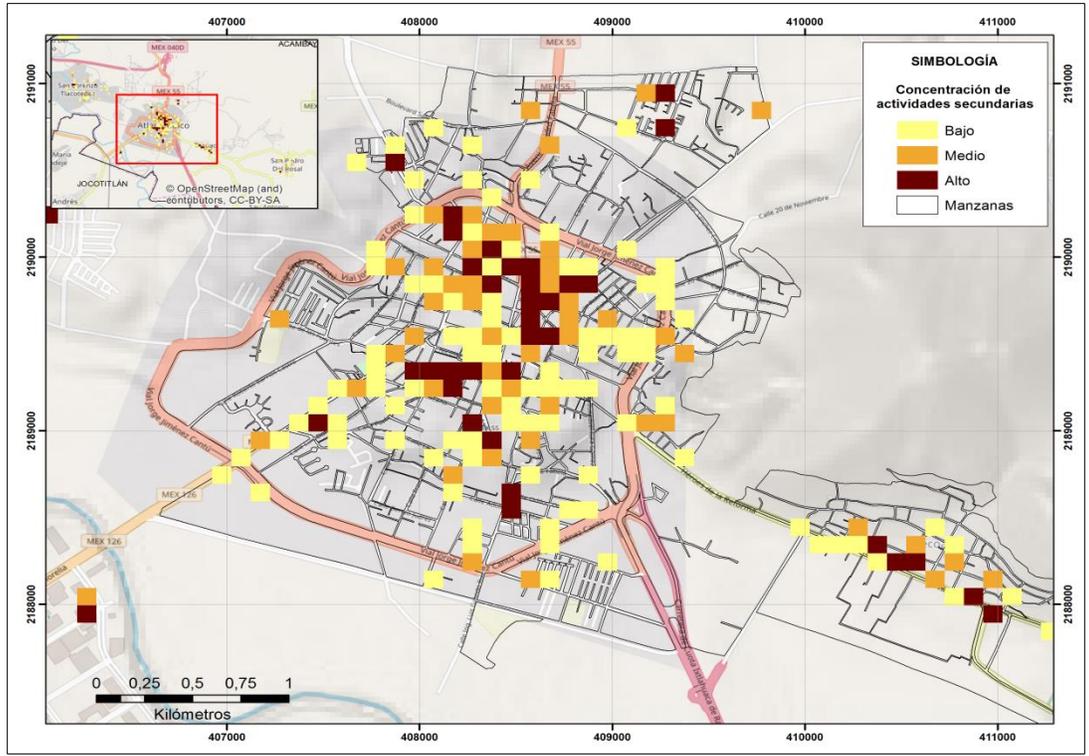
Para la realización de del mapa de actividades se optó por utilizar una gradilla cuya dimensión de cada cuadro fue de 10 x 10 metros esto con el fin que distinguir la concentración de actividades secundarias y terciarias en el municipio que se encuentran en forma puntual, se eligieron solo estas dos actividades para comprender de una mejor manera la situación actual del municipio. Ver tabla 2

En el mapa muestra la concentración de sector secundario en la cabecera del municipio con valores que van de bajo, medio y alto sobresaliendo estos últimos en la zona centro principalmente y que tienen como principal actividad la generación de insumos provenientes directamente de actividades primarias. Ver mapa 3

Por otra parte el en el mapa de actividades terciarias, estas se encuentran aglomeradas en la zona centro principalmente y por lo regular tienen mayor presencia en la las vialidades principales, esto aunado a la los servicios que ofrece de tipo financieros, de gobierno, servicios profesionales y sobre todo comercios al por menor y al por mayor. Ver tabla 3

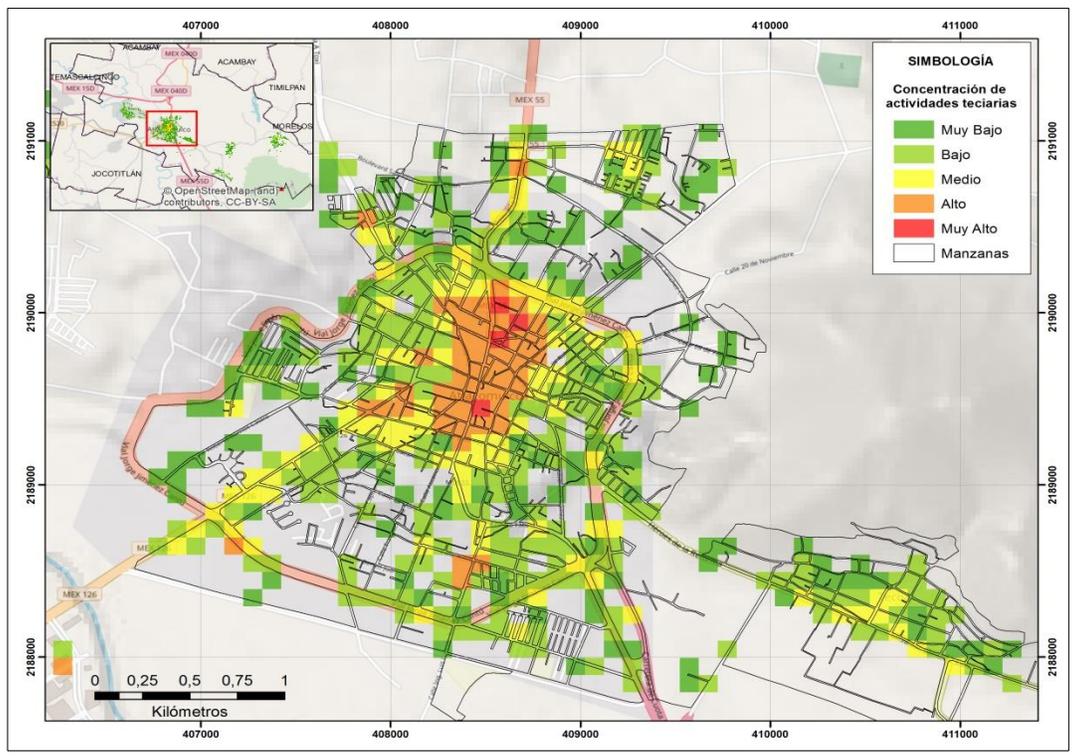
Otra zona que destaca es la aledaña a la terminal de autobuses que como es bien sabido la calle Isidro Fabela en toda su extensión cuenta con servicios que van desde comercios al por menor y considera también al propio ayuntamiento del municipio y a sus alrededores dependencias y secretarías del mismo. Ver mapa 4

Mapa 3 Concentración de actividades secundarias



Fuente: Elaboración propia con información del DENU (2015).

Mapa 4 Concentración de actividades terciarias



Fuente: Elaboración propia con información del DENU (2015).

Tabla 2 Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN)

Agrupación tradicional	Característica general de los sectores	Sector		Criterios de orden
<i>Actividades secundarias</i>	Transformación de bienes	21	Minería	Los insumos de este grupo de actividades pueden provenir de las actividades primarias, o de este mismo grupo, y sus productos se destinan a todos los sectores. Tradicionalmente, estos cuatro sectores se han llamado “la industria” (en contraposición al “comercio”, “los servicios” y “las actividades primarias”). El sector 21 se sitúa al principio de este grupo porque combina tanto actividades de extracción, parecidas a las actividades primarias, como de transformación, PEMEX es el ejemplo claro de este tipo de unidades económicas. Los sectores 22 y 23 se ubican enseguida porque ambos son grandes usuarios de los recursos naturales, aquí entran ejemplos como la Comisión de Agua Potable de cada municipio y las Constructoras Abita y Casas Geo, respectivamente; el 23 se halla más cercano al 31-33, porque otra gran parte de sus insumos proviene de las manufacturas.
		22	Electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final	
		23	Construcción	
		31 – 33	Industrias manufactureras	
<i>Actividades terciarias</i>	Distribución de bienes	43	Comercio al por mayor	Estos sectores efectúan las actividades de distribución de los bienes que se produjeron en los grupos de actividades primarias y secundarias, ejemplos tales como las Agencias Ford, tiendas Aurrerá, Elektra, Chedraui. (así como el traslado de personas, donde se clasifican Ómnibus de México, Aeroméxico, Frío Express.). En particular, el comercio se sitúa inmediatamente después de las manufacturas por la directa e intensa interacción entre ellos.
		46	Comercio al por menor	
		48 – 49	Transportes, correos y almacenamiento	
	Operaciones con información	51	Operaciones con información	Por la creciente importancia de la información para los negocios y los individuos el sector, se sitúa inmediatamente después de los servicios de distribución y antes del resto de los servicios.
	Operaciones con activos	52	Servicios financieros y de seguros	Los sectores 52 y 53 están contiguos porque sus actividades consisten en invertir activos (dinero y bienes), de los que sostienen beneficios al ponerlos a disposición del cliente, sin que éste se convierta en propietario de dichos activos. La importancia económica de los servicios financieros sitúa al grupo entre los primeros lugares de las actividades terciarias. Algunos ejemplos de unidades económicas dedicadas principalmente a estas actividades son: Banamex, Seguros América, entre otras.
		53	Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	
	Servicios cuyo insumo principal es el conocimiento y la experiencia del personal	54	Servicios profesionales, científicos y técnicos	Los sectores 54, 55 y 56 se dirigen principalmente a los negocios y tienen un impacto económico en ellos. En su mayoría se trata de actividades especializadas que tradicionalmente eran efectuadas por los mismos negocios y que hoy son adquiridas por éstos como un servicio más.
		55	Dirección de corporativos y empresas	
		56	Servicios de apoyo a los negocios	

Fuente: Elaboración Propia con base en el DENUE

Tabla 3 Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN)

Agrupación tradicional	Característica general de los sectores	Sector		Criterios de orden
<i>Actividades terciarias</i>	Distribución de bienes	61	Servicios educativos	Los sectores 61 y 62, como en el grupo anterior, también comprenden actividades que requieren conocimientos y especialización por parte del personal, y que se dirigen principalmente a las personas. Su impacto es más bien social, ya que repercuten en el nivel educativo y la salud de las personas. Ejemplos: CONALEP y CBTIS, IMSS e ISSSTE, Oceánica.
		62	Servicios de salud y de asistencia social	
	Servicios relacionados con la recreación	71	Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos	Estos sectores se dirigen principalmente a las personas, aunque también dan servicio a los negocios. Aquí se ubican unidades económicas como el Grupo Mana, la Casa de la Cultura de cada municipio, el Club Necaxa, Museos de cera, así como del sector 72, el Hotel Fiesta Americana, Vips, Sanborns, California Dancing Club.
		72	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	
	Servicios residuales	81	Otros servicios excepto actividades del gobierno	Por ser un sector residual de los servicios (con excepción de los del gobierno), se sitúa al final del grupo de los que pueden ser prestados indistintamente por el sector público o por el privado. Algunos ejemplos de estos servicios son los que ofrecen los centros de verificación vehicular, salones y clínicas de belleza, panteones, estacionamientos, servicios domésticos.
	Gobierno	83	Actividades del gobierno y de organismos internacionales y extraterritoriales	Este sector se ubicó al final por su carácter normativo o regulador de todas las actividades que le anteceden. En este sector se encuentran el IFE, el INEGI, las Cámaras de senadores y de diputados, las Oficinas de la ONU, las embajadas, u otros similares

Fuente: Elaboración Propia con base en el DENU

2.2 Descripción estructural de la red vial urbana

La Cabecera Municipal se encuentra conectada con diferentes Municipios y estados a través de vialidades regionales. Las principales son las que lo comunican con los Municipios de: El Oro, Jilotepec, Toluca y el estado de Querétaro.

Según el (Plan de desarrollo urbano, 2012) la cabecera municipal, Atlacomulco de Fabela, presenta una red ortogonal en su centro, la cual tiene una característica importante dado que es una cabecera relativamente pequeña por lo tanto está diseñada para que con el tiempo pueda desarrollarse y tener una adecuada conexión con las diferentes localidades, asimismo al desarrollo habitacional que se tiene contemplado. El Circuito Vial Dr. Jorge Jiménez Cantú funciona como distribuidor vial para las carreteras que llegan a la población, y comunica a todas, también conecta con la zona industrial.

La estructura radial presenta una deformación al este, donde el cerro Atlacomulco impedirá cualquier incursión del área urbana.

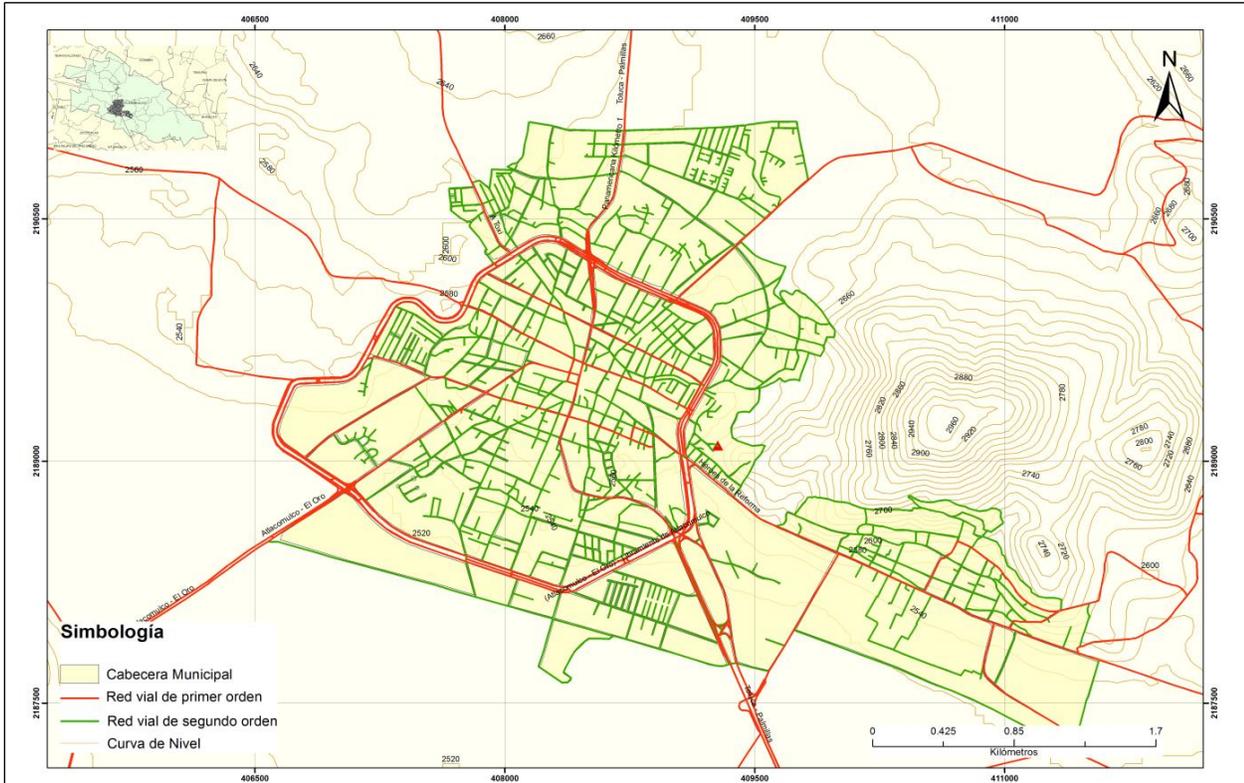
Fuera de la cabecera municipal, la mayoría de las localidades cuentan con una carretera o avenida principal sobre la cual han generado un crecimiento lineal, pero siguiendo la traza irregular antes mencionada.

La mayor parte de los asentamientos presentan vialidades sinuosas obligadamente por la topografía de cada lugar. La cabecera municipal es una de las estructuras que presenta un esquema más reconocible, con una traza vial ortogonal (rectilínea) en su centro y radial en su periferia. Ver Mapa 5.

Las vialidades en general, se caracterizan por tener un promedio de banqueteta de 1 metro y un ancho promedio de arroyo de 7 metros.

En el caso de las vialidades municipales que son las que comunican a la cabecera municipal con sus comunidades, su estado físico hace que el tránsito sea lento. En cuanto a vialidades urbanas, las que se ubican en el centro de la cabecera municipal son las que presentan una mayor carga vehicular, lo que implica algunos problemas para la circulación, fundamentalmente en horas "pico"

Mapa 5. Red vial de la cabecera municipal de Atlacomulco



Fuente: Elaboración propia, con base en Open Street Map

2.3 Diagnóstico del sistema actual del sistema de recolección de residuos sólidos

El Municipio ha previsto la adecuación de un relleno sanitario que pueda dar servicio tanto al centro urbano como a las localidades circundantes.

Según el plan de desarrollo urbano en el municipio se genera 1.02 Kg. promedio por habitante al día, considerando esto tenemos que el municipio se registran 95 toneladas diarias, estas son depositadas en el relleno sanitario municipal, Las Minas, en la comunidad de San Luís Boro, el cual tiene una actividad desde hace 4 años, con una proyección de vida útil de 10 años.

Para mejorar la recolección de los residuos sólidos municipales, en el municipio se realiza periódicamente el barrido manual en las comunidades de Santiago Acutzilapan y San Lorenzo Tlacotepec, por ser las localidades de mayor generación de residuos, así como de actividades comerciales.

Actualmente en el municipio no se realiza ningún proceso de separación de los residuos sólidos, así como tampoco existen acciones de reciclaje, razones por las que disminuye la capacidad del actual relleno sanitario.

2.4 Sistema de limpia con camión recolector

En esta área, se están considerando 4 sectores para la cabecera municipal y 9 sectores para comunidades, en cada sector de la cabecera se asigna 2 vehículos.

Por el momento el servicio se realiza de acuerdo a los programas establecidos, mientras tanto, se está implementado el plan de manejo integral de residuos sólidos municipales en donde se establece con claridad la separación, recolección, doble uso, reciclaje y la disposición final de residuos sólidos urbanos.

En esta área se cuenta con el siguiente equipo:

- 14 camiones recolectores, (8) buenos, (2) regulares, (4) mal estado.
- 14 operadores
- 26 auxiliares.

Se brinda el servicio de recolección a toda la cabecera municipal, incluyendo el parque industrial y las 38 comunidades.

La distribución de las unidades es la siguiente:

- 4 unidades brindan el servicio al 100% en la cabecera municipal
- 9 unidades brindan el servicio al 100% en las comunidades.

La Dirección de obras públicas cuenta con bitácoras de recorrido-recolección, las cuales sirven como evidencia para poder comprobar que el operador recorre las rutas que se le han asignado, por tanto todo queda registrado desde que las unidades recolectoras salen del Patio hasta que éstos regresan nuevamente a éste. Esta bitácora cuenta con datos muy importantes como son: el número de la unidad recolectora, el nombre del operador, la fecha, las colonias que integran la ruta asignada, el nombre de las calles o avenidas de las colonias que integran la ruta, el horario en que se realizó la recolección en las calles o avenidas, como se muestra en los cuadro que a continuación se presentan.

Tabla 4. Unidad 1 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Agencia de viajes Colonia San Martín Colonia Arbolitos Colonia 4 Milpas Salida a Toluca Privada residencial “Las Flores” Gasolinera San Martín Restaurante el Mirador Mariscos El Crucero III Restaurante la Tarea	Ejido de Bobatevi Primera Sección TELMEX CFE Barcel Salida a Toluca Verificentro	Agencia de Autos Colonia San Martín Colonia Arbolitos Colonia 4 Milpas Salida a Toluca Privada residencial “Las Flores” Cremería Escuelas de San Martín Escuelas de la Aldea Transportes Restaurante el Mirador Mariscos El Crucero III Restaurante la Tarea	Ejido de Bobatevi Primera Sección Ejido de la Candelaria Salida a Toluca Tecoac, Escuela de discapacidad Barcel Gasolinera San Martín Hotel La Finca	Agencia de viajes Colonia San Martín Colonia Arbolitos Colonia 4 Milpas Salida a Toluca Privada residencial “Las Flores”	Comunidad de San Felipe Pueblo Nuevo Salida a Toluca Cremería Barcel

Nombre del operador: Héctor Castillo Mondragón

Auxiliares: Luciano Núñez Valencia / Leonel Plata Olmos

Tabla 5. Unidad 2 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Santa María Nativitas Tecoac Rincón de la Candelaria	Villas de Guadalupe Colonia Bongoni Colonia 2 de Abril Colonia Atlacomulli	Santa María Nativitas Tecoac San José del Tunal	Villas de Guadalupe Colonia Bongoni Colonia 2 de Abril Rincón de la Candelaria	Santa María Nativitas Tecoac San José del Tunal	Villas de Guadalupe Colonia Bongoni Colonia 2 de Abril Colonia Atlacomulli

Nombre del operador: Abel Bruno García

Auxiliares: Jesús de la Cruz Olmos / Manuel Galindo Gonzáles

Tabla 6. Unidad 3 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Libramiento	Cerrito colorado	Desviación a San Juan	Cerrito colorado	Desviación a San Juan	Cerrito colorado
Desviación a San Juan	Quinta Mercedes	de los jarros hasta la	Quinta Mercedes	de los jarros hasta la	Quinta Mercedes
de los jarros hasta la	Los Gigantes	cementera Benítez	San Martín de los	cementera Benítez	El salto
cementera Benítez	Diximoxi	Bombatevi	manantiales	Bombatevi	Moncar
Bombatevi	Rancho de la mala cara	Calle Marisol Arias	Las arenas	Calle Lázaro Cárdenas	
Calle los Encinos	Moncar	Conjunto habitacional	Diximoxi	Calle Marisol Arias	
Calle Lázaro Cárdenas	Las arenas	“Los Ángeles”	San Luis Boro	Conjunto habitacional	
Calle Marisol Arias		Conjunto habitacional	Bondoro	“Los Ángeles”	
Conjunto habitacional		“Vista Hermosa	Moncar	Conjunto habitacional	
“Los Ángeles”		Presa Tic-Ti		“Vista Hermosa”	
Colonia Homex		Auditorio Municipal		Presa Tic-Ti	
Conjunto habitacional		Colonia los Ángeles		Auditorio Municipal	
“Vista Hermosa”		Moncar		Colonia los Ángeles	
Presa Tic-Ti		San Luis Boro		Moncar	
Auditorio Municipal		Panteón jardines del			
Colonia los Ángeles		recuerdo			
La lomita de la cruz					
Moncar					

Nombre del operador: Abel Bruno García

Auxiliares: Jesús de la Cruz Olmos / Manuel Galindo Gonzáles

Tabla 7. Unidad 4 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Colonia El Jazmín	Bombatevi	Colonia El Jazmín	Bombatevi	Colonia El Jazmín	Bombatevi	Tianguis dominical
Colonia Tic-Ti	Ampliación la garita	Colonia Tic-Ti	Ampliación la garita	Colonia Tic-Ti	Ampliación la garita	
	Atenas		La cruz		Atenas	
	La cruz		San Ignacio de Loyola		La cruz	
	Las tarrias		Dolores la joya		Las tarrias	

Nombre del operador: Daniel Jiménez Díaz

Tabla 8. Unidad 5 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Santiago Acutzilapan	San Pablo Atotonilco San Jorge San Pedro del rosal San Francisco Chalchihuapan	Santiago Acutzilapan	San Pablo Atotonilco San Jorge San Pedro del rosal San Francisco Chalchihuapan	Santiago Acutzilapan	Valle de los Sauces	Santiago Acutzilapan

