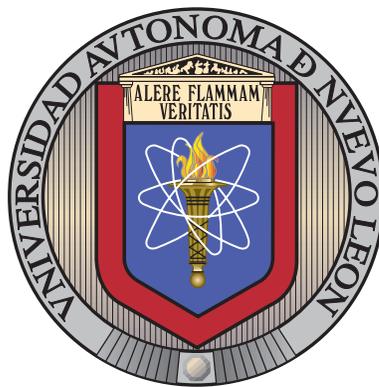


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS PARA LA  
RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

POR

ERICK ORLANDO DE HOYOS ARGUETA

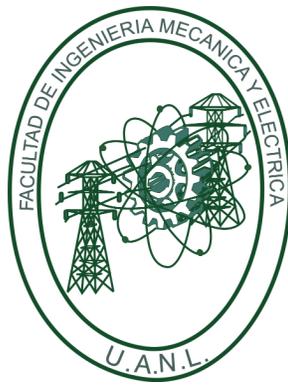
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

DICIEMBRE 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS PARA LA  
RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

POR

ERICK ORLANDO DE HOYOS ARGUETA

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

DICIEMBRE 2019

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Herramientas matemáticas para la recolección de residuos sólidos urbanos», realizada por el alumno Erick Orlando De Hoyos Argueta, con número de matrícula 1937468, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suninistro.

El Comité de Tesis

Jania Astrid Saucedo

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Asesor

[Firma]

Dr. Eduardo Valdés García

Revisor

[Firma]

MLYCS José Eduardo Trejo de la Torre

Revisor

Vo. Bo.

[Firma]

Dr. Simón Martínez Martínez

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, diciembre 2019

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>x</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema . . . . .	2
1.2. Objetivo . . . . .	4
1.3. Hipótesis . . . . .	5
1.4. Justificación del Problema . . . . .	5
1.5. Metodología . . . . .	7
1.6. Estructura de tesis . . . . .	9
<b>2. Antecedentes</b>	<b>10</b>
2.1. Logística Urbana . . . . .	11
2.2. Recolección de Residuos . . . . .	14
2.3. Diseño de rutas de recolección . . . . .	19
2.3.1. Diseño de territorios . . . . .	20

---

2.3.2. Métodos de solución . . . . .	23
<b>3. Metodología</b>	<b>30</b>
3.1. Aplicación y alcance de un modelo . . . . .	30
3.2. Macro ruteo - Diseño de territorios . . . . .	32
3.2.1. Modelo matemático . . . . .	32
3.2.2. Consideraciones y supuestos . . . . .	32
3.2.3. Notación matemática . . . . .	33
3.3. Simulación . . . . .	35
<b>4. Caso de estudio</b>	<b>39</b>
4.1. Municipio de San Nicolás de los Garza . . . . .	39
4.2. Compañía recolectora de residuos . . . . .	40
4.3. Recopilación de datos . . . . .	41
4.4. Pruebas y experimentaciones . . . . .	43
4.5. Resultados modelo . . . . .	44
4.5.1. Escenario de generación mínima . . . . .	44
4.5.2. Escenario de generación promedio . . . . .	46
4.5.3. Escenario de generación máxima . . . . .	47
4.6. Resultados simulación . . . . .	49
4.6.1. Escenario de generación mínima . . . . .	50
4.6.2. Escenario de generación promedio . . . . .	51

ÍNDICE GENERAL	VI
4.6.3. Escenario de generación máxima . . . . .	53
4.6.4. Comparación de resultados . . . . .	55
<b>5. Conclusiones</b>	<b>58</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	58
5.2. Implementación de la metodología . . . . .	60
5.3. Contribuciones . . . . .	60
5.4. Trabajo a futuro . . . . .	61

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Sistema de recolección “de caracol” . . . . .	4
1.2. Porcentaje de carga de camiones y su tonelaje . . . . .	7
2.1. Composición de los RSU en México, 2011 . . . . .	15
2.2. Método de parada fija o de esquina . . . . .	17
2.3. Método de acera . . . . .	18
2.4. Método de contenedores . . . . .	19
2.5. Componentes básicos de modelos de territorio . . . . .	22
4.1. Rutas de Recolección de República Mexicana, 2019 . . . . .	43
4.2. Rutas de recolección en el escenario de generación mínima, 2019 . . .	44
4.3. Balance de cargas aplicando un modelo matemático . . . . .	45
4.4. Rutas de recolección en el escenario de generación promedio, 2019 . .	46
4.5. Balance de cargas aplicando un modelo matemático . . . . .	47
4.6. Rutas de recolección en el escenario de generación máxima, 2019 . . .	47
4.7. Balance de cargas aplicando un modelo matemático . . . . .	48

---

4.8. Balance de cargas aplicando simulación . . . . .	51
4.9. Balance de cargas aplicando simulación . . . . .	53
4.10. Balance de cargas aplicando simulación . . . . .	54
4.11. Comparación de resultados entre la Compañía y Simulación . . . . .	56
4.12. Comparación de rutas entre la Compañía y Simulación . . . . .	57