Nombre del operador: Edgar Domingo Hipólito

Auxiliares: Javier Mendoza López / Lázaro Miranda Lovera

Tabla 9. Unidad 6 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
San Lorenzo Tlacotepec	Valle de San Juan Santo domingo Shomeje San José Toxi San Jerónimo de los jarros San Juan de los jarros Bobashi de Guadalupe	San Lorenzo Tlacotepec Manto del rio pueblo Manto del rio ejido	Valle de san Juan La mesa de Chosto Costo de los jarros Bobashi de Guadalupe San Jerónimo de los jarros San Juan de los jarros Santo domingo Shomeje	San Lorenzo Tlacotepec	Ejido de San Lorenzo Tlacotepec Santo Domingo Shomeje San Juan de los Jarros San José Toxi Ex-Hacienda de Toxi	Tianguis

Nombre del operador: Víctor Pérez Alba

Auxiliares: Rogelio Yáñez Colín / Adelaido Chávez Yáñez

Tabla 10. Unidad 7 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Colonia centro	Colonia centro	Colonia centro	Colonia centro	Colonia centro	Colonia centro	Tianguis
Colonia las fuentes	Colonia las fuentes	Colonia las fuentes	Colonia las fuentes	Colonia las fuentes	Colonia las fuentes	
Colonia 4 milpas	Colonia la Ascensión	Colonia 4 milpas	Colonia la Ascensión	Colonia 4 milpas	Colonia la Ascensión	
	Calle legislatura sur		Calle legislatura sur		Calle legislatura sur	
	Colonia la mora sur		Colonia la mora sur		Colonia la mora sur	

Nombre del operador: Antolín Hernández Mejía

Auxiliares: Alfonso Alcántara Valencia / Salvador Domingo Ordoñez

Tabla 11. Unidad 8 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Colonia Morelos	Colonia Morelos	Colonia Morelos	Colonia Morelos	Colonia Morelos	Colonia Morelos
Colonia Felipe Ureña	Colonia Felipe Ureña	Colonia Felipe Ureña	Colonia Felipe Ureña	Colonia Felipe Ureña	Colonia Felipe Ureña
Calle Ignacio Zaragoza	Calle Ignacio Zaragoza	Calle Ignacio Zaragoza	Calle Ignacio Zaragoza	Calle Ignacio Zaragoza	Calle Ignacio Zaragoza
Calle Rafael Favila	Calle Rafael Favila	Calle Rafael Favila	Calle Rafael Favila	Calle Rafael Favila	Calle Rafael Favila
Calle Buenaventura	Calle Buenaventura	Calle Buenaventura	Calle Buenaventura	Calle Buenaventura	Calle Buenaventura
Calle Adalberto	Calle Adalberto	Calle Adalberto	Calle Adalberto	Calle Adalberto	Calle Adalberto
Calle Morelos	Calle Morelos	Calle Morelos	Calle Morelos	Calle Morelos	Calle Morelos
Calle Villada	Calle Villada	Calle Villada	Calle Villada	Calle Villada	Calle Villada
Calle Nicolás Bravo	Calle Nicolás Bravo	Calle Nicolás Bravo	Calle Nicolás Bravo	Calle Nicolás Bravo	Calle Nicolás Bravo
Av. Isidro Fabela	Av. Isidro Fabela	Av. Isidro Fabela	Av. Isidro Fabela	Av. Isidro Fabela	Av. Isidro Fabela
Calle Manuel del Mazo	Calle Manuel del Mazo	Calle Manuel del Mazo	Calle Manuel del Mazo	Calle Manuel del Mazo	Calle Manuel del Mazo
Calle Alfredo del Mazo	Calle Alfredo del Mazo	Calle Alfredo del Mazo	Calle Alfredo del Mazo	Calle Alfredo del Mazo	Calle Alfredo del Mazo
Calle mateos	Calle mateos	Calle mateos	Calle mateos	Calle mateos	Calle mateos
Centro comercial ATA	Centro comercial ATA	Centro comercial ATA	Centro comercial ATA	Centro comercial ATA	Centro comercial ATA
CONALEP	Colonia San Juan	CONALEP	Colonia San Juan	CONALEP	Hotel Cantalagua Inn
	Base del SUEM	Bodega Boing	Base del SUEM		
	Hotel Cantalagua Inn		Hotel Cantalagua Inn		
	Policía federal y gasolinera		Panteón del campo santo	Policía federal y gasolinera	

Nombre del operador: Teodoro Chávez Cárdenas

Tabla 12. Unidad 9 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Cuendo	Zona industrial	Cuendo	Colonia el seminario	Cuendo	San Lorenzo
La alcantarilla	Relleno sanitario	La alcantarilla	Ejido de la palma 2ª	La alcantarilla	La vega
Relleno sanitario		Relleno sanitario	sección	Relleno sanitario	Invernaderos
Colonia 2 de abril		Colonia 2 de abril	Ejido de bombatevi	Colonia 2 de abril	Relleno sanitario
Salida a Acambay		Salida a Acambay	La cruz 2ª sección	Salida a Acambay	
			Zona industrial		
			Relleno sanitario		

Nombre del operador: Héctor Iván Celestino de la Roncha

Tabla 13. Unidad 10 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Av. Emiliano Zapata					
Av. Miguel Hidalgo					
Calle de el Calvario					
Calle el rincón de las flores					
Circuito Jorge Jiménez Cantú					
Av. Isidro Fabela					
Calle de las manzanas					
Calle la FOVISTE					
Calle electricista					

Nombre del operador: Rosendo de la Cruz Hernández

Tabla 14. Unidad 11 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Cabecera municipal					

Nombre del operador: Guillermo Osorio López

Tabla 15. Unidad 12 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Cabecera municipal					

Nombre del operador: Omar de la Cruz Martínez

Tabla 16. Unidad 13 Diésel

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Cabecera municipal					

Nombre del operador: Juan de la Cruz Martínez

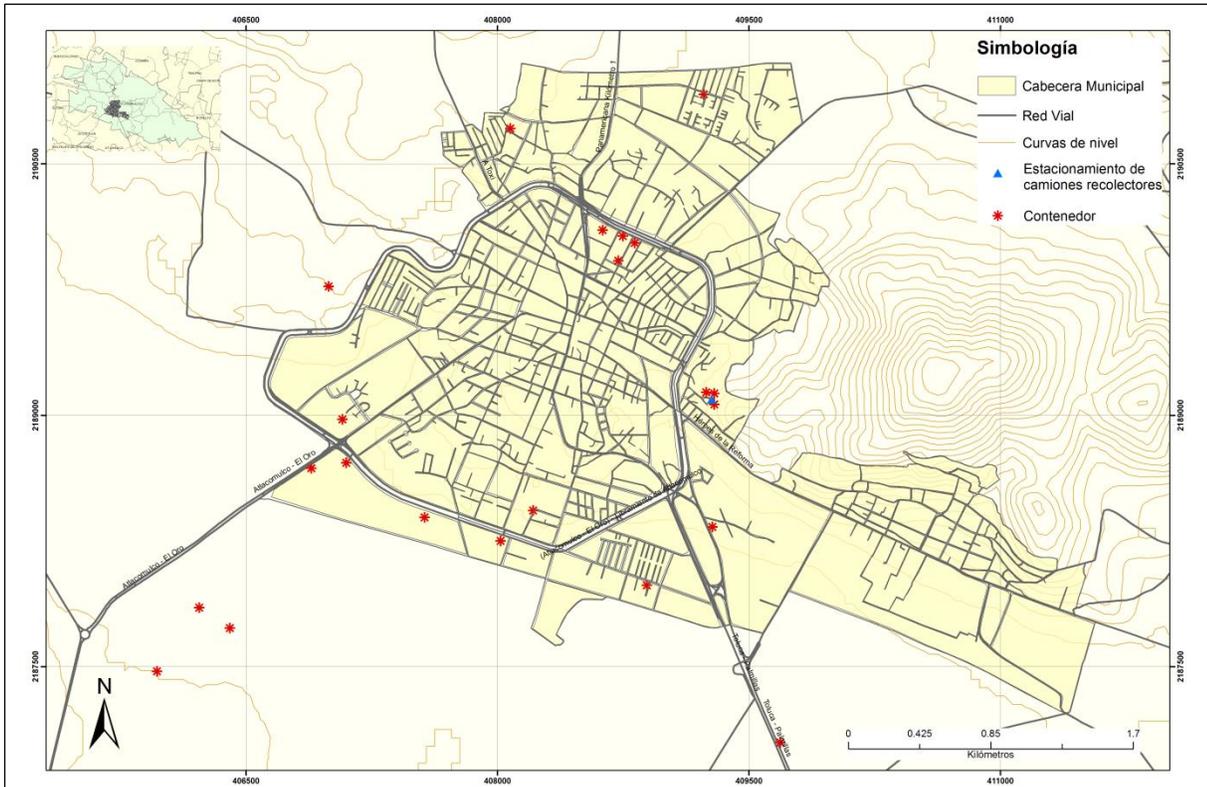
Tabla 17. Parque vehicular de camiones recolectores

No.	Inventario	Marca	Modelo	Tipo	Sector	Ruta
1	ATL024H00126-37	DODGE RAM 6500-163	1995	Camión 5 Toneladas	8	1
2	ATL024H00126-44	DODGE RAM 6500	1995	Camión 5 Toneladas	7	2
3	ATL024H00126-39	PUP-10 FORD	2001	Camioneta 3.5 Toneladas	11	3
4	ATL024H00126-41	FORD	2001	Camioneta 3.5 Toneladas	10	4
5	ATL024H00126-47	INTERNACIONAL 4300	2002	Camión 10 Toneladas	6	5
6	ATL024H00126-48	INTERNACIONAL 4300	2002	Camión 10 Toneladas	13	6
7	ATL024H00126-40	CHEVROLET KODIAK	2008	Camión 10 Toneladas	12	7
8	ATL024H00126-42	CHEVROLET KODIAK	2008	Camión 10 Toneladas	2	8
9	ATL024H00126-43	STERLING M 7500	2008	Camión 10 Toneladas	1	9
10	ATL024H00126-38	CHEVROLET	2007	Camioneta 3.5 Toneladas	9	10
11	ATL024H00126-35	FORD F-450	2009	Camioneta 4.5 Toneladas	3	11
12	ATL024H00126-53	DODGE RAM	2010	Camioneta 3.5 Toneladas	5	12
13	ATL024H00126-55	FORD F 350	2010	Camioneta 3.5 Toneladas	4	13
14	ATL024H00126-56	DODGE RAM	2013	Camioneta	14	14
15	ATL024H00126-45	CHEVROLET	2007	Camioneta remolque	s/d	s/d
16	ATL024H00126-46	CHEVROLET	2007	Camioneta remolque	s/d	s/d
17	ATL024H00126-50	s/d	s/d	Remolque	s/d	s/d
18	ATL024H00126-51	s/d	s/d	Remolque	s/d	s/d
19	ATL024H00126-52	s/d	s/d	Remolque	s/d	s/d

2.5 Recolección con contenedores fijos

En el mapa 6 muestra la ubicación de los contenedores en la cabecera, contando con dos camionetas con remolque, dos choferes y 1 auxiliar teniendo un total de 37 contenedores 25 en estado regular y 12 en mal estado

Mapa 6. Ubicación de contenedores de basura



Fuente: Elaboración propia con base a la dirección de servicios públicos

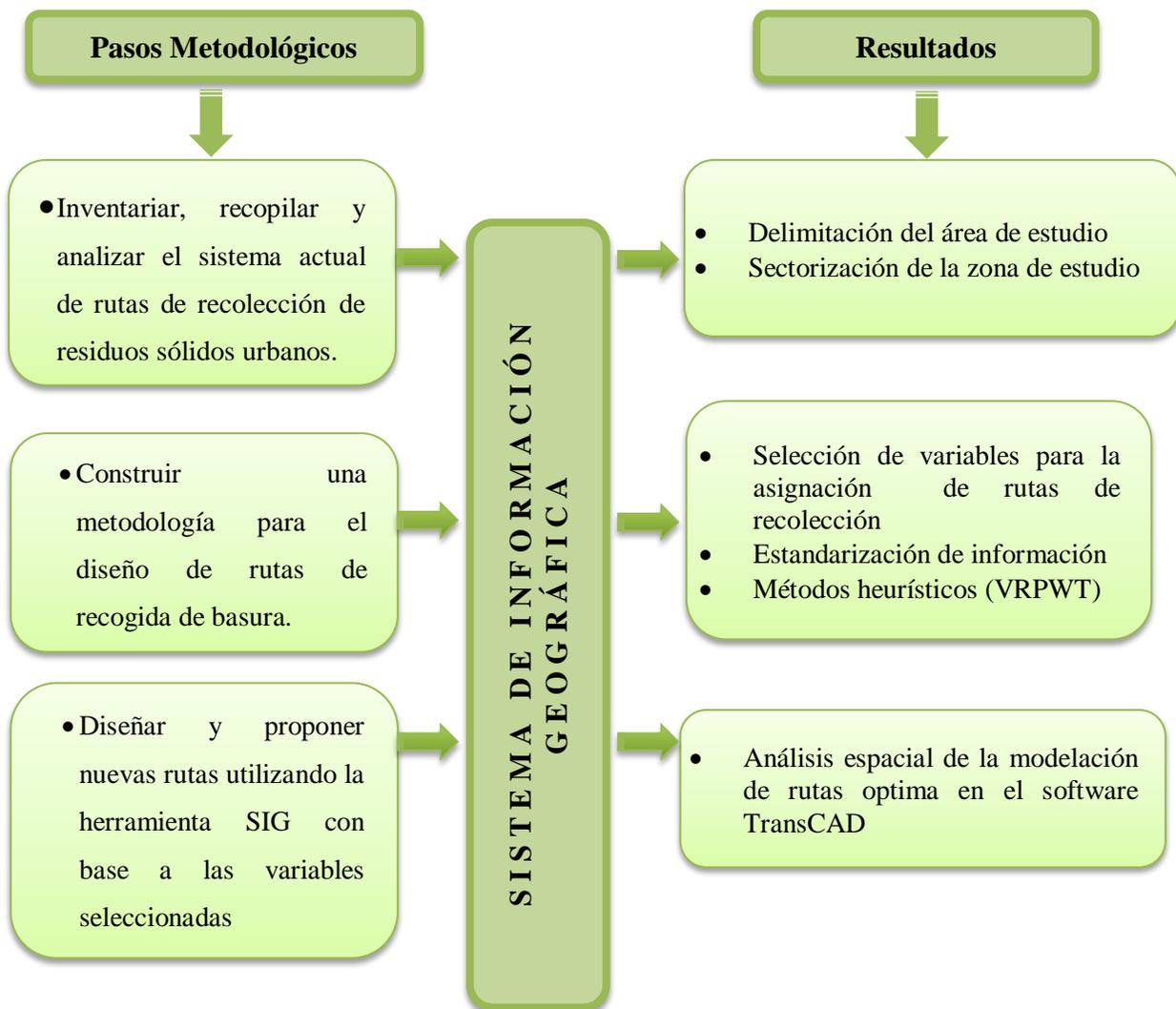
La información obtenida del diagnóstico previo ayudará de muy buena forma a la generación de nuevas rutas, teniendo en cuenta los insumos que para este caso son los camiones recolectores y sus capacidades con las que cuentan actualmente, así mismo se es consciente de la problemática que afecta al municipio si consideramos que no se tienen rutas específicas y debidamente planeadas en relación a la demanda de la población

Capítulo 3

Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo se siguió el siguiente proceso metodológico para la asignación de rutas de recogida de residuos sólidos urbanos haciendo adaptaciones para el municipio de Atlacomulco, Estado de México. Figura 1.

Figura 1. Esquema metodológico del trabajo de investigación



Fuente: Elaboración propia

3.1 Enfoque metodológico general

3.1.1 Método Estructural sistémico

El análisis estructural-sistémico en el encuadre de las ciencias sociales, concibe la sociedad como un sistema cohesionado, donde los elementos dependen los unos de los otros, donde cada costumbre, creencia, objeto material, idea, hace una función necesaria o esencial en la sociedad. Toda explicación funcionalista implica, en primer lugar, que la realidad social está organizada estructuralmente; en segundo lugar, que las partes de la realidad social analizada se vertebran con él todo y se relacionan entre sí; en tercer lugar, que los elementos de dicha sociedad cumplen una función, y que la adaptación de un fenómeno social al contexto equivale a su funcionalidad.

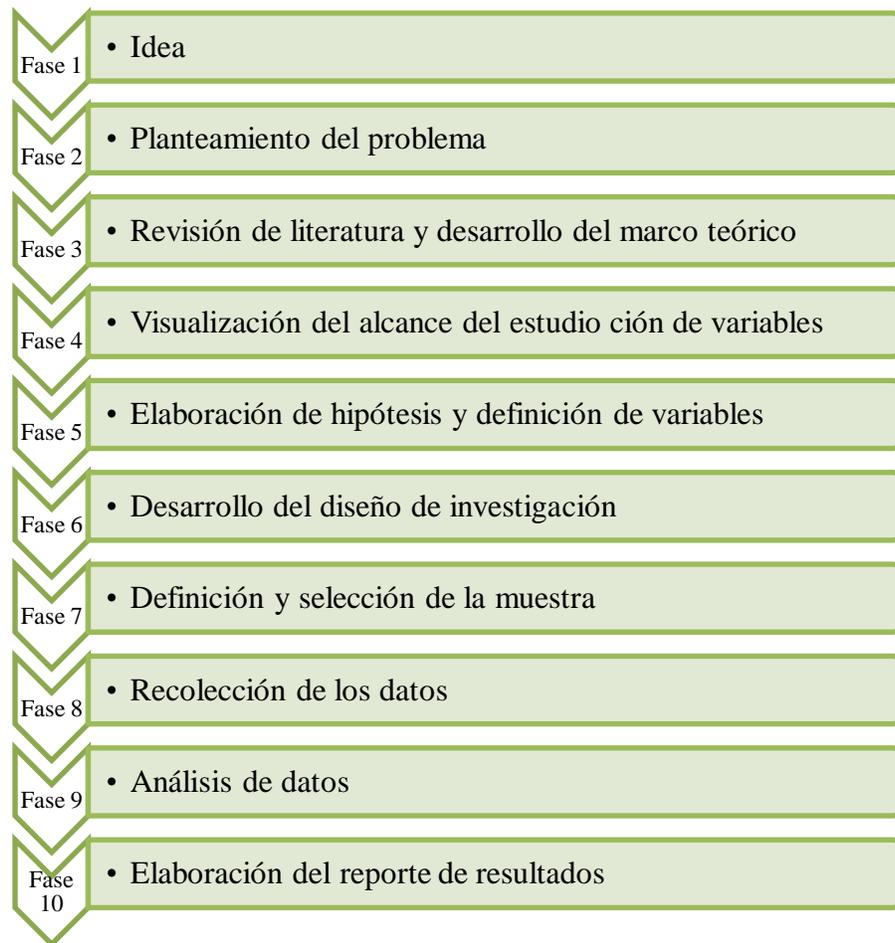
El enfoque estructural-sistémico desde la perspectiva del análisis espacial permite ver a la sociedad y su desenvolvimiento en un determinado espacio, como un sistema abierto, cuya estructura y funcionalidad depende en gran medida a características de la sociedad y el espacio geográfico que ocupa, entre esas características se encuentran las normas, patrones de conducta, modos de organización, desarrollo económico, de los tipos de relaciones sociales tanto internas como externas en conjunto con el medioambiente que lo rodea.

3.1.2 Enfoque cuantitativo

Tiene que ver necesariamente con la cantidad. Lo cuantitativo de los fenómenos sociales está relacionado con la cantidad o magnitud con la que éstos aparecen. Usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

Se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas (con métodos estadísticos) se establece una serie de conclusiones respecto de las hipótesis. Parte de una idea delimitada Se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o perspectiva teórica secuencial y rigurosa. Ver figura 2.

Figura 2. Fases del enfoque cuantitativo



Fuente: Elaboración propia con base a la dirección de servicios públicos

3.2 Determinación de la información base

Se analizó la información bibliográfica disponible y la proporcionada por la Dirección de Servicios Públicos por medio de la Coordinación de Limpia para identificar las principales fuentes de generación de residuos sólidos urbanos en la cabecera de Atlacomulco, lo anterior para poder determinar su cantidad y su distribución espacial.

3.3 Diagnóstico

Para la elaboración del diagnóstico se realizó la descripción general de la recolección de los residuos sólidos urbanos, para ello se describió tanto la infraestructura y equipos con que se cuenta, como el tipo de método de recolección empleado.

La descripción del servicio de recolección se basó tanto en la información proporcionada por los encargados de los servicios de limpia como en la que se obtuvo del trabajo. Dicha información se procesó en gabinete.

Para las rutas que actualmente se siguen se tiene las bitácoras antes mencionadas en donde se hacen mención las calles por las que circula para la recolección de residuos.

También se georreferenció la ubicación de los contenedores, que como se menciona estos están ubicados en escuelas, centros comerciales o fraccionamientos

3.4 Obtención de la red vial

Para el análisis de los sistemas de recolección aplicando sistemas de información geográfica, fue necesario digitalizar y georeferenciar toda la información relacionada con este servicio.

A continuación se hace una descripción de cada uno de los elementos que intervienen en el diseño y operación de los servicios de recolección y la forma en que estos elementos se digitalizaron.

La red vial se obtuvo parte de ella de Open Street Map, Google Maps, se tuvo que digitalizar las vialidades faltantes, posteriormente se verificó su topología en ArcMap y TransCAD, con el fin de tener la debida conexión entre arcos y nodos, esta es una parte fundamental ya que en esta capa se basó para poder correr el modelo que dio lugar a las rutas de recolección.

Sobre cada uno de los arcos de la red vial se obtuvieron los principales atributos como lo son:

- Nombre: El nombre de la vialidad ya está incluida en la red obtenida de INEGI, así como el tipo de vía.
- Sentido: Este atributo se obtuvo por medio de Google Maps
- Ancho: Se obtuvo obteniendo un aproximado medido en Google Earth
- Velocidad a flujo libre. En este caso la velocidad a flujo libre, se obtuvo de los recorridos realizados en campo.

3.5 Información requerida por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)

En su Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) establece los siguientes aspectos a considerar en las rutas de recolección, así como para su diseño.

- **Número y tipo de equipo seleccionado.**
- Tamaño de la tripulación.
- Frecuencia de recolección.
- **Distancia entre paradas y estaciones.**
- **Distancia al sitio de transferencia o disposición final.**
- Topografía del terreno.
- Tráfico en la ruta.
- Condiciones de los caminos.

Otras consideraciones para el ruteo son:

- Las rutas no deben de estar fragmentadas o traslapadas.
- Cada ruta deberá ser compacta, atacando un área geográfica y estar balanceada.
- El tiempo total de cada ruta deberá ser razonablemente el mismo.
- La recolección deberá comenzar lo más cercano al encierro.
- Las calles de un solo sentido se tratarán de atacar desde el principio de ellas.
- Se deberán minimizar las vueltas en U y a la izquierda.
- Las partes elevadas se atacarán primero.
- Generalmente, cuando sólo se recolecta de un lado de la acera, es preferible rodear las manzanas.
- Cuando la recolección es por los dos lados de la acera, es preferible recolectar en línea recta por varias manzanas.

Por otra parte la solución se puede encontrar modelando mediante diversos métodos matemáticos que puedan establecer relaciones entre capacidades de recolección y la generación de las zonas a recolectar.

Los elementos básicos que se requieren son:

- Un estudio de generación de residuos sólidos, que determine la generación per cápita domiciliaria, así como la generación que se da en otras fuentes municipales.
- Un mapa actualizado y detallado de la ciudad o zona a recolectar
- La localización de las fuentes no domiciliarias de desechos que serán atendidas por el servicio
- Datos de la densidad poblacional.

3.6 Diseño de rutas

Una vez que se ha digitalizado la ruta de recolección así como las paradas que se registraron durante el recorrido con todos sus atributos, se procede a hacer el rediseño.

El software TransCAD permite realizar el diseño de rutas de recolección, encontrando la ruta más corta de una serie de paradas o de recorriendo un conjunto de calles en la menor distancia o menor tiempo a partir de los atributos que se tienen en la red (velocidad, distancia, sentido de las calles, la generación de residuos a recolectar), dependiendo del problema que se esté resolviendo.

Por lo anterior, para realizar el rediseño de las rutas existentes en la Cabecera de Atlacomulco se resolvió el problema de ruta de vehículos, atendiendo una serie de paradas determinadas con un horario de atención delimitado y vehículos de capacidad limitada.

Para el caso de las rutas de recolección de residuos sólidos, lo que se busca mediante el rediseño es reducir el tiempo de recorrido, ya que el objetivo que se persigue es el de reducir el costo en el manejo de los residuos sólidos.

Este tipo de diseños de rutas requiere de la asistencia de los métodos de:

- Solución Heurística
- Solución Determinística

La solución heurística está basada en el conocimiento de la ciudad en todos sus aspectos: urbanístico, de vialidad, comercial, de explotación demográfica, entre otros. También esta solución depende de la experiencia del diseñador.

La solución heurística considera lo siguiente:

- Que las rutas de recolección tengan un mismo horario de inicio todos los días de trabajo.
- Que los vehículos de las mismas características de equipo tengan equilibrio en los tiempos por ruta.
- Una ruta de recolección será servida siempre por un mismo tipo de vehículo
- Los tránsitos de garage a inicio de ruta, de fin de ruta a disposición final y de aquí la nueva ruta, se establecieron por las mismas calles y avenidas.
- En general, una ruta se iniciará lo más próxima del garage de encierro, terminándose lo más cerca posible del sitio de transferencia o disposición final.
- Las calles, avenidas o circuitos importantes de tráfico no serán servidos en horas pico.
- Una ruta en calles con mucha pendiente será trabajada en forma transversal.
- Se evitarán las vueltas a la izquierda en calles de doble sentido.

Es necesario señalar que, para ambas formas de solución, un parámetro muy importante de diseño de las micro-rutas es el del método de recolección que se piensa implantar, para este caso es el del camión recolector.

Ahora bien, cabe aclarar que un mal diseño de las micro-rutas de recolección, trae consigo graves daños al sistema de recolección, entre los cuales, se pueden citar los siguientes: Desperdicios del equipo y personal de la recolección de los residuos; reducción en la cobertura del servicio de recolección; incremento de los costos del servicio de limpia; y por último la proliferación de tiraderos clandestinos a cielo abierto en diferentes puntos de la localidad.

Por todo lo anterior, se deberá poner especial interés en señalar adecuadamente las micro-rutas de recolección de basura para cualquier localidad, si se pretende operar un servicio de recolección eficiente.

3.8 El problema del agente viajero

El Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem TSP, por sus siglas en inglés) es un problema clásico de optimización combinatoria que ha recibido mucha atención en la literatura. El problema básico se formula de la siguiente manera: el viajero parte de una ciudad o punto en específico inicial y el objetivo es visitar n ciudades, pasando por cada una de éstas sólo una vez. El recorrido debe terminar en la ciudad en la cual inicio. Se busca el mínimo costo del

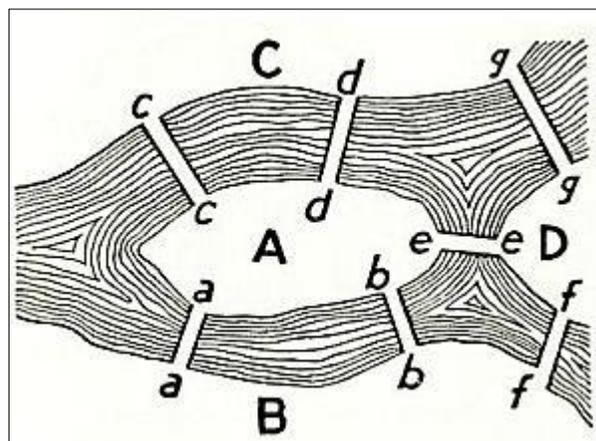
recorrido, ya sea en tiempo, distancia o combustible. Éste es un problema NP-hard por su complejidad computacional (Martí, 2003).

3.9 Los puentes de Königsberg y la Teoría de Grafos

En 1735 Euler expuso el Problema de los Puentes de Königsberg y la solución al mismo. Euler formuló el problema de la siguiente manera (Núñez, 2004):

...en la ciudad de Königsberg, en Prusia, hay una isla A llamada Kneiphof, rodeada por los dos brazos del río Pregel (Figura 3). Hay siete puentes a, b, c, d, e, f y g, que cruzan por los dos brazos del río. La cuestión consiste en determinar si una persona puede realizar un paseo de tal forma que cruce cada uno de estos puentes sólo una vez...

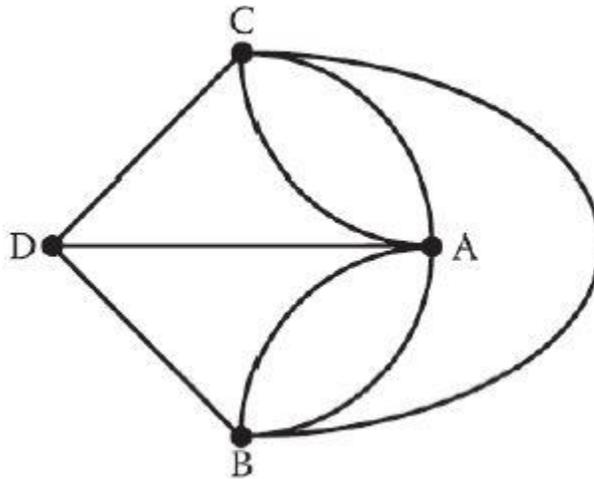
Figura 3. Diagrama de la ciudad de Königsberg por Euler



Fuente: Núñez, 2004

La solución de Euler para el problema de los puentes de Königsberg constituye un claro ejemplo de un proceso de modelización. En primer lugar, Euler reemplazó el mapa de la ciudad por un simple diagrama de puntos (representando con las letras A, B, C y D, las zonas de la ciudad) y arcos entre ellos (que representaban los siete puentes. Así, el arco a une las zonas A y B, la d, la A y la C y así sucesivamente, tal como se observa en la figura 4. Este diagrama constituye lo que posteriormente se conocería como grafo, razón por lo que muchos autores consideran a Euler como el padre de la Teoría de grafos (Núñez, 2004).

Figura 4. Diagrama de puntos hecho por Euler



Fuente: Núñez, 2004

3.10 El problema de rutas de vehículos

La teoría de grafos se ha convertido hoy en día en una herramienta matemática indispensable en campos tan diversos como la investigación de operaciones, la química, la física, la genética, la teoría de redes o la teoría de decisiones, partiendo de la rama de la topología.

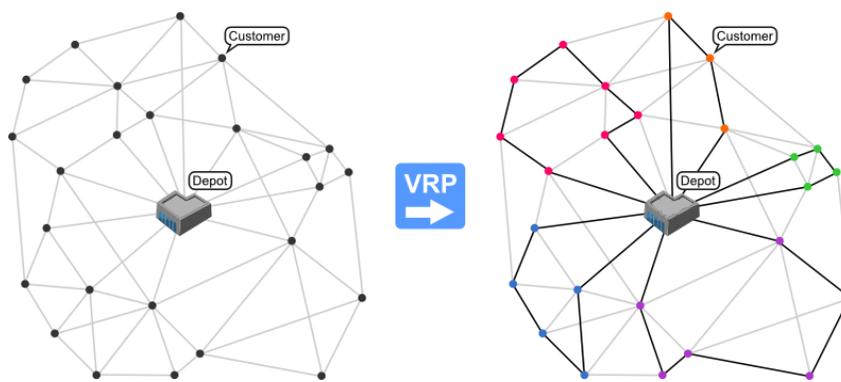
En estos tipos de problemas se describe el modelo clásico así como algunos otros modelos importantes como el de Restricciones de Capacidad y el de Ventanas de Tiempo. También se describen algunos de los principales métodos de solución existentes reportados en la literatura, métodos exactos y técnicas heurísticas y metaheurísticas.

El problema de Rutas de Vehículos (Vehicle Routing Problem VRP, por sus siglas en inglés) fue definido inicialmente por Dantzig y Ramser (1959) cuando describieron una aplicación hacia la distribución de combustible para estaciones de servicio. Ellos propusieron una formulación matemática del problema así como una aproximación algorítmica. Años después, Clarke y Wright desarrollaron un algoritmo llamado voraz (Greedy Algorithm) que mejoraba la aproximación del algoritmo de Dantzig y Ramser (Ruiz, 2004).

La distribución de los bienes se refiere al servicio, en un período de tiempo determinado, de un conjunto de clientes por un conjunto de vehículos, que se encuentran en uno o más depósitos, son operados por un conjunto de tripulaciones (conductores), y llevan a cabo sus movimientos mediante el uso de una red de carreteras adecuada. En particular, la solución de un VRP se utiliza

para la determinación de un conjunto de rutas, cada una realizada por un solo vehículo que empieza y termina en su propio depósito, de manera que satisfaga la demanda de todos los clientes y que los costos de transporte se minimicen. Figura 5. Este problema pertenece a la clase NP completo (Martínez, 2010; Choi y Tcha, 2007); esto significa que el esfuerzo de computación que se ha de realizar para encontrar una solución óptima crece de forma exponencial con el tamaño del problema. Por este motivo se emplean métodos aproximados de manera que se puedan encontrar soluciones suficientemente buenas en un tiempo computacional razonable (Macías, 2008). Este tipo de problema es de los más importantes, y de los más estudiados entre los problemas de optimización combinatoria (Daza, 2009).

Figura 5. Ejemplo de solución de ruta mínima



Fuente: <http://neo.lcc.uma.es/cEA-web/VRP.htm>

Ruiz (2004) describe brevemente al Problema de Rutas de Vehículos como un conjunto de n clientes con una demanda conocida, $d_i, i \in 1, \dots, n$, que tienen que ser atendidos desde un origen central con una flota t de vehículos con una capacidad Q . Normalmente el objetivo es minimizar la distancia recorrida por la flota, pero también es común reducir los costos de la ruta (Macías, 2008).

El modelo del Problema de Rutas de Vehículos se formula de la siguiente manera (Ruíz, 2004):

Parámetros

n =Número de clientes,

d_i = Demanda del cliente i , $i > 0$

C_{ij} = La distancia entre el cliente i y el cliente j

Variables

X_{ij} = 1 Si el vehículo va del cliente i al cliente j , 0 en caso contrario

Donde $i, j \in \{0, \dots, n\}$ siendo 0 el depósito de origen

Función Objetivo minimiza la distancia total recorrida por la flota de vehículos.

$$\text{Min} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n C_{ij} X_{ij}$$

3.10.1 VRP CON APLICACIONES EN RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

El modelo consiste en una estimación de la demanda y en un modelo de recolección que calcula el número de rutas y los tiempos de viaje requeridos.

Cabe mencionar que los procesos de recolección de residuos comienza desde el momento en que los camiones recolectores salen de su punto de estacionamiento, teniendo en cuenta lo antes mencionado de la sectorización realizada, posteriormente se procede a generar las rutas que deberán de seguir los vehículos por estas zonas cuyo punto final es el mismo estacionamiento, también se tiene en consideración el sitio de disposición final.

Las técnicas heurísticas para el VRP, en general, pueden ser clasificadas en categorías según Gaskell (1967) así: constructivas, como el método de los ahorros de Clarke y Wright, con base en el ahorro generado por insertar nuevos clientes en cada vehículo hasta completar una solución final; métodos de agrupar primero, enrutar después, que agrupan los clientes en varios subconjuntos, asignan cada subconjunto a un vehículo.

3.10.2 EL PROBLEMA DE RUTAS DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO

El Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo (Vehicle Routing Problem With Time Windows, VRPTW, por sus siglas en inglés) es un problema de optimización combinatoria

de alta complejidad computacional. Puede ser descrito como el problema de diseñar rutas óptimas desde un depósito hacia un conjunto de clientes con demanda conocida, donde todos los vehículos deben salir y regresar al lugar de origen (Macías, 2008).

Las rutas deben estar diseñadas de tal manera que todos los clientes sean visitados una vez exactamente por un vehículo dentro de un determinado intervalo de tiempo sin violar las restricciones de capacidad.

Sea un grafo $G = (N, A)$ donde $N = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos y $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$ el conjunto de arcos. El nodo 0 representa el origen y $N = \{1, \dots, n\}$ el conjunto de clientes, cada uno con una demanda q_i . Es posible viajar de i a j , incurriendo en un costo C_{ij} en un tiempo de recorrido t_{ij} . Cada vehículo tiene una capacidad limitada Q , y h es el costo de vehículo. Para atender a cada cliente i se requiere un tiempo de servicio s_i , $[a_i, b_i]$ es el intervalo de tiempo para atender al cliente i donde $a_i = \max(a_0 + t_{0i}, s_i)$ y $b_i = \min(b_0 + t_{0i}, s_i)$, (Macías, 2008).

$\min \sum_{j \in N} h x_{0j} + \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} X_{ij}$	→	Minimiza el costo total de enviar las mercancías a sus clientes.
Sujeto a:		
$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1$	$\forall i \in N$ →	Indica que cada cliente va a ser visitado por sólo un vehículo.
$\sum_{i \in N} X_{ij} = 1$	$\forall j \in N$ →	Indican que cada cliente va a ser visitado por sólo un vehículo.
$P_i + S_i + t_{ij} \leq P_j$	$\forall (i, j) \in N$ →	indica que el tiempo inicial en el nodo i , más el tiempo de servicio, más el tiempo de viaje del nodo i al j debe ser menor que el tiempo de servicio inicial en el nodo j .
$a_i \leq P_i \leq b_i$	$\forall i \in N$ →	a_i indica el tiempo de inicio del servicio y b_i el tiempo en el que éste debe terminar.

$y_i + q_j \leq y_i$	$\forall (i, j) \in N$	→	Indica que la capacidad del vehículo no debe ser superada.
$q_i \leq y_i \leq Q$	$\forall i \in N$	→	Indica que la capacidad del vehículo no debe ser superada.
$X_{ij} \in \{0,1\}$	$\forall (i, j) \in N$	→	Toma los valores de 1 si el vehículo va del cliente i al cliente j, 0 en caso contrario.

3.11 TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN DEL PROBLEMA DE RECOLECCIÓN DE RSU

A continuación en la tabla 18 se presentan las características de las variables a utilizar así de cómo se creó la base datos que contienen los atributos principales para la aplicación del modelo.

Se utilizó un programa SIG-T comercial conocido como TransCAD. Para poder modelar el problema de estudio fue necesario representar mediante capas geográficas la información de las vialidades, la ubicación del depósito de los camiones recolectores, tiempos y horarios de servicio, asimismo, las características de los sitios a donde tiene que recoger la basura.

Tabla 18. Atributos de los Insumos para la investigación

Insumo	Tipo de Información	Sistema De Referencia	Formato	Año	Fuente
Red Vial	Espacial de tipo vectorial (líneas)	Proyección: UTM zona 14N Datum: WGS 84	.shp/.dbd	2016	OpenStreetMap / Google Maps
Nodos	Espacial de tipo vectorial (puntual)	Proyección: UTM zona 14N Datum: WGS 84	.shp/.dbd	2016	OpenStreetMap / Google Maps
Sitio de disposición final	Espacial de tipo vectorial (puntual)	Proyección: UTM zona 14N Datum: WGS 84	.shp/.dbd	2016	Servicios Públicos de Atlacomulco
Generación de residuos sólidos	Espacial de tipo vectorial (puntos)	Proyección: UTM zona 14N Datum: WGS 84	.shp/.dbd	2015	INEGI
Camiones recolectores	Dato	—	.Txt	2016	Servicios Públicos de Atlacomulco

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta el proceso por medio del cual se elaboró la representación de la red vial, la ubicación de los sitios de interés dentro de la misma, así como la información referente al cálculo de la demanda (generación de residuos sólidos).

3.11.1 RED VIAL

Las características que se encuentran en la capa geográfica de las vialidades cuentan con algunos atributos los cuales son:

- Identificador numérico
- Longitud
- Dirección de la vía
- Tipo de vía
- Nombre de la vía
- Velocidades asociadas a cada tipo de vía

El sentido de flujo asignado en cada vialidad, se toma como base el sentido topológico; se asigna a la dirección del arco el valor 1 si el sentido de circulación corresponde con la dirección con que se realizó el trazado, el valor -1 cuando el sentido de circulación es inverso al del trazo y 0 si corresponde a un arco con doble sentido de circulación. Ver figura 6.

Cabe mencionar que se verificó la topología de la red previamente, con el fin de que no se tengan duplicidad de información así como la revisión de la conexión de los arcos y nodos. Ver figura 7.

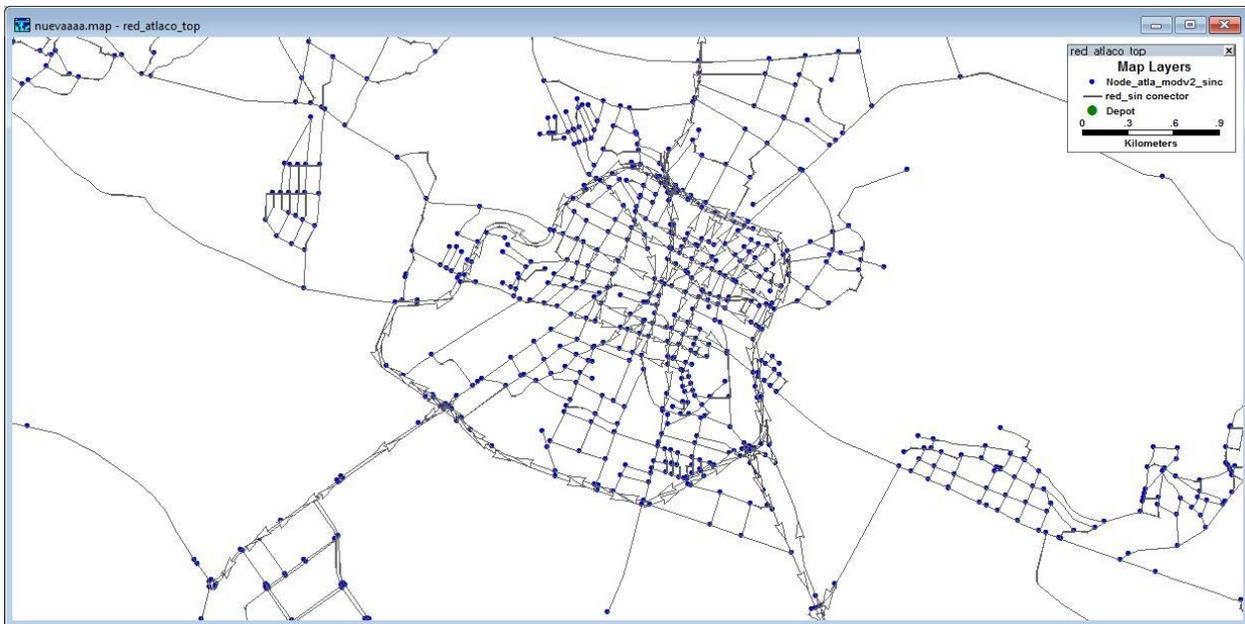
Las velocidades asociadas se estimaron en promedio de la velocidad de circulación en cada arco debido a su naturaleza cambiante en el tiempo. La necesidad de incluir datos reales radica en que de esta forma el modelo permitirá obtener resultados más cercanos a la realidad. Las velocidades también fueron asociadas al tipo de vía. Ver figura 8.

Figura 6. Atributos de la red vial

ID	Length	Dia	OBJECTID	osm_id	name	highway	VELAU_AB	VELAU_BA	TMPAU_AB	TMPAU_BA	TMPCA_AB	TMPCA_BA	R	Velocidad_km_h	Tiempo_h	Distancia_km	Time_min
1	0.07	1	1	60438781		Circuito	60	--	0.07	--	0.13	--	--	60	0.0000112	0.00007	0.00006720
2	0.80	1	2	60438782	Vial Jorge Jiménez Cantú	Circuito	60	--	0.80	--	1.61	--	--	60	0.0000138	0.00080	0.00080291
3	0.16	0	3	60438783		Autopista	90	90	0.11	0.11	0.22	0.22	--	90	0.0000182	0.00016	0.00010899
4	0.93	1	4	60438784		Circuito	60	--	0.93	--	1.86	--	--	60	0.00001549	0.00093	0.00092917
5	0.43	1	5	60438785		Autopista	90	--	0.29	--	0.57	--	--	90	0.0000477	0.00043	0.00028619
6	2.85	0	6	60440944	Atzacmulco - Morelia	Secundaria	70	70	2.44	2.44	4.88	4.88	--	70	0.00004070	0.00285	0.00244179
7	0.61	1	7	60440945	Atzacmulco - Morelia	Secundaria	70	--	0.52	--	1.04	--	--	70	0.0000867	0.00061	0.00052011
8	1.30	1	8	137741264	Avenida Isidro Fabela	Circuito	60	--	1.30	--	2.60	--	--	60	0.00002164	0.00130	0.00129813
9	0.39	1	9	137741265	Atzacmulco - Zapollanejo	Autopista	90	--	0.26	--	0.52	--	--	90	0.00000433	0.00039	0.00025967
11	0.31	1	11	137741287		Autopista	90	--	0.21	--	0.42	--	--	90	0.00000350	0.00031	0.00020980
12	0.29	1	12	153840700	15D	Autopista	90	--	0.19	--	0.38	--	--	90	0.00000320	0.00029	0.00019196
13	0.36	1	13	153840701	Atzacmulco - Zapollanejo	Retorno	10	--	2.19	--	4.37	--	--	10	0.00003643	0.00036	0.00218575
14	0.56	1	14	153840702		Retorno	10	--	3.34	--	6.68	--	--	10	0.00005568	0.00056	0.00340701
15	0.09	0	15	153840703	Libramiento Norte de la Ciudad	Autopista	90	90	0.06	0.06	0.12	0.12	--	90	0.00000102	0.00009	0.00006137
16	0.55	1	16	153840704		Retorno	10	--	3.30	--	6.60	--	--	10	0.00005501	0.00055	0.00330699
17	0.22	1	17	153840705	Libramiento Norte de la Ciudad	Autopista	90	--	0.15	--	0.30	--	--	90	0.00000247	0.00022	0.00014833
18	0.18	1	18	153840706	Libramiento Norte de la Ciudad	Autopista	90	--	0.12	--	0.25	--	--	90	0.00000205	0.00018	0.00012291
20	0.90	1	20	153840708		Retorno	10	--	5.39	--	10.77	--	--	10	0.00008980	0.00090	0.00538814
21	0.43	1	21	153840710	Libramiento Norte de la Ciudad	Autopista	90	--	0.29	--	0.58	--	--	90	0.00000481	0.00043	0.00028881
23	0.42	1	23	153840712		Retorno	10	--	2.50	--	5.01	--	--	10	0.00004172	0.00042	0.00259301
24	0.35	1	24	153840713	Zapollanejo - Atzacmulco	Retorno	10	--	2.10	--	4.21	--	--	10	0.00003506	0.00035	0.00210374
25	0.37	1	25	153840716	Zapollanejo - Atzacmulco	Autopista	90	--	0.25	--	0.50	--	--	90	0.00000416	0.00037	0.00024935
28	3.13	0	28	163483365	Carretera de Cuota Libramiento	Autopista	90	90	2.08	2.08	4.17	4.17	--	90	0.00003474	0.00313	0.00208444
30	0.02	0	30	163483393		Retorno	10	10	0.10	0.10	0.19	0.19	--	10	0.00000160	0.00002	0.00009630
33	0.30	0	33	163483419		Autopista	90	90	0.20	0.20	0.41	0.41	--	90	0.00000538	0.00030	0.00020279
34	0.16	1	34	163483421	Libramiento Norte de la Ciudad	Autopista	90	--	0.10	--	0.21	--	--	90	0.00000175	0.00016	0.00010471
35	0.05	1	35	163483424		Circuito	60	--	0.05	--	0.11	--	--	60	0.00000090	0.00005	0.00005371
36	0.16	1	36	163483426	Vial Jorge Jiménez Cantú	Circuito	60	--	0.16	--	0.31	--	--	60	0.00000262	0.00016	0.00015727
37	0.05	1	37	163483440	Avenida	Avenida	30	--	0.10	--	0.19	--	--	30	0.00000162	0.00005	0.00009733
38	0.07	1	38	163483446		Autopista	90	--	0.43	--	0.87	--	--	90	0.00000733	0.00007	0.00043211

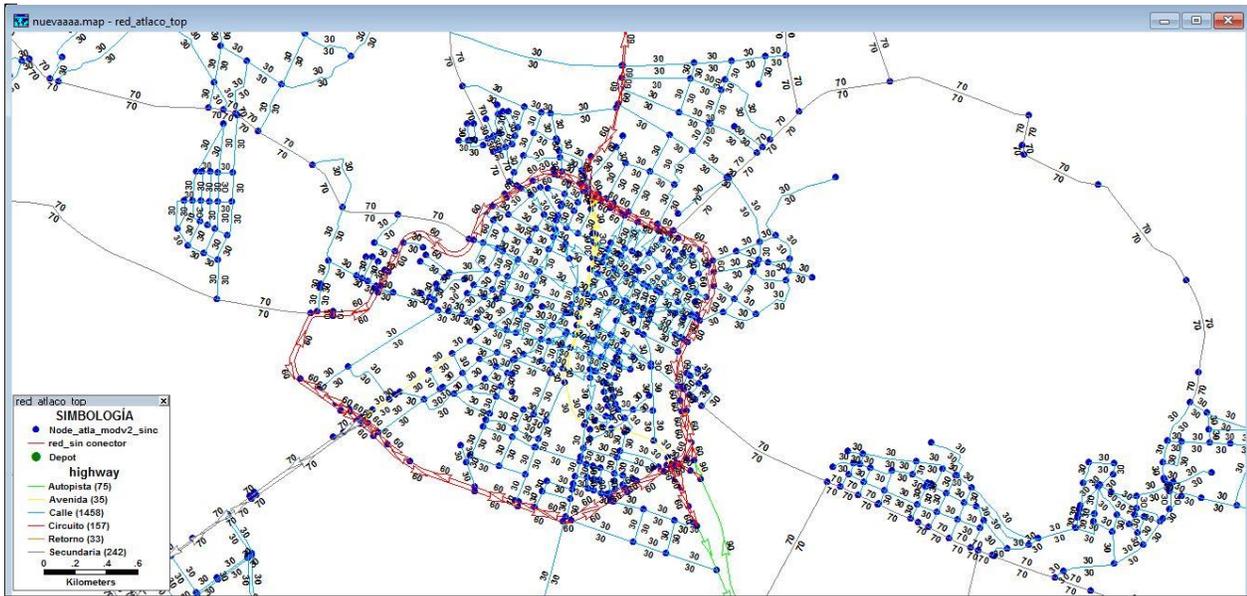
Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Red conectada y con sentidos de circulación



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Tipo de vía con velocidades



Fuente: Elaboración propia

3.11.2 ESTACIONAMIENTO Y SITIO DE TRANSFERENCIA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Esta capa de información contiene datos asociados al estacionamiento de los camiones recolectores así como también al sitio de transferencia de los residuos sólidos, debido a que es un municipio relativamente pequeño no cuenta con un sitio de disposición final, es por ello que optaron por solo tener un sitio de transferencia ubicado en el mismo lugar. Figuras 9 y 10.

Los atributos de la capa son los siguientes:

- ID (Identificador único)
- Latitud y longitud (coordenadas UTM)
- Hora de apertura
- Hora de cierre
- Node_ID (dato asociado a los nodos a conectar con la red)

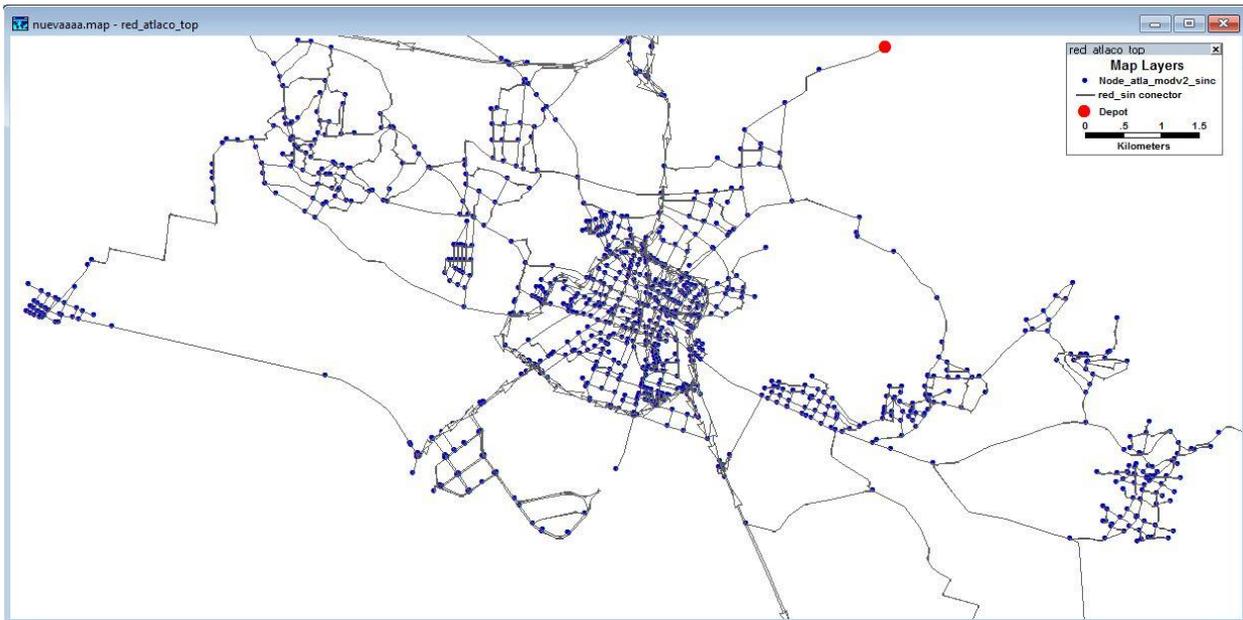
Figura 9. Atributos de la capa deposito

Una ventana de datos de un depósito. La ventana tiene el título 'Dataview1 - Depot'. Muestra una tabla con los siguientes atributos: ID, Longitude, Latitude, [Open Time], [Close Time] y Node_ID. El primer registro de la tabla es: ID: 2520, Longitude: -99843882, Latitude: 19830300, [Open Time]: 700, [Close Time]: 1800, Node_ID: 2520.

ID	Longitude	Latitude	[Open Time]	[Close Time]	Node_ID
2520	-99843882	19830300	700	1800	2520

Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Ubicación del sitio de disposición final y estacionamiento



Fuente: Elaboración propia

3.11.3 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL MUNICIPIO

En esta capa de información se obtuvo el dato de generación de residuos sólidos urbanos, la cual fue posible sacar un estimado en relación a la basura que se genera por habitante.

Considerando que en promedio se genera un total de 770 gramos de basura por persona esta se calculó para las manzanas dentro del municipio, cabe mencionar que no se consideraron todas las manzanas debido a que el municipio está rodeado de un parque industrial, es por ello que no se tomaron en cuenta estas zonas ya que su manejo de residuos sólidos es distinto al de una zona urbana. Figura 11.

Se llevó a cabo una simplificación al agrupar los puntos generadores de demanda (generación de RSU) con características en común tales como el nodo de la red más cercano a la ubicación de la fuente generadora. Figura 12.

Los atributos relevantes asociados son los siguientes

- ID (Identificador único)
- Latitud y longitud (coordenadas UTM)
- Open Time (Hora en la que abre)
- Close Time (Hora en la que cierra)

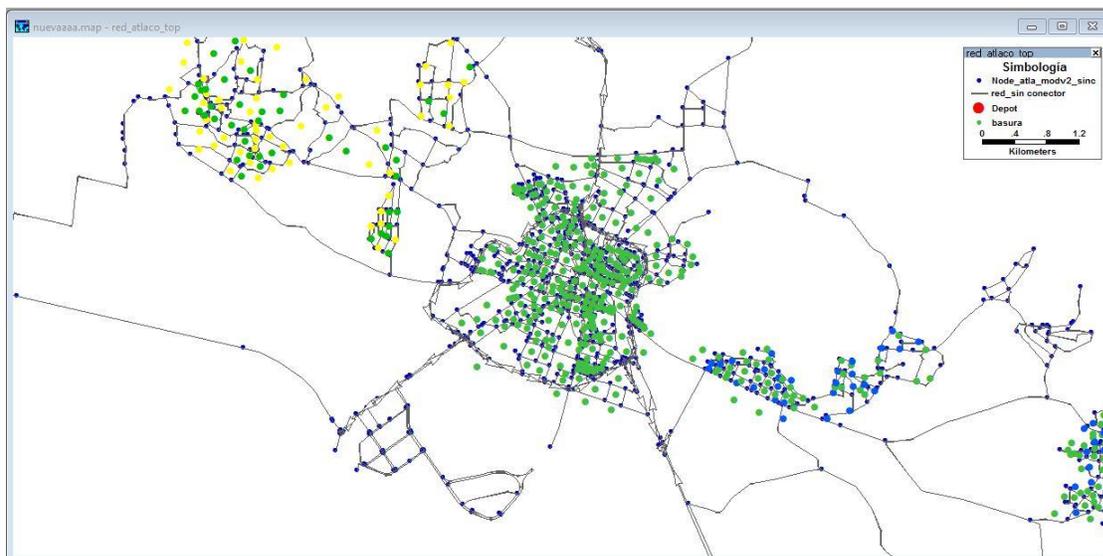
- ID_Cerest (Identificador de nodo de distancia más cercana al depósito)
- Fixed Service Time (Tiempo mínimo, en minutos, que se requiere para atender un punto)
- Time Per Unit (tiempo que se requiere en minutos por cada unidad de demanda)
- Total Time Stop (Tiempo total que se requiere atender en un punto)
- Pickup Demand (La demanda a recolectar en un punto)
- Delevery Demand (La demanda recogida a dejar en el deposito final)

• **Figura 11. Atributos de la demanda a recoger**

ID	Longitudo	Latitude	Centroide	[Open Time]	[Close Time]	ID_Cerest	[Fixed Service Time]	[Time Per Unit]	[Total Time Stop]	[Pickup Demand]	[Delevery Demand]
1786	-99918348	19813847	408	730	1700	1370	8	1	9	55.44	--
1787	-99918282	19815831	485	730	1700	617	8	1	9	14.63	--
1788	-99919998	19818118	429	730	1700	586	8	1	9	73.92	--
1789	-99921853	19820474	438	730	1700	556	8	1	9	5.00	--
1790	-99918386	19818071	417	730	1700	586	8	2	10	140.14	--
1791	-99918928	19819624	418	730	1700	1396	8	1	9	64.68	--
1792	-99918127	19820372	441	730	1700	1401	8	1	9	45.43	--
1793	-99920111	19823378	419	730	1700	589	8	1	9	38.00	--
1795	-99918453	19821027	440	730	1700	1401	8	1	9	11.55	--
1798	-99917872	19821653	433	730	1700	629	8	1	9	60.83	--
1799	-99914688	19811516	450	730	1700	576	8	1	9	0.77	--
1800	-99916561	19814239	486	730	1700	634	8	1	9	27.00	--
1801	-99913948	19812642	453	730	1700	576	8	2	10	133.21	--
1802	-99915449	19815138	484	730	1700	634	8	1	9	16.17	--
1803	-99913388	19810919	449	730	1700	577	8	1	9	4.62	--
1805	-99912381	19812324	444	730	1700	574	8	1	9	20.79	--
1806	-99911466	19810745	447	730	1700	575	8	1	9	43.12	--
1807	-99911232	19811971	445	730	1700	575	8	6	14	385.00	--
1808	-99909804	19811731	446	730	1700	579	8	1	9	78.54	--
1809	-99913575	19813585	457	730	1700	618	8	1	9	63.14	--

Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Ubicación basureros a recoger



Fuente: Elaboración propia

3.12 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE RECOLECCIÓN DE BASURA EN TRANSCAD

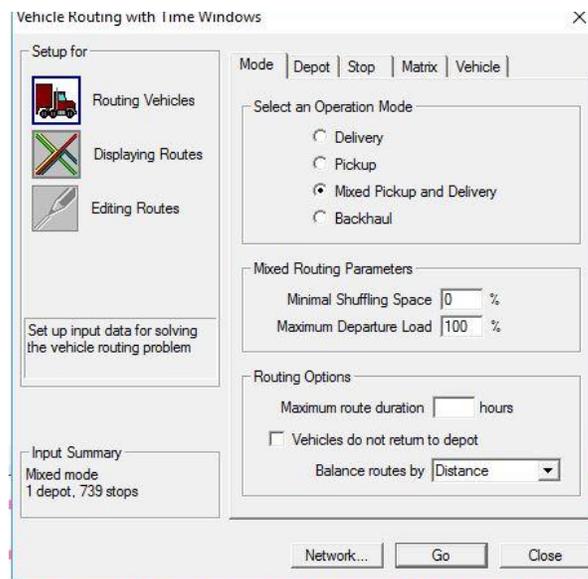
VEHICLE ROUTING WITH TIME WINDOWS

Como se mencionó antes se utilizó en software TransCAD con la ayuda del módulo Routing/Logistics el cual tiene una serie de opciones para resolver el VRP que admite restricciones de tipo de vehículo en paradas y depósitos, y también permite múltiples ventanas de tiempo en cada parada. Las ventanas de tiempo se refieren a las horas más tempranas y últimas en que los vehículos pueden dar servicio a una entrega en particular o punto de recogida.

El VRPTW considera una ventana de tiempo en cada parada y permite al usuario establecer restricciones de duración de la ruta. También puede reducir los movimientos de vehículos no deseados o inseguros, como giros en “U”, al permitir al usuario especificar penalizaciones asociadas con movimientos específicos o de todo el sistema.

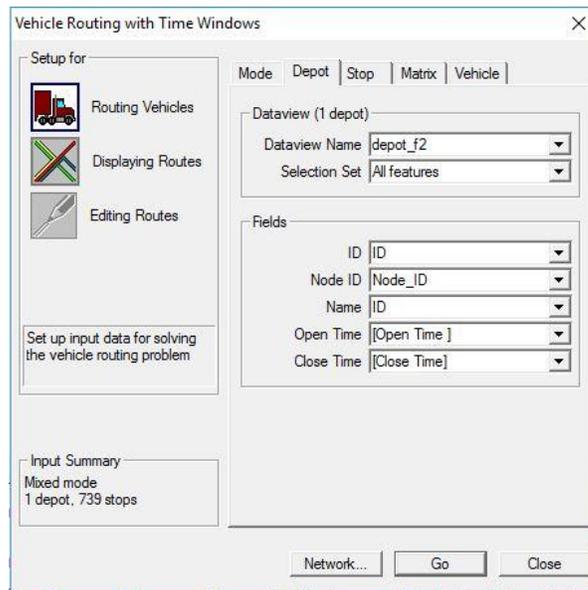
En este caso se selecciona la opción de Mixed Pick Up and Delivery debido a que se plantea que el camión salga de su estacionamiento, realice su recorrido por la red vial que considere adecuada y una vez alcanzado su nivel de capacidad del vehículo este tiene que regresar a sitio disposición final. Figura 13. El balance de las rutas está en función de la distancia que hay en relación a cada punto a recolectar.

Figura 13. Módulo para resolver el VRPTW en TransCAD



Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Pestaña “Depot” VRPTW en TransCAD

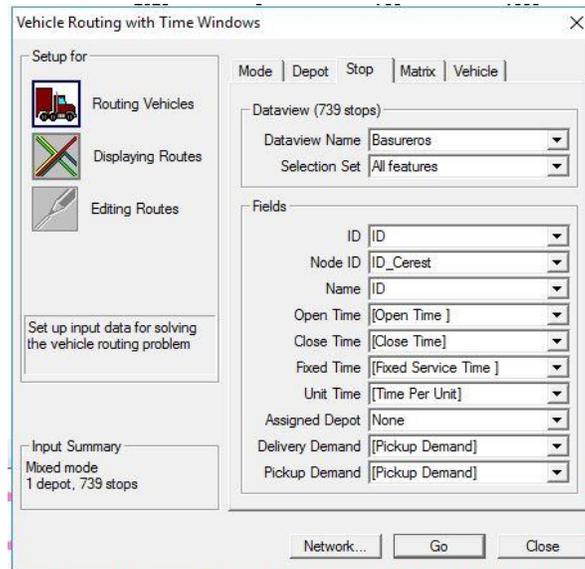


Fuente: Elaboración propia

En la figura 14 se le indica los datos del depósito del cual deben salir y llegar todos los vehículos.

En la figura 15 muestra la pestaña “Stop” en donde se debe indicar cuáles serán los puntos a visitar de cada ruta, así como la hora en que abren y cierran, asimismo, los tiempos de servicio, también la demanda de basura a recoger en cada punto asociado a los nodos de la red vial.

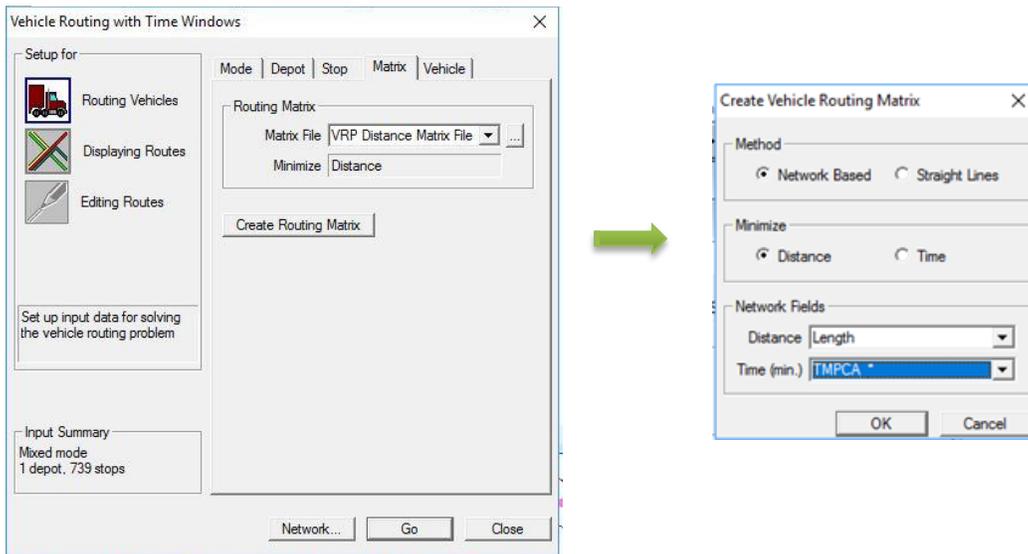
Figura 15. Pestaña “Stop” VRPTW en TransCAD



Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso es la generación de una matriz de ruteo, figura 16. Cuando se crea la matriz en base a la red, TransCAD calcula el tiempo y la distancia entre cada par de Stops y el depósito procesando la ruta más corta entre ellos, es decir considera el punto más cercano a punto inicial que es el depósito.

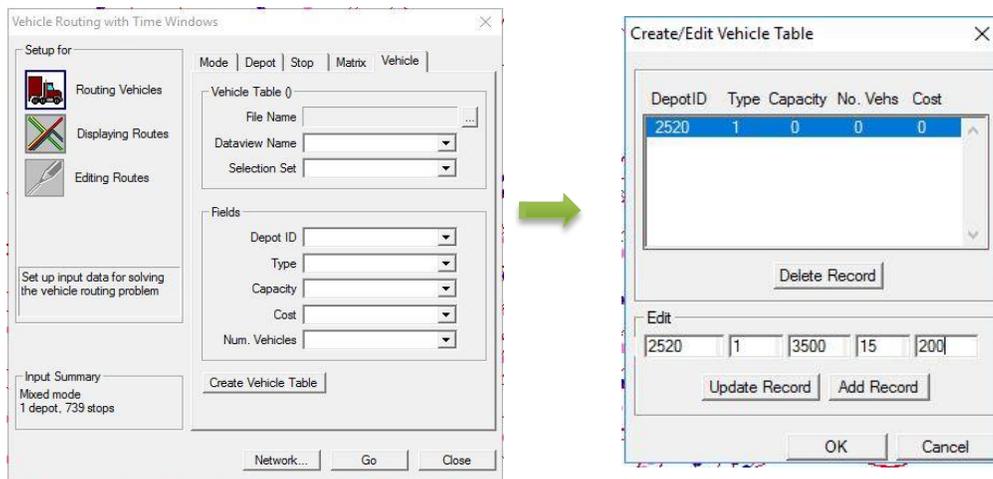
Figura 16. Pestaña “Matrix” VRPTW en TransCAD



Fuente: Elaboración propia

El último paso es generar una tabla de las características de los vehículos donde se asignan el punto origen (estacionamiento de los vehículos de recolección), el tipo de vehículo, la capacidad de carga, el número de vehículos con la que se contará para la recolección de basura y por último el costo de rendimiento del camión. Figura 17.

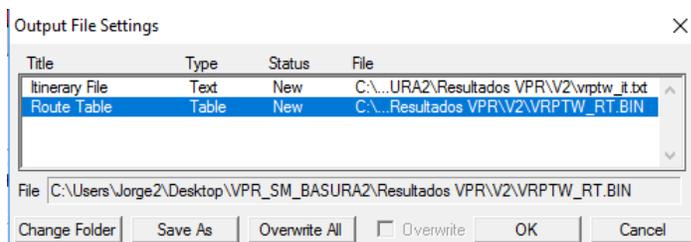
Figura 17. Pestaña “Matrix” VRPTW en TransCAD



Fuente: Elaboración propia

Por último se guarda la ruta en donde se generaran los resultados obtenidos.

Figura 18. Guardado de archivos de salida



Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el análisis e interpretación de las rutas generadas a partir de los criterios y restricciones que se asignaron en el modelo (Vehicle Routing Problem With Time Windows, VRPTW, por sus siglas en inglés). Asimismo se procede a examinar las rutas resultantes para saber las condiciones por las que se desempeñaría cada una de estas a partir de los itinerarios obtenidos.

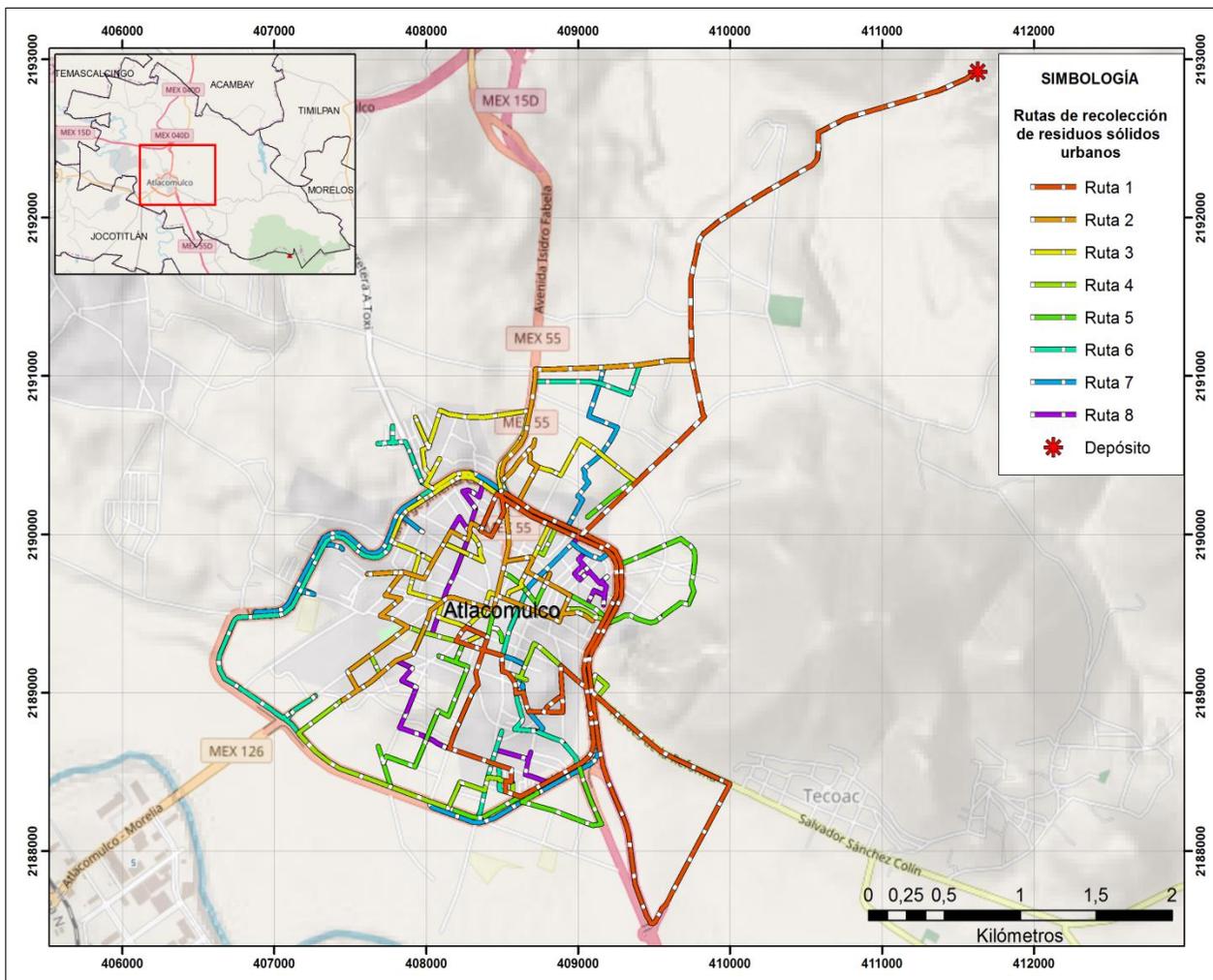
Se presentan los resultados en orden, partiendo de la cabecera municipal seguido de las localidades representativas del municipio.

4.2 ANÁLISIS DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

De las rutas obtenidas del VRP cada una fue realizada por un solo vehículo que comienza y termina en su propio depósito, de tal modo que la recolección de residuos sólidos urbanos sea cumplida con algunas limitaciones operativas. Estos vehículos son operados por un grupo de equipos (conductores), y sus movimientos son realizados por medio de una red vial apropiada.

Utilizando la información contenida en la base de datos y utilizando TransCAD se resolvió el problema de Rutas de Vehículos con ventanas de tiempo obteniendo los siguientes resultados.

Mapa 7. Rutas de recolección de RSU en la cabecera de Atacomulco

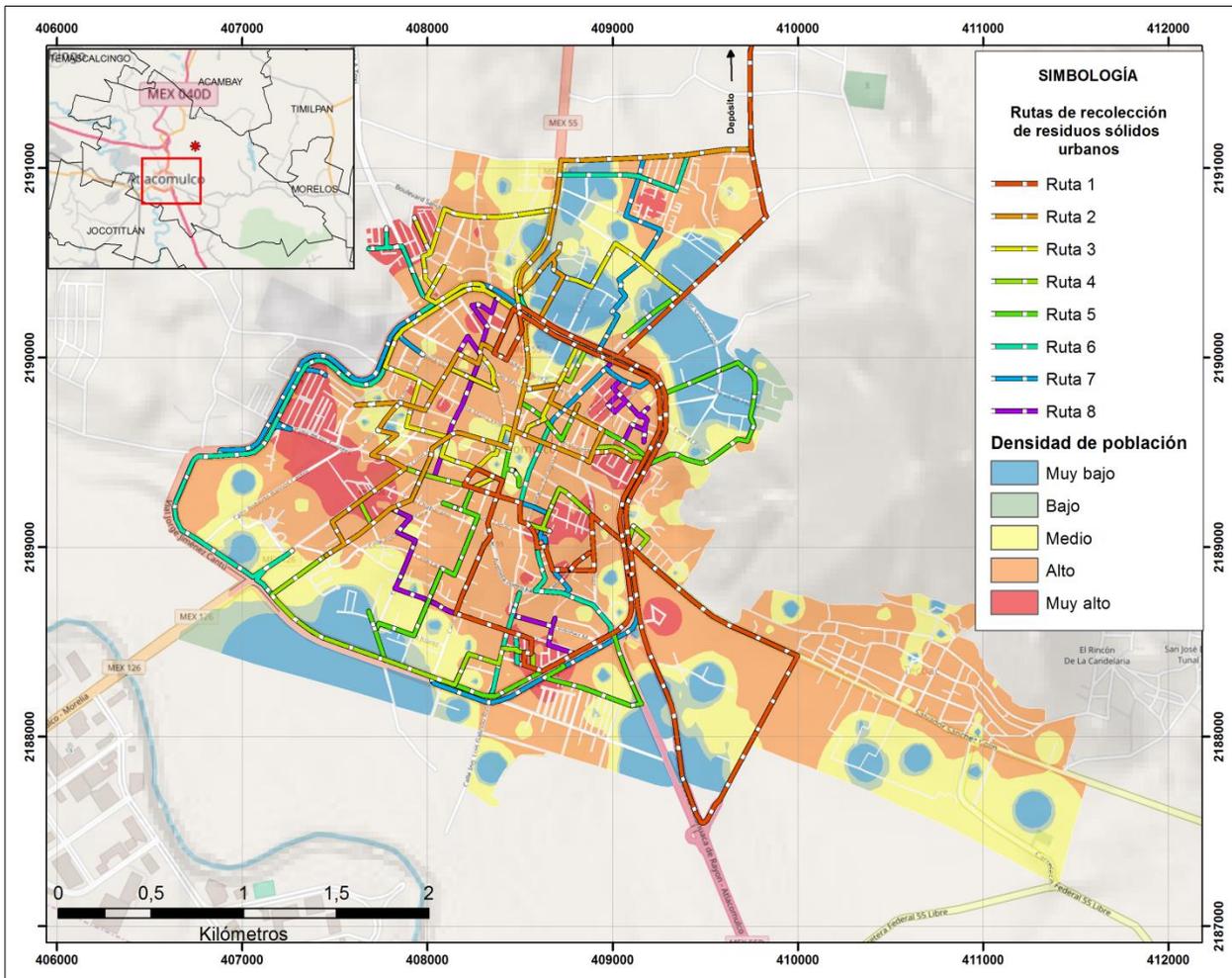


Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 7 se muestra las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en la cabecera de Atacomulco, se generaron 8 en total para dar cobertura a esta zona, se dividieron en sectores para lo que se designaron 159 puntos de control atendiendo a una generación per cápita de basura aproximada de 31 toneladas diarias.

A continuación se presenta cada una de las rutas que se pretende de abasto a la cabecera municipal.

Mapa 8. Rutas de recolección de RSU y densidad de población



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

El mapa 8 representa la densidad de la población en la cabecera de Atlacomulco, donde predomina una densidad que va de Alta a Muy Alta, esta última se presenta en zonas de fraccionamientos principalmente. También se aprecia que en el centro de la cabecera y la zona norte tienen valores que van de Bajo a Medio, teniendo como factor la gran cantidad de comercios, además del mercado local y la terminal de autobuses.

Otro de los puntos a considerar es el de los valores Bajos a Muy Bajos en la zona sur, suroeste en donde se encuentran zonas de plazas y grandes centros comerciales, cabe mencionar que también se debe a que las viviendas están dispersas, este es uno de los problemas a la hora de generar rutas de recolección de residuos sólidos, que en muchos de los casos no se puede atender a la demanda que está dispersa, es por ello que se aconseja implementar el uso de contenedores fijos.

En el mapa 9 la ruta 1 considera que la capacidad del camión recolector sea de 3.5 toneladas, haciendo un total de 9:27 horas de recorrido, claro está, que también toma en cuenta los minutos muertos, se consideraron 19 puntos de control, ver tabla No. 19.

Esta ruta recorre en su inicio la zona norte de la cabecera dando servicio a calles como Luis Montiel Saldívar, Tepetitlán, Manuel del Mazo, Isidro Fabela Norte, también en los puntos de control 4,5,6 recolecta al fraccionamiento Jacaranda seguido de la calle “L” Legislatura, para posteriormente recorrer Nicolás Bravo y Juan de Dios Peza y por ultimo da servicio en la Av. Salvador Sánchez Colín. Cabe mencionar que la ruta contempla el circuito Jorge Jiménez Cantú como vía rápida para un mejor desplazamiento de la unidad y así librar el tránsito de la zona centro de la cabecera municipal

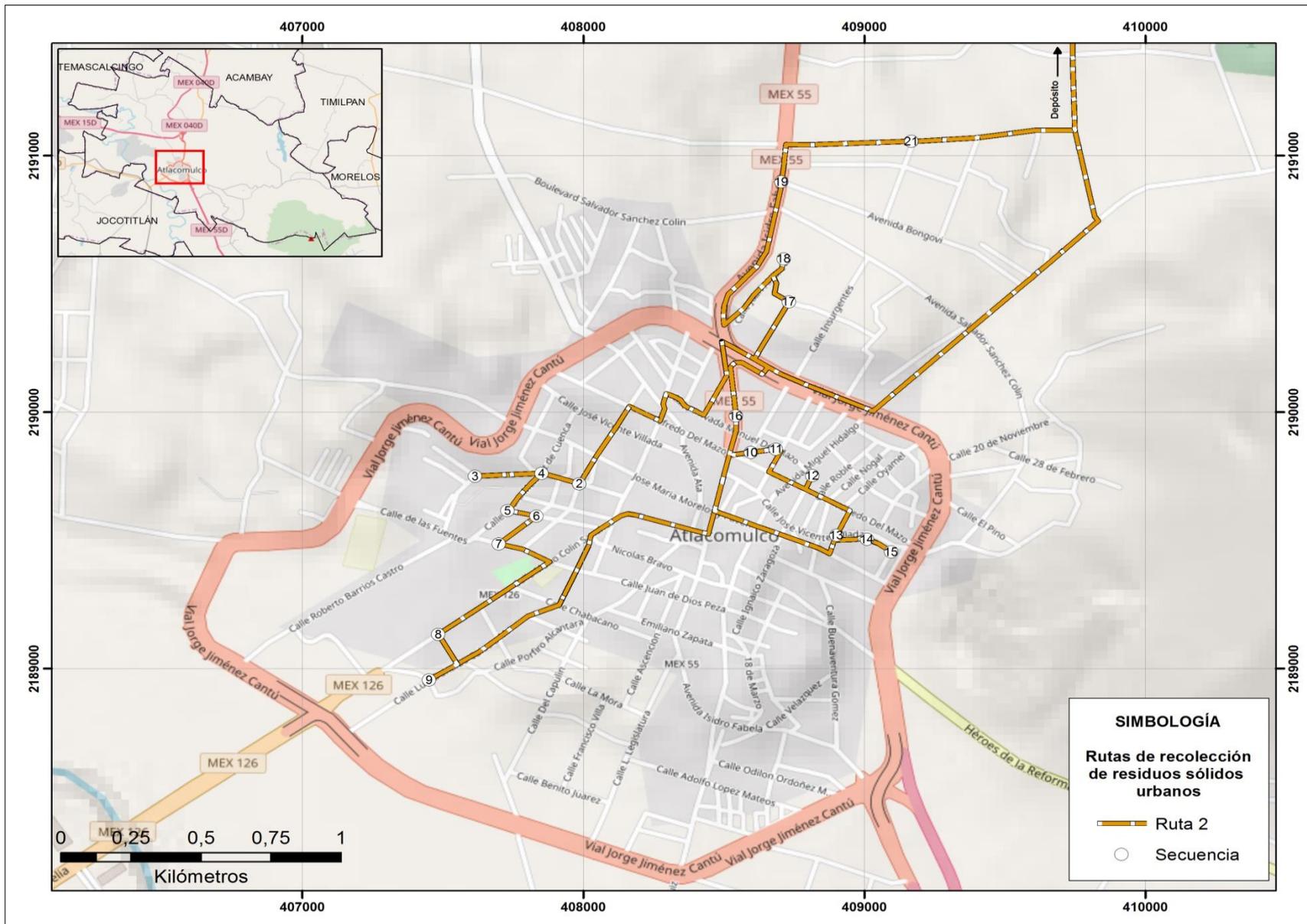
La generación per cápita de residuos sólidos urbanos durante el recorrido es de medio a alto

Tabla 19. Itinerario de la ruta 1 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 1		Tiempo total: 9:27		Capacidad: 3.5 Ton.	
Color: Rojo		Distancia recorrida: 21.58 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección(kg)	Distribución
1	2347	7:30am	7:44am	82	-
2	2357	7:44am	7:57am	86	-
3	1965	7:57am	8:10am	104	-
4	1975	8:10am	8:24am	72	-
5	1970	8:24am	8:46am	139	-
6	1785	8:46am	8:58am	68	-
7	2267	8:58am	9:21am	146	-
8	2268	9:21am	9:51am	223	-
9	2283	9:51am	10:16am	169	-
10	2280	10:16am	10:31am	89	-
11	2287	10:31am	10:44am	74	-
12	2304	10:44am	11:07am	146	-
13	2303	11:07am	11:20am	76	-
14	2321	11:20am	11:34am	69	-
15	2325	11:34am	11:55am	123	-
16	2324	11:55am	12:05pm	53	-
17	2398	12:05pm	12:20pm	69	-
18	1990	12:20pm	4:45pm	128	-
19	2422	4:45pm	4:57pm	68	-
END	2520	5:15pm	-	-	1,984

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 10. Ruta 2 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 10 se muestra la ruta 2 y considera que la capacidad del camión recolector sea de 3.5 toneladas, haciendo un total de 9 horas con 45 minutos de recorrido, tomando en cuenta los minutos muertos. Para esta ruta se tiene un total de 21 puntos de control que se muestran en la tabla 20.

El diseño de esta ruta pretende atender a parte de la zona norte de la cabecera en calles como Justo Monroy Vega, Avenida Isidro Fabela y parte del primer cuadro de la misma en calles como Laura Méndez de Cuenca, Morelos y Alfredo del Mazo, llegando a su primer punto de recolección alrededor de las 7:30 am. Cabe mencionar que el ancho de las calles es muy reducido en la zona centro y que a su vez en los puntos de control 7,8, 14, 15 tienen una alta densidad de población.

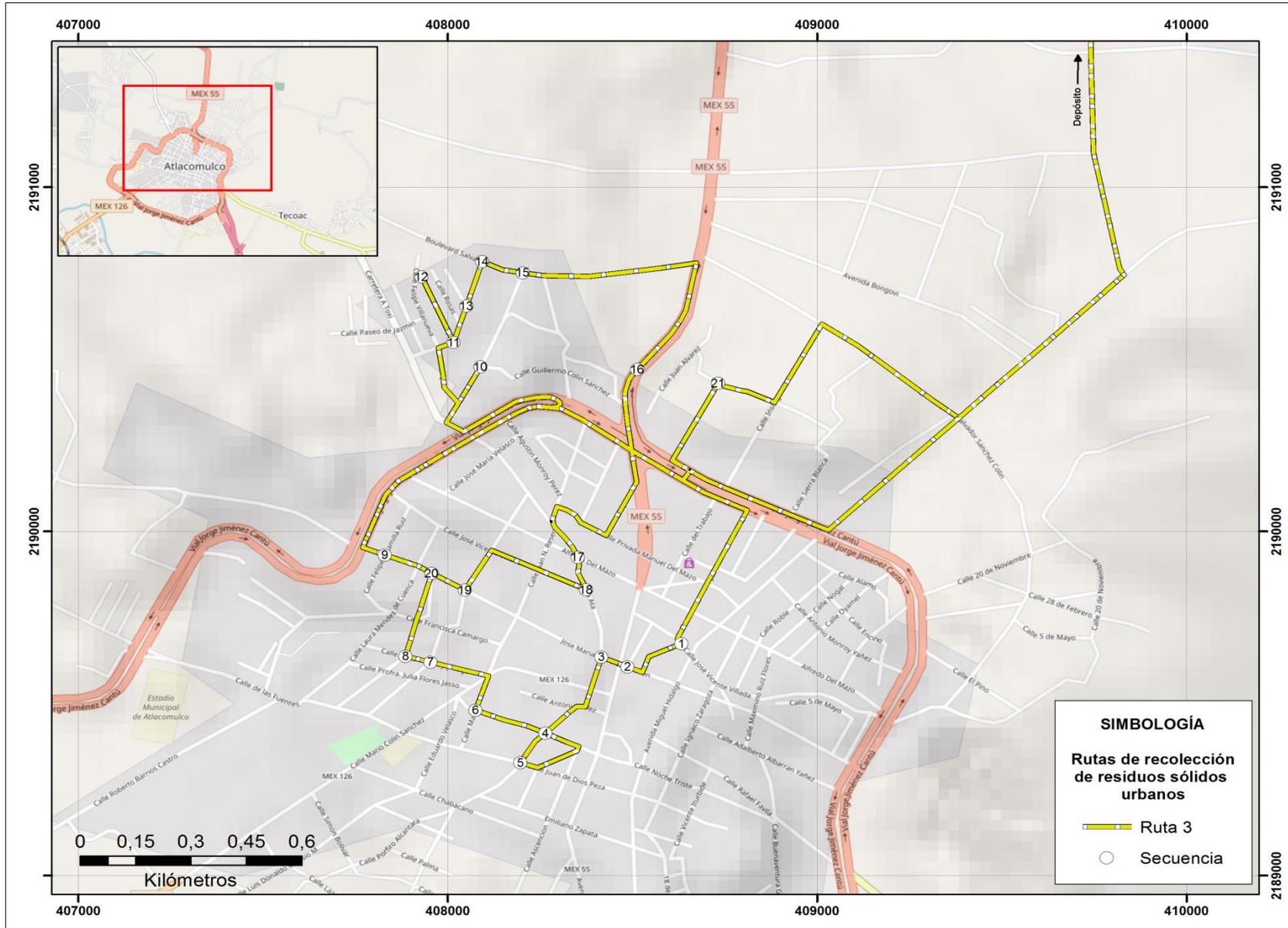
En los puntos de control 17, 18, 19 y 21 que están ubicados en la zona norte de la cabecera también tienen alto grado de demanda, debido a que este último se encuentra un fraccionamiento y a la periferia viviendas dispersas, a excepción de los colindantes con la carretera que conecta con la avenida Isidro Fabela.

Tabla 20. Itinerario de la ruta 2 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 2		Tiempo total: 9:45		Capacidad: 3.5 Ton.	
Color: Naranja		Distancia recorrida: 17.92 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	1923	7:30am	7:54am	160	-
2	1928	7:54am	8:10am	85	-
3	1918	8:10am	8:26am	77	-
4	1921	8:26am	8:42am	77	-
5	1901	8:42am	8:58am	80	-
6	1919	8:58am	9:13am	69	-
7	1885	9:13am	9:37am	162	-
8	1880	9:37am	9:57am	123	-
9	1873	9:57am	1:42pm	186	-
10	2370	1:42pm	2:03pm	123	-
11	2371	2:03pm	2:18pm	69	-
12	2377	2:18pm	2:33pm	69	-
13	2328	2:33pm	2:50pm	92	-
14	2329	2:50pm	3:11pm	131	-
15	2401	3:11pm	3:29pm	100	-
16	2372	3:29pm	3:45pm	77	-
17	2390	3:45pm	4:10pm	169	-
18	2439	4:10pm	4:27pm	92	-
19	2441	4:27pm	4:45pm	100	-
20	2457	4:45pm	4:57pm	38	-
21	2456	4:57pm	5:15pm	100	-
END	2520	5:30pm	-	-	2,179

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 11. Ruta 3 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 11 se muestra la ruta 3 asignando un camión recolector con capacidad de 3.5 toneladas, haciendo un total de 9 horas con 58 minutos de recorrido, Para esta ruta se tiene un total de 21 puntos de control. La recolección inicia a partir de la calles de Hidalgo y Villada en con valores altos de demanda .

En los puntos de control 10 al 15 presenta alta demanda debido al fraccionamiento correspondiente a la colonia “La Garita”.

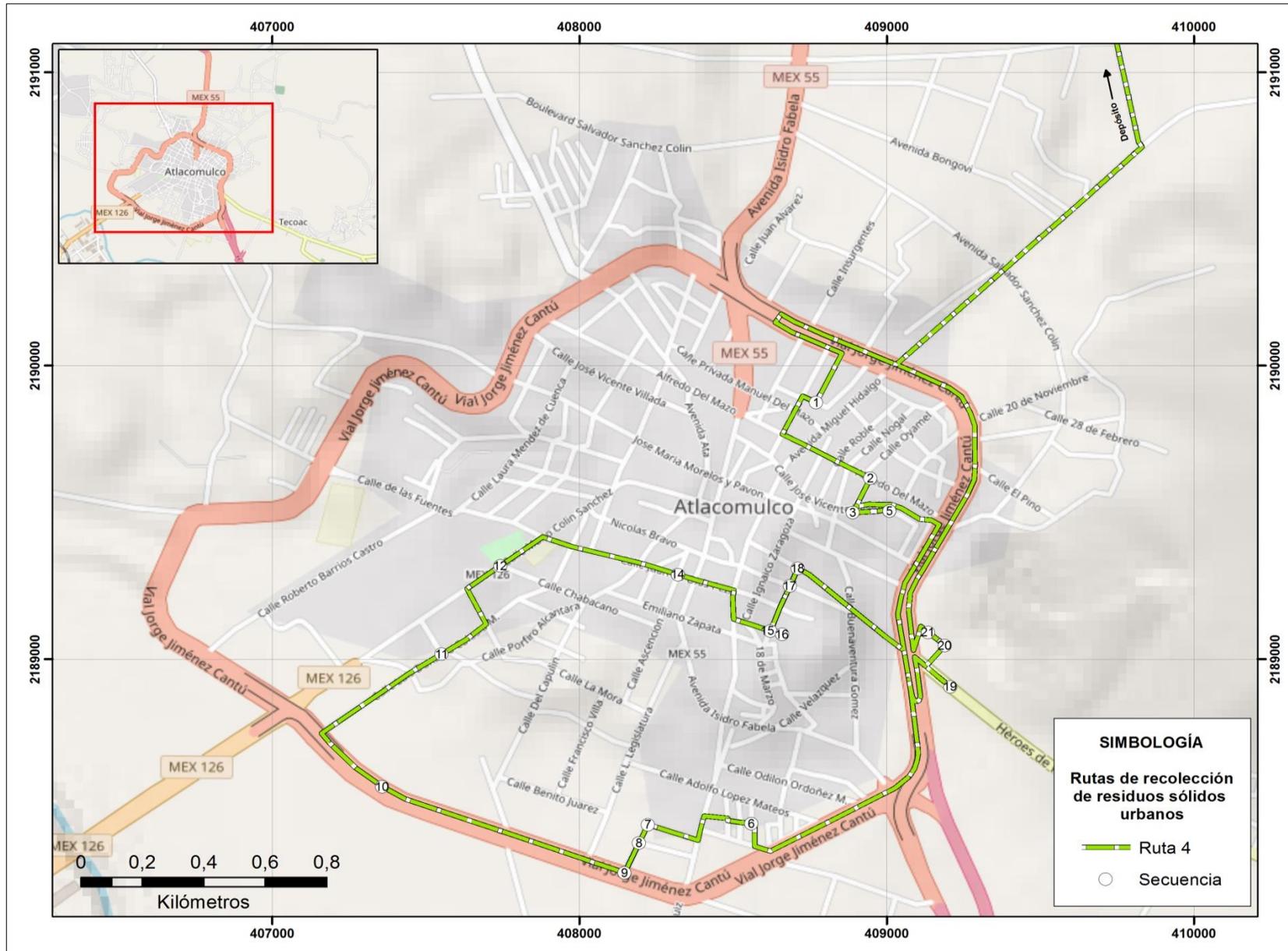
A comparación con las anteriores rutas, esta presenta una recolección alta durante todo su recorrido con 4,296 kilos en total, ver tabla 21.

Tabla 21. Itinerario de la ruta 3 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 3		Tiempo total: 9:58		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Amarillo Limón		Distancia recorrida: 18.65 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2364	7:30am	7:53am	146	-
2	2343	7:53am	8:25am	246	-
3	2341	8:25am	8:48am	146	-
4	2285	8:48am	9:07am	108	-
5	1908	9:07am	9:26am	116	-
6	1909	9:26am	9:45am	108	-
7	1907	9:45am	10:12am	193	-
8	1922	10:12am	10:33am	130	-
9	1925	10:33am	10:50am	85	-
10	1940	10:50am	11:33am	354	-
11	1953	11:33am	12:07pm	262	-
12	1951	12:07pm	12:27pm	116	-
13	1952	12:27pm	1:05pm	300	-
14	1955	1:05pm	1:33pm	200	-
15	2434	1:33pm	2:16pm	350	-
16	2437	2:16pm	2:36pm	120	-
17	2339	2:36pm	3:17pm	331	-
18	2342	3:17pm	3:37pm	123	-
19	1929	3:37pm	4:05pm	200	-
20	1931	4:05pm	4:47pm	331	-
21	2389	4:47pm	5:28pm	331	-
END	2520	5:44pm	-	-	4,296

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 12. Ruta 4 de recolección de RSU en la cabecera de Atacomulco



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 12 la ruta número 4 cuenta con un camión recolector con capacidad de 5 toneladas iniciando su recolección en la zona aledaña a la terminal de autobuses en la calle Gregorio Montiel, y aunque el mercado cuenta con contenedores de basura estos no se dan abasto, teniendo una demanda alta de recolección que corresponden a la colonia Morelos principalmente en la calle Alfredo del Mazo.

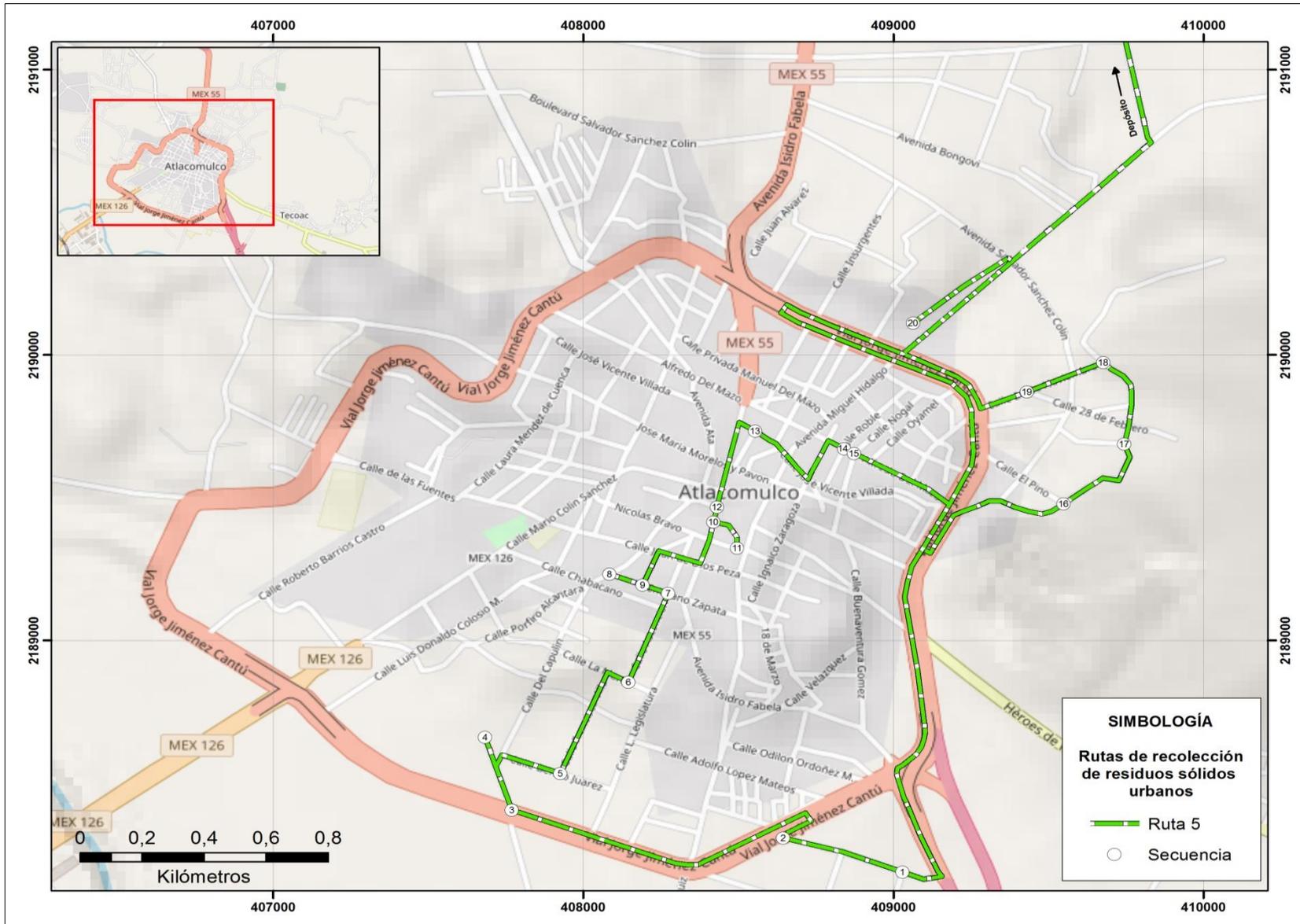
En los puntos de control 6,7 y 8 se encuentra un conjunto residencial aledaño al hospital regional de Atlacomulco en la colonia La Mora, en esta zona se presenta una demanda muy alta. Posteriormente hace su recorrido por la calle Mario Colín Sánchez incorporándose después a la calle Juna de Dios Peza. En los puntos 19, 20 y 21 la demanda es de media a alta, ver tabla 22.

Tabla 22. Itinerario de la ruta 4 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 4		Tiempo total: 9:51		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Verde Guacamaya		Distancia recorrida: 19.02 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2373	7:30am	8:02am	239	-
2	2331	8:02am	8:29am	193	-
3	2327	8:29am	9:00am	231	-
4	2330	9:00am	9:39am	308	-
5	2332	9:39am	10:06am	193	-
6	1966	10:06am	10:34am	300	-
7	1962	10:34am	10:45am	380	-
8	1960	10:45am	11:09am	347	-
9	1958	11:09am	11:35am	180	-
10	1780	11:35am	12:30pm	470	-
11	1876	12:30pm	1:01pm	223	-
12	1883	1:01pm	1:28pm	193	-
13	2279	1:28pm	1:47pm	116	-
14	2281	1:47pm	2:15pm	200	-
15	2301	2:15pm	2:41pm	177	-
16	2302	2:41pm	3:05pm	162	-
17	2314	3:05pm	3:25pm	116	-
18	2311	3:25pm	3:46pm	131	-
19	2399	3:46pm	4:11pm	170	-
20	2396	4:11pm	4:42pm	231	-
21	2393	4:42pm	5:21pm	308	-
END	2520	5:39pm	-	-	4,868

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 13. Ruta 5 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 13 la ruta número 5 tiene un vehículo con capacidad de 5 toneladas, la demanda es alta si se considera que el punto de control 1 y 2 se encuentra el fraccionamiento San Joaquín, posteriormente se incorpora al circuito Jorge Jiménez Cantú para dirigirse al centro de la cabecera, en donde los puntos de control del 7 al 15 cuentan con una demanda media a alta.

Dentro de las principales calles se encuentra la avenida Isidro Fabela que conecta de norte a sur la cabecera.

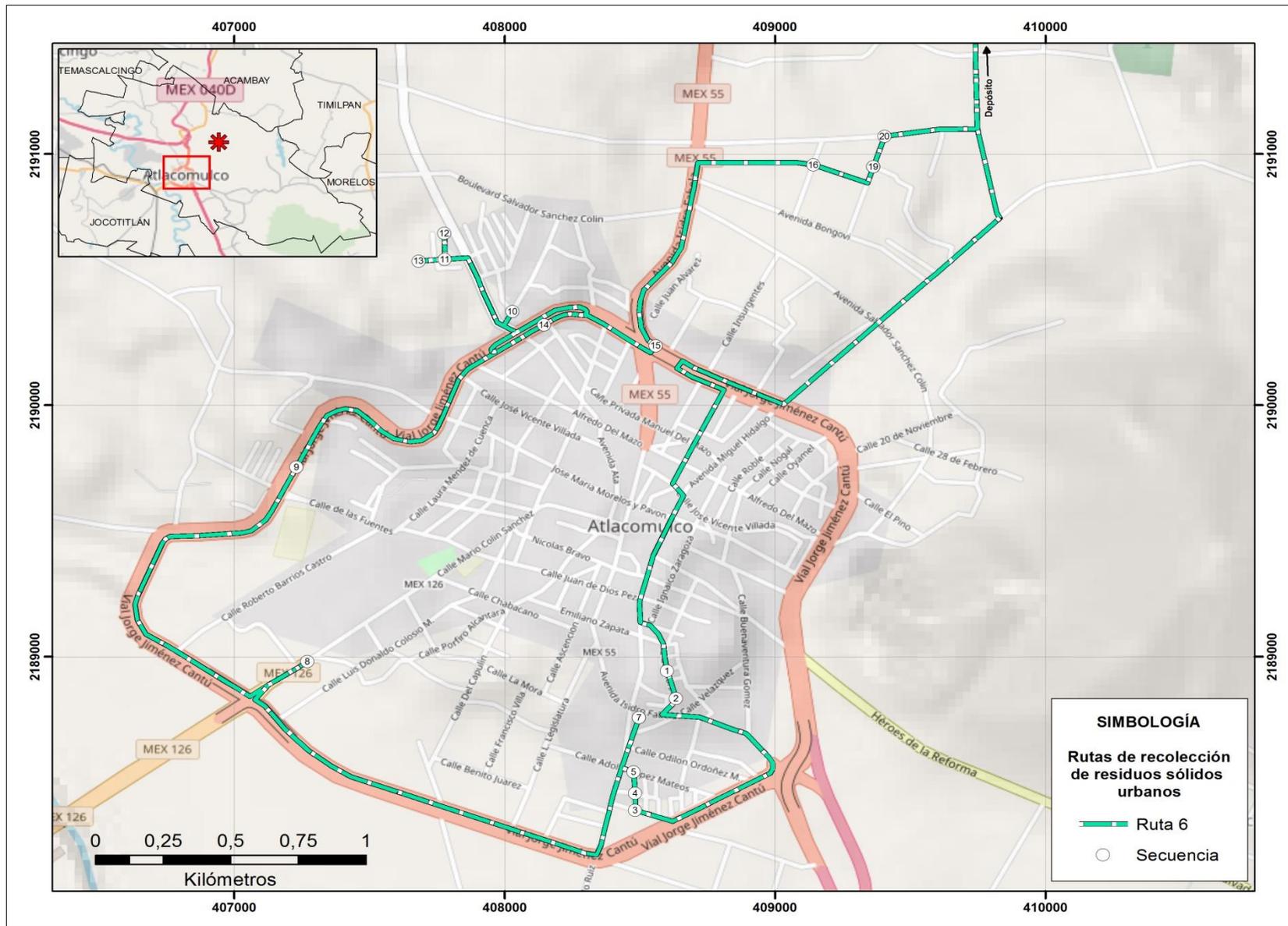
El tiempo total de recorrido es de 9 horas con 29 minutos y estaría llegando al sitio de disposición final alrededor de las 5:13 pm para su posterior depósito recorriendo una distancia de 20.22 km, ver tabla 23.

Tabla 23. Itinerario de la ruta 5 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 5		Tiempo total: 9:29		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Verde Quetzal		Distancia recorrida: 20.22 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	1974	7:30am	8:00am	223	-
2	1972	8:00am	8:33am	246	-
3	1782	8:33am	8:42am	8	-
4	1874	8:42am	8:58am	85	-
5	1784	8:58am	10:13am	670	-
6	1895	10:13am	10:51am	300	-
7	2276	10:51am	11:23am	239	-
8	1905	11:23am	11:40am	85	-
9	2278	11:40am	12:18pm	308	-
10	2286	12:18pm	12:29pm	31	-
11	2288	12:29pm	12:59pm	216	-
12	2294	12:59pm	1:26pm	193	-
13	2346	1:26pm	1:56pm	216	-
14	2366	1:56pm	2:25pm	208	-
15	2376	2:25pm	2:56pm	239	-
16	2423	2:56pm	3:07pm	23	-
17	2427	3:07pm	3:37pm	223	-
18	2426	3:37pm	3:51pm	60	-
19	2419	3:51pm	4:31pm	316	-
20	2420	4:31pm	4:59pm	200	-
END	2520	5:13pm	-	-	4,089

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 14. Ruta 6 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 14 la ruta número 6 cuenta con un camión recolector con capacidad de 5 toneladas haciendo un estimado total de 10 horas, ver tabla 24. Inicia su recolección en la colonia "Los electricistas" para posteriormente atender conjunto residencial aledaño al hospital regional de Atlacomulco en la colonia La Mora, haciendo un recorrido en los puntos de control similares a los de la ruta 4, a diferencia que esa ruta hace un posterior recorrido por todo el circuito Jorge Jiménez Cantú, en donde se encuentra el punto de control 8 correspondiente al fraccionamiento Atlavilla que a pesar de tener demanda alta el método de recolección es por contenedor.

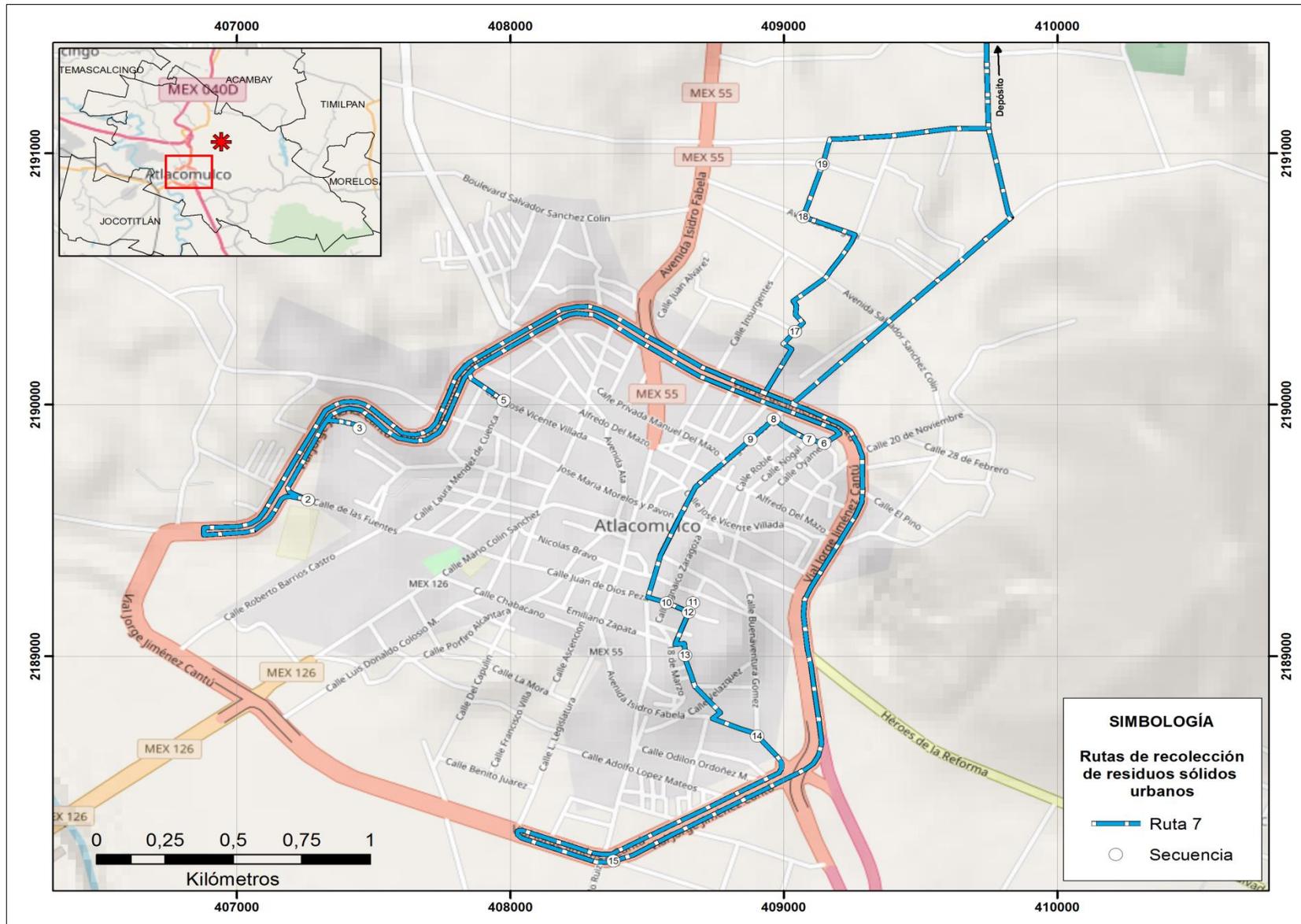
En los puntos 10 al 14 recorre el fraccionamiento ubicado en la colonia El Jazmín que tiene muy alto nivel de demanda. En total esta ruta tiene 20 puntos de control.

Tabla 24. Itinerario de la ruta 6 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 6		Tiempo total: 10:00		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Cian		Distancia recorrida: 21.04 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2274	7:30am	7:42am	38	-
2	2295	7:42am	8:14am	246	-
3	1963	8:14am	8:26am	31	-
4	1964	8:26am	9:04am	300	-
5	1967	9:04am	9:25am	131	-
6	2269	9:25am	9:42am	92	-
7	2270	9:42am	10:17am	270	-
8	1868	10:17am	11:33am	678	-
9	1871	11:33am	12:08pm	270	-
10	1938	12:08pm	12:32pm	162	-
11	1946	12:32pm	12:47pm	69	-
12	1947	12:47pm	1:21pm	262	-
13	1942	1:21pm	1:56pm	270	-
14	1941	1:56pm	2:29pm	246	-
15	2362	2:29pm	3:03pm	262	-
16	2452	3:03pm	3:18pm	69	-
17	2459	3:18pm	3:59pm	330	-
18	2460	3:59pm	4:20pm	139	-
19	2461	4:20pm	4:51pm	230	-
20	2462	4:51pm	5:29pm	300	-
END	2520	5:45pm	-	-	4,395

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 15. Ruta 7 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 15 la ruta 7 cuenta con un camión recolector con capacidad de 5 toneladas haciendo un estimado total de 9 horas con 52 minutos, ver tabla 25. Inicia su recorrido en la zona oeste de la cabecera sobre el circuito Jorge Jiménez Cantú en las periferias de las colonias “La Garita” y Miguel Portilla, ambos con una demanda que va de alta a muy alta, posteriormente se incorpora a la avenida Miguel Hidalgo en la donde la demanda es muy similar a las anteriores.

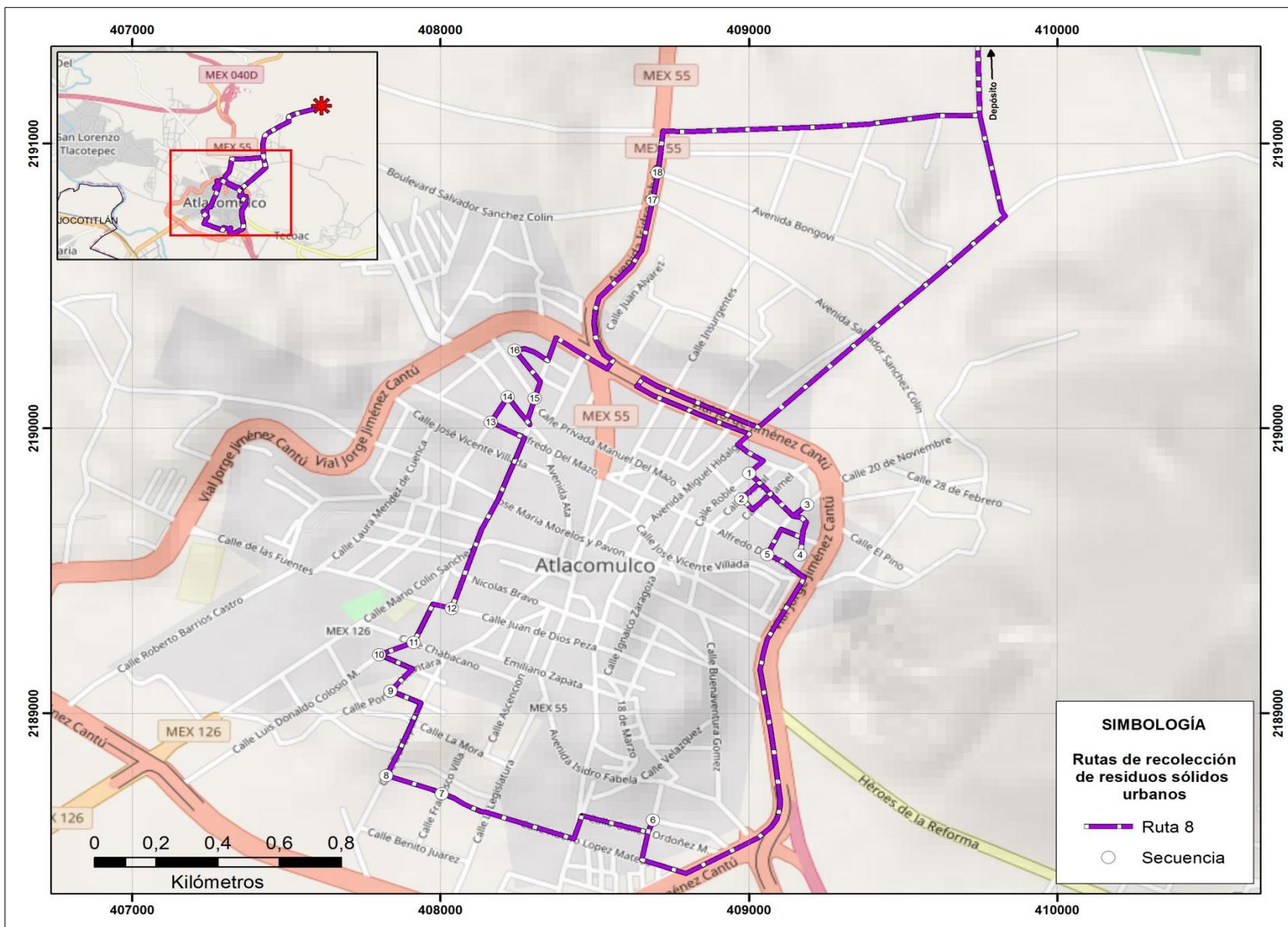
En el punto de control 15 se tiene una muy alta demanda en la colonia San Martín debido al fraccionamiento ubicado a un costado de la Procuraduría de Justicia de Atlacomulco. Por último recolecta en la colonia Bongoni ubicado en la zona norte de la cabecera cuyos puntos de control son: 17, 18 y 19 que van de nivel medio a alto en generación de residuos sólidos.

Tabla 25. Itinerario de la ruta 7 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 7		Tiempo total: 9:52		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Azul		Distancia recorrida: 22.18 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	1870	7:30am	7:50am	116	-
2	1911	7:50am	8:28am	308	-
3	1916	8:28am	8:41am	46	-
4	1934	8:41am	9:01am	123	-
5	1927	9:01am	9:39am	300	-
6	2413	9:39am	10:17am	300	-
7	2415	10:17am	10:45am	200	-
8	2385	10:45am	11:01am	77	-
9	2383	11:01am	11:41am	323	-
10	2289	11:41am	12:10pm	208	-
11	2309	12:10pm	12:27pm	85	-
12	2308	12:27pm	1:05pm	308	-
13	2299	1:05pm	1:41pm	277	-
14	1983	1:41pm	2:12pm	230	-
15	1959	2:12pm	3:26pm	662	-
16	2421	3:26pm	3:44pm	100	-
17	2392	3:44pm	4:24pm	316	-
18	2451	4:24pm	4:43pm	108	-
19	2450	4:43pm	5:22pm	308	-
END	2520	5:37pm	-	-	4,395

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 16. Ruta 8 de recolección de RSU en la cabecera de Atlacomulco



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

El mapa 16 la ruta 8 la abastece un camión de 5 toneladas haciendo un total de 10 horas con 8 minutos teniendo una recolección de 4, 641 kg. de basura, iniciando su recorrido en la colonia Morelos la cual presenta altos niveles de demanda que rebasan los 300kg de generación de residuos, ver tabla 26.

Esta ruta también atiende al a colonia la Mora en las calles Adolfo López Mateos, calle chapulín, para después incorporarse a la calle Manuel Acuña y posteriormente dar abasto a la colonia La Garita.

Por ultimo atiende a la periferia de la colonia Bongoni antes de dirigirse al sitio de disposición final.

Tabla 26. Itinerario de la ruta 8 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 8		Tiempo total: 10:08		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Morado		Distancia recorrida: 20.04 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2386	7:30am	8:06am	285	-
2	2380	8:06am	8:50am	354	-
3	2412	8:50am	9:34am	360	-
4	2403	9:34am	10:05am	231	-
5	2402	10:05am	10:20am	69	-
6	1979	10:20am	11:01am	331	-
7	1893	11:01am	11:23am	139	-
8	1783	11:23am	12:05pm	339	-
9	1890	12:05pm	12:22pm	92	-
10	1897	12:22pm	12:45pm	154	-
11	1900	12:45pm	1:30pm	362	-
12	1904	1:30pm	2:13pm	354	-
13	2337	2:13pm	2:50pm	293	-
14	1936	2:50pm	3:17pm	185	-
15	2352	3:17pm	3:29pm	38	-
16	2356	3:29pm	4:13pm	362	-
17	2445	4:13pm	4:56pm	354	-
18	2444	4:56pm	5:38pm	339	-
END	2520	5:49pm	-	-	4,641

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

- En el mapa 17 la ruta 9 cuenta con un camión recolector con capacidad de 10 toneladas haciendo un tiempo de recorrido total de 9 horas con 22 minutos. La ruta cuenta con 24 puntos de control, cabe mencionar que la frecuencia de recolección es distinta a como se maneja en la cabecera municipal.

Siguiendo el orden de localidades recorridas están: San José del Tunal, el rincón de la Candelaria, San Pedro del Rosal y Tecuac, ubicadas al Este de la cabecera de Atlacomulco haciendo un recorrido aproximado de 30.75 km, ver tabla 27.

Para llegar a la localidad de San Pedro Rosal toma la avenida Luis Donaldo Colosio para incorporarse al centro

- En la ruta 10 la capacidad de recolección del camión es de 5 toneladas al igual que la ruta 9 también recorre las mismas localidades haciendo un tiempo aproximado de 10 horas con 6 minutos, teniendo un total de 14 puntos de control.

La ruta inicia su recolección en El rincón de la Candelaria para después desplazarse a la localidad de San Pedro del Rosal atendiendo principalmente a la calle Benito Juárez. En los puntos de control 4,5,6 y 7 se tiene una acumulación importante de basura, a diferencia de la ruta 9 el retorno a la localidad Tecuac lo hace por la avenida Salvador Sánchez Colín, al llegar a Tecuac la demanda también es alta.

El total de distancia recorrida es de 28.263 km, ver tabla 28.

- Para ambas rutas el regreso al sitio de disposición final lo hace por el circuito Jorge Jiménez Cantú

Tabla 27. Itinerario de la ruta 9 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 9		Tiempo total: 9:22		Capacidad: 10 Ton.	
Color: Púrpura		Distancia Recorrida: 30.75 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2514	7:30am	7:51am	131	-
2	2515	7:51am	8:19am	188	-
3	2506	8:19am	8:46am	185	-
4	2503	8:46am	9:18am	226	-
5	2105	9:18am	9:49am	203	-
6	2109	9:49am	10:07am	108	-
7	2127	10:07am	10:28am	123	-
8	2169	10:28am	10:46am	85	-
9	2173	10:46am	11:07am	131	-
10	2174	11:07am	11:34am	153	-
11	2128	11:34am	11:57am	146	-
12	2177	11:57am	12:11pm	62	-
13	2176	12:11pm	12:31pm	123	-
14	2116	12:31pm	12:48pm	92	-
15	2122	12:48pm	1:18pm	216	-
16	2106	1:18pm	1:32pm	62	-
17	2119	1:32pm	2:05pm	226	-
18	2102	2:05pm	2:20pm	69	-
19	2022	2:20pm	2:39pm	111	-
20	2037	2:39pm	3:08pm	208	-
21	2014	3:08pm	3:41pm	215	-
22	2012	3:41pm	3:51pm	15	-
23	2000	3:51pm	4:26pm	241	-
24	1998	4:26pm	4:52pm	137	-
END	2520	5:12pm	-	-	3,456

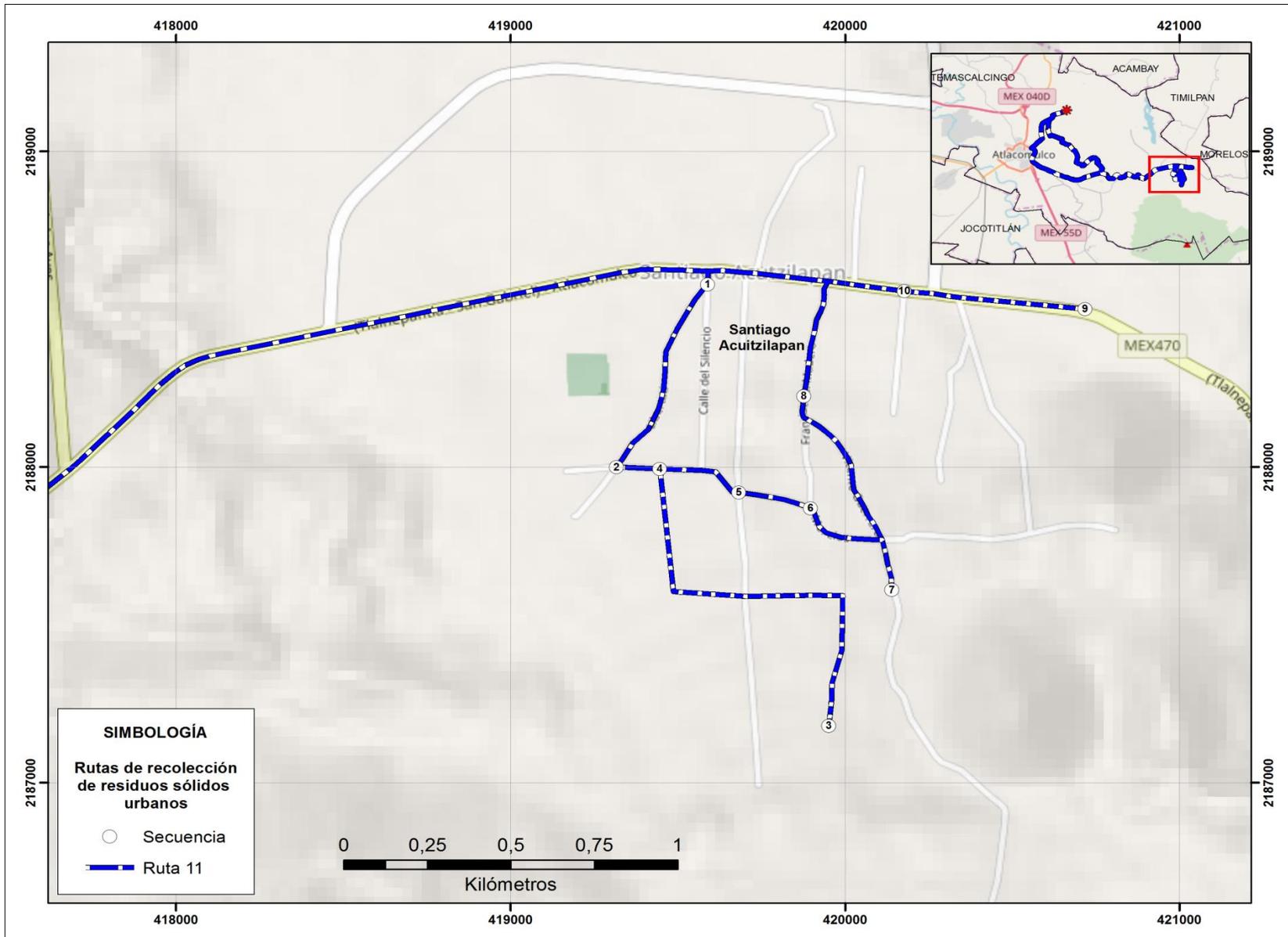
Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Tabla 28. Itinerario de la ruta 10 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 10		Tiempo total: 10:06		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Rojo fuego		Distancia Recorrida: 28.26 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2501	7:30am	8:13am	354	-
2	2114	8:13am	8:53am	316	-
3	2131	8:53am	9:29am	277	-
4	2138	9:29am	10:18am	416	-
5	2175	10:18am	11:13am	470	-
6	2186	11:13am	11:51am	300	-
7	2135	11:51am	12:29pm	300	-
8	2023	12:29pm	1:27pm	493	-
9	2019	1:27pm	1:38pm	31	-
10	2020	1:38pm	2:31pm	454	-
11	2031	2:31pm	3:24pm	447	-
12	2033	3:24pm	4:12pm	400	-
13	2007	4:12pm	4:54pm	347	-
14	1993	4:54pm	5:36pm	339	-
END	2520	5:56pm	-	-	4,944

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 18. Ruta 11 de recolección de RSU en Santiago Acuitzilapan



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 18 se muestra la ruta 11 que da servicio a la localidad de Santiago Acuitzilapan utilizando un camión con capacidad de 3.5 toneladas y hace un tiempo aproximado de 9 horas con 28 minutos, recorriendo una distancia de 41 km.

La distribución de las viviendas en la localidad está concentrada y no tiene demasiada dispersión de casas a comparación de otras localidades es por ello que las rutas se basan principalmente en 4 calles; Libertad, Morelos, Francisco I. Madero y La cruz.

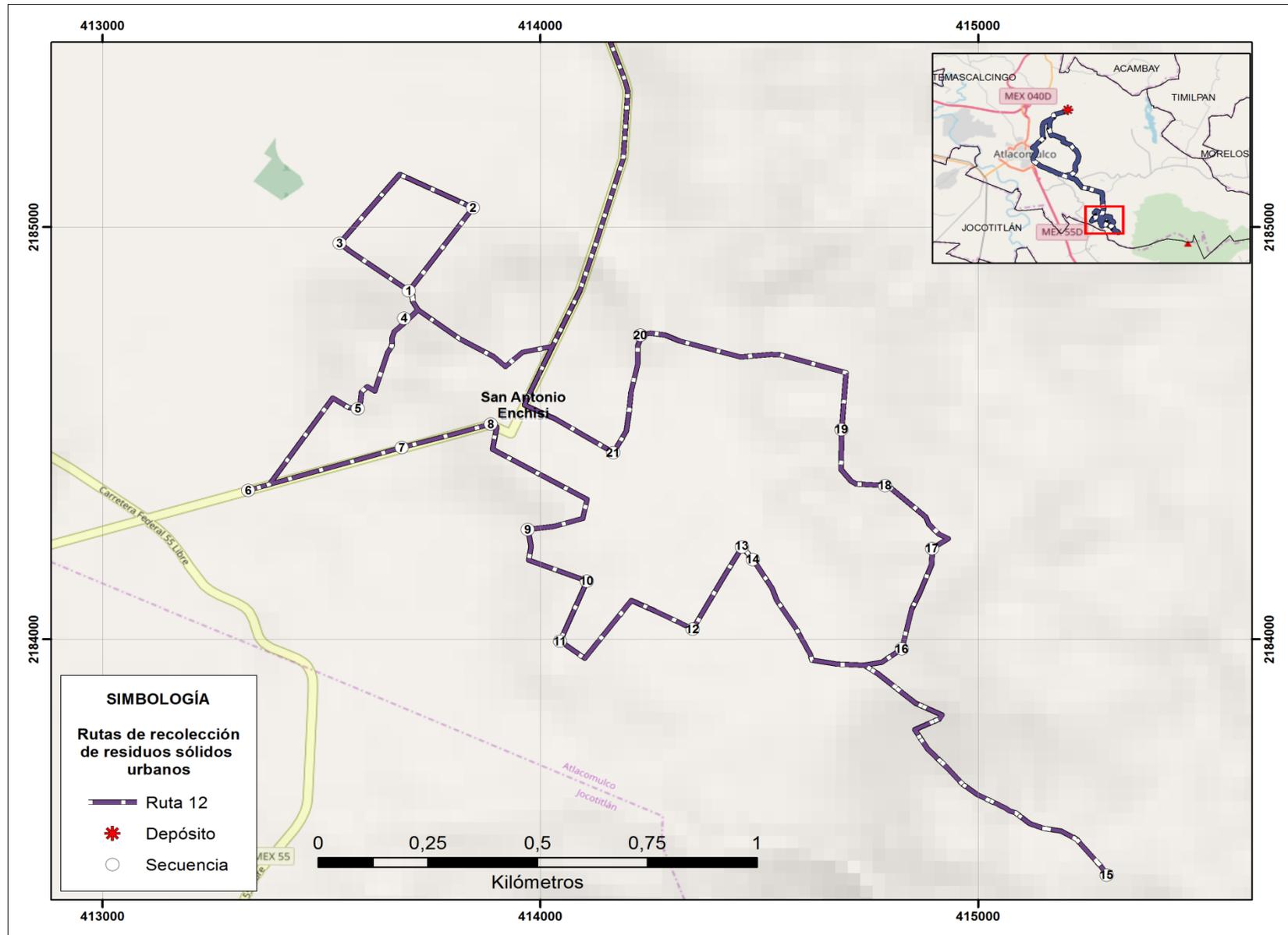
Como se mencionó anteriormente la demanda es Alta a pesar lo pequeña que es la localidad, una muestra es que entre los puntos de control 3 y 4 en la calle La Cruz hay una alta generación de residuos sólidos, ver tabla 29.

Tabla 29. Itinerario de la ruta 11 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 11		Tiempo total: 9:28		Capacidad: 3.5 Ton.	
Color: Azul Zafiro		Distancia Recorrida: 41 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2229	7:30am	7:49am	108	-
2	2213	7:49am	8:11am	139	-
3	2249	8:11am	12:56pm	1386	-
4	2214	12:56pm	1:37pm	331	-
5	2230	1:37pm	2:08pm	231	-
6	2234	2:08pm	2:39pm	231	-
7	2211	2:39pm	3:10pm	231	-
8	2241	3:10pm	3:47pm	285	-
9	2262	3:47pm	4:18pm	231	-
10	2247	4:18pm	4:58pm	323	-
END	2520	5:25pm	-	-	3,496

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 19. Ruta 12 de recolección de RSU en San Antonio Enchisi



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 19 representa la ruta de recolección 12 que atiende a la población de San Antoni Enchisi con un camión de 3.5 toneladas haciendo un tiempo aproximado de 9 horas con 28 minutos, recorriendo una distancia de 34.389 km, ver tabla 30.

La localidad se encuentra localizada en el Sur-Este de Atlacomulco y colinda con el municipio de Jocotitlán. La viviendas se encuentran aglomeradas en los puntos de referencia del 1 al 8 teniendo valores altos de generación de basura, sin embargo los puntos restantes se encuentran dispersos, pero cabe mencionar que la ruta da atención a todas esas zonas.

Tabla 30. Itinerario de la ruta 12 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 12		Tiempo total: 10:02		Capacidad:3500 Ton.	
Color: Mora		Distancia Recorrida: 34.38 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2058	7:30am	7:46am	77	-
2	2101	7:46am	8:22am	285	-
3	2053	8:22am	8:43am	123	-
4	2070	8:43am	8:55am	46	-
5	2049	8:55am	9:19am	162	-
6	2045	9:19am	9:49am	216	-
7	2048	9:49am	10:26am	293	-
8	2062	10:26am	10:46am	123	-
9	2063	10:46am	11:44am	500	-
10	2064	11:44am	12:29pm	370	-
11	2043	12:29pm	1:10pm	323	-
12	2083	1:10pm	1:56pm	385	-
13	2096	1:56pm	2:07pm	31	-
14	2093	2:07pm	2:50pm	347	-
15	2158	2:50pm	3:11pm	130	-
16	2088	3:11pm	3:23pm	38	-
17	2089	3:23pm	3:34pm	31	-
18	2099	3:34pm	4:05pm	231	-
19	2098	4:05pm	4:30pm	170	-
20	2095	4:30pm	4:57pm	185	-
21	2092	4:57pm	5:31pm	270	-
END	2520	5:52pm	-	-	4,336

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 20 representa el recorrido del camión recolector de la ruta 13 que tiene una capacidad de almacenaje de 5 toneladas cumpliendo con las expectativas de generación de residuos en la localidad de San Lorenzo Tlacotepec con un total aproximado de 4.08 Ton, ver tabla 31.

Los primeros 4 puntos de control la generación de residuos es media, además de que las viviendas están dispersas. Después la recolección la realiza propiamente en la localidad de San Lorenzo Tlacotepec abarcando la zona centro y sus periferias. La generación de basura en estas zonas es homogénea con niveles que van de medios a altos, cabe mencionar que en esta localidad hay presencia de viveros e invernaderos ubicados en la Ribera del rio Lerma.

Tabla 31 Itinerario de la ruta 13 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 13		Tiempo total: 10:01		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Verde oscuro		Distancia recorrida: 31.77 km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2487	7:30am	7:49am	108	-
2	2490	7:49am	8:32am	354	-
3	2484	8:32am	8:43am	23	-
4	2482	8:43am	8:52am	15	-
5	1857	8:52am	9:18am	177	-
6	1852	9:18am	9:42am	162	-
7	1814	9:42am	10:09am	193	-
8	1805	10:09am	10:38am	208	-
9	1799	10:38am	10:47am	8	-
10	1787	10:47am	11:09am	146	-
11	1789	11:09am	11:22am	50	-
12	1823	11:22am	11:37am	69	-
13	1844	11:37am	12:01pm	154	-
14	1849	12:01pm	12:35pm	262	-
15	1848	12:35pm	1:18pm	347	-
16	1956	1:18pm	1:42pm	162	-
17	1839	1:42pm	1:58pm	85	-
18	1841	1:58pm	2:22pm	162	-
19	1828	2:22pm	2:57pm	262	-
20	1819	2:57pm	3:26pm	216	-
21	1802	3:26pm	3:50pm	162	-
22	1800	3:50pm	4:25pm	270	-
23	1834	4:25pm	4:45pm	116	-
24	1856	4:45pm	5:31pm	377	-
END	2520	5:47pm	-	-	4,088

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

El mapa 21 representa la ruta 14 que da servicio a la localidad de Manto del Río ubicada al noreste de la cabecera municipal y colinda con San Lorenzo Tlacotepec, esta ruta la atiende un camión recolector con capacidad de 5 toneladas, haciendo tiempo aproximado de 9 horas con 45 minutos con un distancia total recorrida de 31.77 km como se muestra en la tabla 32.

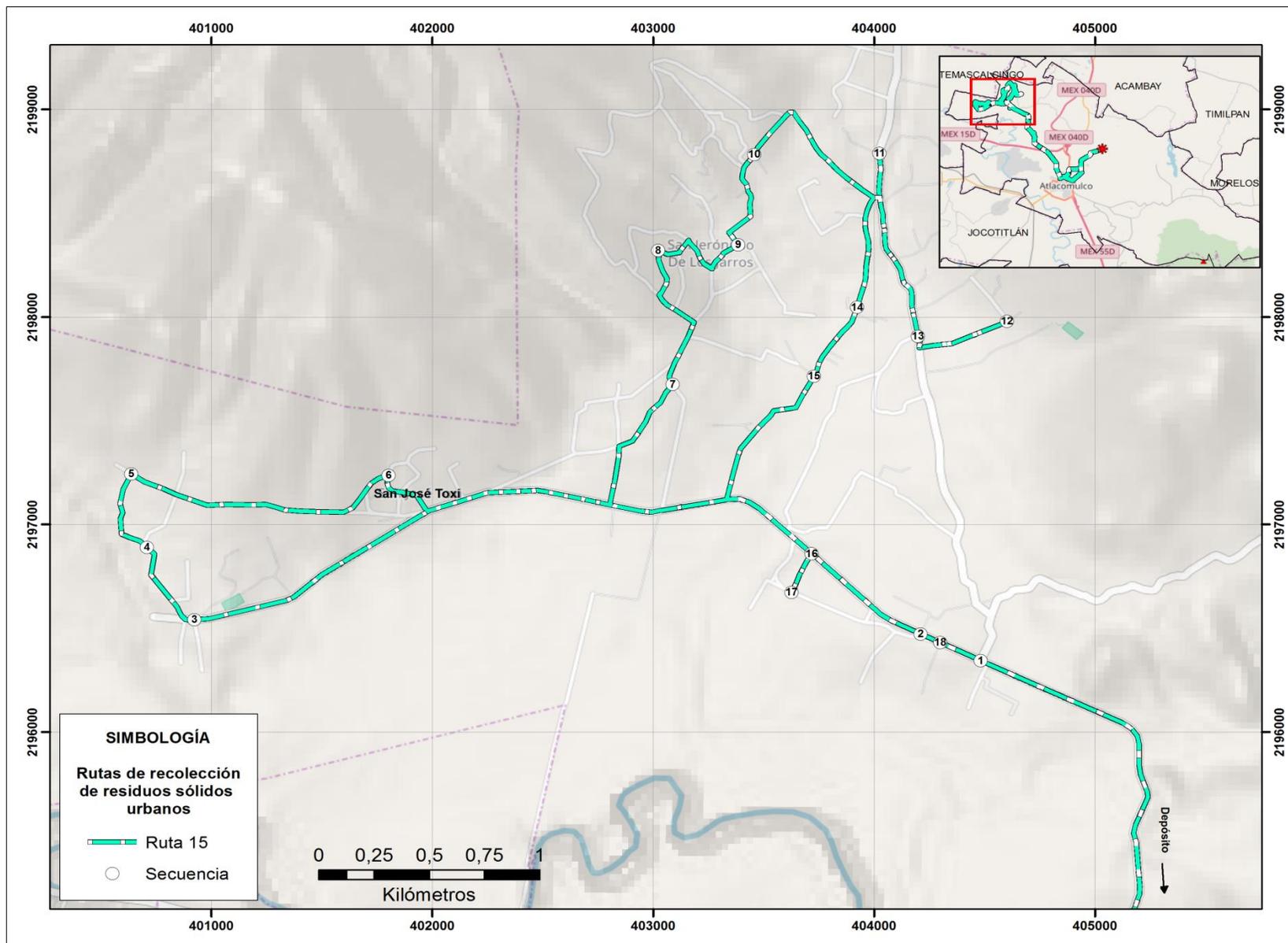
La generación de residuos en esta localidad van de medios a altos y por lo pequeño de la misma, la recolección tiene presencia en la mayoría de las calles principalmente en la zona centro.

Tabla 32. Itinerario de la ruta 14 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 14		Tiempo total: 9:45		Capacidad: 5 Ton.	
Color: Violeta		Distancia recorrida: 31.77km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	1824	7:30am	8:35am	570	-
2	1822	8:35am	9:47am	639	-
3	2384	9:47am	10:00am	54	-
4	2387	10:00am	10:11am	23	-
5	2416	10:11am	10:25am	62	-
6	2479	10:25am	11:18am	454	-
7	2369	11:18am	11:33am	69	-
8	2375	11:33am	12:47pm	662	-
9	1804	12:47pm	1:12pm	169	-
10	2388	1:12pm	2:57pm	963	-
11	2374	2:57pm	3:13pm	85	-
12	1797	3:13pm	3:49pm	285	-
13	1831	3:49pm	4:38pm	408	-
14	1794	4:38pm	5:15pm	285	-
END	2520	5:36pm	-	-	4,728

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Mapa 22. Ruta 15 de recolección de RSU en San José Toxi y San Gerónimo de los Jarros



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

En el mapa 22 se ubica la ruta 15 que recolecta residuos sólidos en las localidades de San José Toxi y San Jerónimo de los Jarros ubicadas al noroeste de Atlacomulco colindando con el municipio de Temascalcingo. Para esta ruta se designó un camión recolector con capacidad de 10 toneladas haciendo un tiempo aproximado de 9 horas con 37 minutos y recorre una distancia total de 43.87 km como lo muestra la tabla 33. Para acceder a estas localidades la ruta que utiliza es la carretera a Toxi.

En estas localidades las viviendas se encuentran relativamente dispersas, pero en este caso no significa que no tengan cobertura, por el contrario las vialidades facilitan el acceso a ellas. Como se muestra en la tabla 29 la generación de residuos sólidos es homogénea en ambas localidades

Tabla 33. Itinerario de la ruta 15 de recolección de residuos sólidos urbanos

Ruta: 15		Tiempo total: 9:37		Capacidad: 10 Ton.	
Color: Turquesa		Distancia total: 43.87km		Carga de salida: 0	
No.	Parada	Llegada	Salida	Recolección	Distribución
1	2197	7:30am	8:22am	439	-
2	2190	8:22am	9:06am	362	-
3	2164	9:06am	9:37am	231	-
4	2002	9:37am	10:08am	231	-
5	2017	10:08am	10:39am	231	-
6	2165	10:39am	11:12am	246	-
7	2082	11:12am	11:23am	31	-
8	2166	11:23am	11:34am	31	-
9	2104	11:34am	12:14pm	316	-
10	2248	12:14pm	12:45pm	230	-
11	2266	12:45pm	1:02pm	92	-
12	2192	1:02pm	1:33pm	230	-
13	2193	1:33pm	2:04pm	230	-
14	2467	2:04pm	2:57pm	454	-
15	2477	2:57pm	3:32pm	270	-
16	2067	3:32pm	4:05pm	246	-
17	2195	4:05pm	4:36pm	230	-
18	2196	4:36pm	5:07pm	230	-
END	2520	5:35pm	-	-	4,330

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Con base a los resultados obtenidos se puede apreciar que el total de recolección de residuos sólidos urbanos es de 60.22 kg por todo el municipio, recorriendo una distancia de 402,45 km, ver tabla 34 y mapa.

Tabla 34. Resultados de las rutas de recolección de RSU.

No. de ruta	RSU recolectados	Distancia recorrida
* 1	1,984 kg	21.58 km
* 2	2,179 kg	17.92 km
* 3	4,296 kg	18.65 km
* 4	4,868 kg	19.02 km
* 5	4,089 kg	20.22 km
* 6	4,395 kg	21.04 km
* 7	4,395 kg	22.18 km
* 8	4,641 kg	20.04 km
9	3,456 kg	30.75 km
10	4,944 kg	28.26 km
11	3,496 kg	41,01 km
12	4,336 kg	34.38 km
13	4,088 kg	31.77 km
14	4,728 kg	31.77km
15	4,330 kg	43.87km
Total	60,225 kg	402.45 km

Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

*Rutas correspondientes a la cabecera

Por otro lado y con base a los datos obtenidos por parte del municipio se tiene que el total de recolección es de 95,025 kg es decir que tiene un aumento de 34,800 kg más que las obtenidas con el modelo VRPTW debido a que considera la recolección en algunas industrias ubicadas en la salida rumbo a San Felipe del Progreso, ver tabla 35.

Tomando como ejemplo la cabecera municipal y haciendo comparación de los resultados obtenidos, tenemos un total de 8 rutas destinadas a esta zona y por otra parte actualmente cuenta con 4 zonas de las cuales 4 camiones hacen el recorrido, ver figura 20, pero cabe destacar que en estos camiones tienen que hacer de 2 a 3 viajes para cubrir la demanda de la cabecera, en cambio las rutas obtenidas en este estudio fueron diseñadas para hacer solo un recorrido.

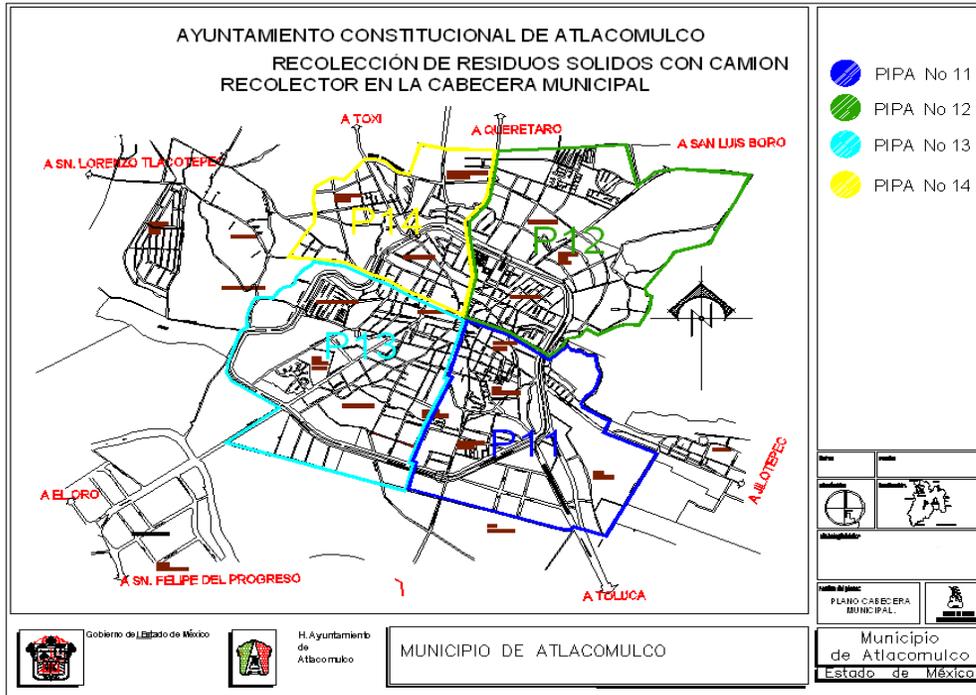
Tabla 35. Recolección de RSU actuales por día

No. de ruta	No. viajes	RSU recolectados
1	4	6,660
2	5	8,325
3	5	6,900
4	2	6,530
5	2	6,720
6	2	7,590
7	4	11,620
8	3	5,530
* 9	3	5,010
* 10	2	12,660
* 11	2	10,930
* 12	2	6,550
Total	36	95,025

Fuente: Elaboración propia con datos de servicio públicos.

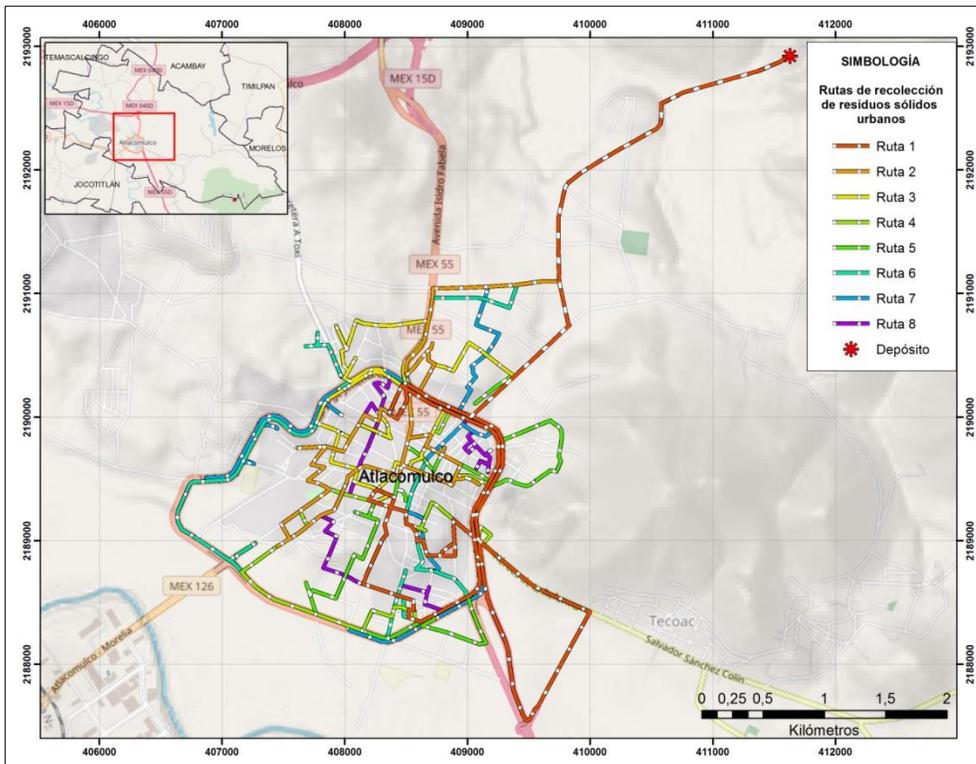
*Rutas correspondientes a la cabecera

Figura 19. Sectores de recolección de RSU actuales



Fuente: Servicios Públicos de Atacomulco

Mapa 23 Propuesta de rutas en la cabecera municipal



Fuente: Elaboración propia con base al modelo VRPTW en TransCAD

Por último cabe mencionar que la implementación de estos modelos son relevantes en este tipo de estudios, considerando que solo el 27% de los municipios a nivel nacional cuenta con un sistema de rutas diseñado bajo algún tipo de modelo matemático y muchos también no consideran algunas variables como lo es la población o las propias ventanas de tiempo en la misma ruta, es por ello que se deben de tener en consideración las recomendaciones y conclusiones que a continuación se presentan.

Conclusiones y Recomendaciones

INTRODUCCIÓN

Las conclusiones desarrolladas en esta investigación se definieron con base a los resultados obtenidos, mismos que se derivaron de los pasos metodológicos. También se estableció una serie de recomendaciones que pueden ayudar de forma puntal a la mejora de este proyecto, pero sobre todo a la gestión de los residuos sólidos urbanos de Atlacomulco.

CONCLUSIONES

Para lograr el primer objetivo específico fue necesario contar con el apoyo del departamento de servicios públicos, para saber con qué información se contaba en ese momento, y a su vez conocer la situación en la que se encontraba el municipio en materia de generación y recolección de residuos sólidos.

Para dar cumplimiento al segundo objetivo específico se fue construyendo una metodología que se adecuara a las necesidades para generar rutas de recolección con características especiales, esta fue resuelta desde la generación de la propia base cartográfica.

Por último y para lograr cumplir con el objetivo específico número 3 fue necesario basarnos principalmente en el modelo (Vehicle Routing Problem With Time Windows, VRPTW, por sus siglas en inglés), esto se logró mediante el manejo del software TransCAD y se obtuvo las siguientes conclusiones:

Conforme al objetivo del trabajo se logró modelar 15 rutas que darán servicio a la demanda de recolección de residuos sólidos urbanos para el municipio de Atlacomulco, cabe mencionar que como todo modelo, es solo una representación que puede acercarse a la realidad, faltaría considerar más factores que puedan influir en el proceso de recolección, esto obedece a las técnicas heurísticas en “dónde pretende buscar buenas soluciones, claro está, sin llegar a lo óptimo”, ya que como bien sabemos lo óptimo aplicado en la realidad no existe.

Se concluyó también que es necesario implementar una prueba piloto para monitorear con el recorrido de las rutas y poder retroalimentar el modelo para un mejor funcionamiento.

También se puede entender que la utilización de estos modelos de VRP con ventanas de tiempo obedecen perfectamente a un objetivo específico, que para este caso de estudio fue el de disminuir las distancias y tiempos de recorrido de las rutas de recolección.

Con estas nuevas rutas de recolección de residuos sólidos urbanos los encargados de administrar esta área podrán contar con nuevas alternativas diferentes a las que se tienen actualmente, como es bien sabido, estas carecen de una metodología y como tal no hay rutas definidas en su totalidad, es por ello que con este tipo de estudios se pretenda implementar y así mejorar el sistema de recolección en el municipio.

Para la realización de este trabajo se pudo observar los grandes problemas que engloba todo el sistema de gestión de residuos sólidos, que va desde la generación hasta la disposición final, los cuales muchos tienen que ver con la falta de conciencia ambiental de los habitantes del municipio, los más comunes fueron: la falta de separación de residuos ya que esto conlleva a un aumento en los tiempos de recolección debido a que los trabajadores tienen que invertir tiempo de más en las paradas para poder separar los residuos, otro es el de los fraccionamientos que muchos de ellos tienen un sistema diferente de recolección y no dan acceso a los camiones recolectores y por último la dispersión de las viviendas en algunas localidades, esto hace que no se tenga una cobertura total.

Otro punto a considerar fue el de obtener escenarios idóneos mediante la utilización de un vehículo compactador el cual tenga la capacidad de recolectar los residuos en un solo viaje y así dar la mayor cobertura en municipio.

En cuanto a los Sistemas de Información geográfica aplicados a cuestiones de transporte ha cobrado mayor relevancia en la gestión y planeación en distintos servicios públicos, es de reconocer la gran bondad que tienen los SIG para integrar distintas disciplinas y solucionar problemas cada vez más complejos.

Tomando en cuenta el marco teórico se considera la relevancia que lleva consigo la teoría de grafos ligado a la geografía como una “disciplina de la distancia” considerando que se estudia desde la perspectiva de la proximidad o lejanía a partir de un punto fijo con el fin de disminuir costos operativos como lo es el combustible, tiempo de recorrido, impacto ambiental, entre otros.

Por ultimo este trabajo de tesis por su temática tiene mucho potencial para desarrollarse aún más, sin embargo, también existieron limitantes, desde la generación de la cartografía base, hasta la falta de respuestas a peticiones de información que se hizo al ayuntamiento.

RECOMENDACIONES

Con la generación de los escenarios antes mencionados y atendiendo a los problemas encontrados, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Con el fin de mejorar estas propuestas se deben de retroalimentar con la experiencia de los operadores ya que ellos conocen el día a día de la recolección.
- Se sugiere hacer un estudio para generar rutas en distintos horarios.
- Se propone que el estacionamiento de los camiones recolectores se encuentre cerca del sitio de disposición final.
- Para la recolección de residuos en localidades retiradas puede cambiar el método a recolección por contenedores y aunque estos existen en la cabecera del municipio, no son suficientes.
- Se propone la implementación de navegadores GPS en los camiones recolectores para dar seguimiento al ruteo y mejorar el proceso de recolección.
- Se recomienda retroalimentar este proyecto con análisis de costo y beneficio.
- Es necesario contar con un registro de las paradas en las rutas de recolección actuales.
- Se invita al departamento de servicios públicos a tener campañas de concientización y separación de residuos sólidos.
- Es preciso aplicar multas económicas ejemplares para las personas que depositen su basura en lugares inadecuados.
- Se invita a la retroalimentación entre distintas disciplinas con el fin de pulir este tipo de estudios.
- Se invita a la comunidad geográfica a interesarse más en este tipo de temáticas.

ANEXOS

“PARQUE VEHICULAR”



“PERSONAL”



“SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL”



BIBLIOGRAFÍA

- Chapleau, R. y Trepanier, M. (1997). *Transportation Object-Oriented Modelli: an Extension of the Totally Disaggregate Approach*. Austin, Texas: International Association of Travel Behavior Research.
- Duran, H. (2007) *Metodología para el desarrollo de infraestructura carretera Mediante el uso del paquete computacional TransCAD*, Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México
- G. Korte. (2001). *The GIS Book (5th Ed. Rev.)*. Autodesk Press.
- Gaskell, T. (1967). Bases for vehicle fleet scheduling. *Operational Research Quarterly*. No. 18, pp. 281-295.
- Golden, B., y Wong, R., 1981. Capacitated arc routing problems. *Networks* 11, 305-315.
- Haggett P. (1976). *Análisis Locacional en la Geografía Humana*. Colección Ciencia Urbanística 17. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Horst Sachs, Michael Stiebitz, y Robin J. Wilson. (1988). An historical note: Euler's Königsberg letters. *Journal of Graph Theory*. 12(1): 133-139.
- Kwan Mei-Ko. (1962). Graphic programming using odd or even points. *Chinese Mathematics*, 1: 237-277.
- Macías, L. (2008). *Análisis De Las Rutas De Distribución De Gasolinas En El Distrito Federal*. Tesis de Maestría (Ingeniería Industrial). Posgrado de Ingeniería, UNAM.
- Martínez C.A., (2010), Ant Colony System y Asynchronous Teams para el Problema de Ruteo Capacitado de Vehículos, *REVISTA ICHIO*, pp. 1-24
- Núñez J. (2004). Siete puentes, un camino: Königsberg. *Revista Suma* 45. Federación Española de Sociedades de Profesores de Matemáticas (FESPM). pp 69-78. Cataluña, España.
- Olaya, F. Víctor. *Sistemas de Información Geográfica. Versión 1.0*. Rev. 25 de Noviembre de 2011.
- Orloff, C.S. (1974). A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, 4: 35-64.
- Pons, J.,(1991) *Geografía de redes y sistema de transporte.*, Ed. Síntesis, Madrid.

- Racero, J., & Pérez, E. (Septiembre de 2006). Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios, X Congreso de Ingeniería de organización, Valencia, España.
- Racero, J., & Pérez, E. (Septiembre de 2006). Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios, X Congreso de Ingeniería de organización, Valencia, España.
- Robusté A, F. (2005). Logística del transporte, Ed. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.
- Rojas, C., & Vera, N. (Agosto de 2013). ABMS (Automatic BLAST for Massive Sequencing). En H. Castillo (Presidencia), 2º Congreso Colombiano de Biología Computacional y Bioinformática CCBCOL. Congreso llevado a cabo en Manizales, Colombia.
- Ruiz R. (2004). A decision support system for a real vehicle routing problem. European Journal of Operacional Research. Vol. 153. pp. 593-606.
- S. Hillier, F., & J. Lieberman, G. (2014). Fundamentos de Investigación de Operaciones. México D.F.: Mc Graw Hill.
- 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.
- SEDESOL, Manual para el Diseño de Rutas de Recolección de Residuos Sólidos Municipales. SEDESOL, México, 1999.
- Seguí, J. M y Martínez, M.R. (2003): Pluralidad de métodos y renovación conceptual en la geografía de los transportes del siglo XXI
- Segui, J.M., & Petrus , J.M.(1991) Geografía de redes y sistemas de transporte, , Ed. Síntesis, Madrid

- SEMARNAT, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2007), “Política y Estrategias para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en México”. [En Línea].México, disponible en: http://siscop.ine.gob.mx/novedades/politica_y_estrategias_gir.pdf.
- Serguí, Pons Joana M. (1995). “Análisis y estructuración de las redes en el espacio”, en Prácticas de Análisis espacial, editorial Oikos-Tau, Barcelona.
- Soria, A, (1980). A qué llamamos transporte, , Madrid, Ciudad y Territorio No. 2, Ideal, p. 19-32.
- Till,J.C (2000):“Geographic information systems for transportation in perspective”. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol 8, n° 1-6, pp. 3-12.
- Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza armada Nacional (UNEFA) Núcleo Mérida (2010). Conceptos fundamentales y Relaciones de equivalencia. Disponible en: <http://teoriadegrafo.bligoo.com/media/users/20/1017953/files/247942/unidadi.pdf>. [Consultado el 26 de agosto del 2014].