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Ventajas y desventajas de las distintas herramientas para la toma de decisiones . . . . .	23
2.2. Antecedentes de métodos de solución al problema de recolección de residuos sólidos urbanos . . . . .	25
4.1. Escenarios de generación de residuos sólidos urbanos . . . . .	42
4.2. Tabla de transferencias simulación . . . . .	50
4.3. Tabla de transferencias simulación . . . . .	52
4.4. Tabla de transferencias simulación . . . . .	53

# AGRADECIMIENTOS

---

A mis padres, por el apoyo incondicional. A mi asesora, la Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez, por el tiempo y la paciencia dedicada al desarrollo de este proyecto de tesis. A mis revisores, el M.C. Eduardo Valdés García, por su apoyo con la revisión de esta tesis y ayudarme al desarrollo de la misma, y al M.C. José Eduardo Trejo de la Torre, por ayudarme a acercarme a la compañía del caso de estudio. A mis profesores, por todo el conocimiento adquirido durante las clases. A CONACyT, por aceptarme en su programa nacional de becas de posgrado. al programa de *AUTÉNTICOS TIGRES*, por brindarme la oportunidad de desempeñarme como un atleta de alto rendimiento y representar a la Universidad Autónoma de Nuevo León con los colores Azul y Oro.

# RESUMEN

---

Erick Orlando De Hoyos Argueta.

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

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Número de páginas: 65.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Actualmente, una compañía recolectora de residuos sólidos urbanos en casas/habitación presenta problemas al momento de planificar el macroruteo en las distintas áreas y municipios en donde brinda el servicio, generando una sobrecarga y una subutilización en las unidades de recolección. Es por esto, que se propone un rediseño de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos actuales en una de las áreas del municipio de San Nicolás de los Garza mediante un modelo matemático y simulación, teniendo en consideración el método de recolección «de acera» que permita un balance de carga idóneo en las unidades que brindan el servicio. Mediante el modelo matemático, se logra balancear o acercar la medida de actividad de los territorios a 8500 kilogramos o algún múltiplo de este número, para lograr asignar camiones completos a cada territorio y se encuentren cerca de su capacidad de carga ideal. Se realiza simulación para lograr balancear

aquellos territorios resultantes del modelo matemático que, si bien se acercan a la medida de actividad de balance, no se encuentran dentro del rango determinado.

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** En esta investigación, se modifica la forma de calcular la medida de actividad en cada una de las áreas básicas propuestas, siendo esto uno de los aportes principales, al asignar un porcentaje del total del tonelaje de cada ruta actual al área básica de acuerdo con la cantidad de manzanas por las que pasa. También, se adaptó un modelo matemático para buscar equilibrar los territorios con la capacidad de carga de las unidades de servicio, cumpliendo los criterios de contigüidad, balance, compacidad e integridad espacial. Además, se utilizó simulación como método final de balanceo, logrando reducir la cantidad de territorios que no se encontraban dentro de su rango de aceptación.

Es importante destacar que se utilizan ambas herramientas matemáticas para ayudar a la toma de decisiones de la compañía, cuyo principal propósito, es basar las decisiones tomadas de acuerdo con una herramienta cuantitativa. Un aspecto importante de los resultados es que se reduce la cantidad de desbalance en los tres escenarios de generación de residuos sólidos urbanos, logrando rediseñar los territorios de recolección con una carga idónea de las unidades de servicio, teniendo en consideración la medida de actividad de las distintas áreas básicas y las consideraciones especiales de la compañía.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

Uno de los principales problemas que se generan en las zonas urbanas y áreas metropolitanas, es la planificación y gestión del transporte que es un factor decisivo para el desarrollo, la competitividad y sostenibilidad de una ciudad-región. Debido a que rara vez se considera en la planificación, surgen ineficiencias en su aplicación y no se toman en cuenta todos los factores que impactan en la sociedad.

El término “*Logística Urbana*” se refiere a todas las operaciones y servicios realizados en una ciudad tanto del sector público como el privado, buscando el beneficio de todo el conjunto de actividades, fomentando la cooperación y la colaboración entre los principales actores y buscando la optimización sistemática o integral de la cadena.

Según Robusté *et al.* (1999), la *Logística Urbana* busca un equilibrio entre la distribución y los costos totales (económicos, sociales y ambientales) que se presentan en las áreas metropolitanas. Estas ciudades, se consideran como una unidad de negocio al aplicar principios de eficiencia empresarial a la administración pública, que se distinguen por los servicios que prestan a la comunidad en cantidad, calidad y a un coste adecuado, asignando de forma conveniente los bienes comunes.

Al realizar una planificación, es necesario conocer las necesidades y condiciones de los involucrados, cuyos principales propósitos que se buscan obtener al implemen-

tar la *Logística Urbana* son el aliviar la congestión de tráfico a través de la movilidad, conectividad y tiempos de viaje. La *Logística Urbana* también busca minimizar los impactos ambientales como el ruido, la contaminación del aire, la intrusión visual y el consumo de energía, además de mejorar la calidad de vida incrementando la seguridad vial y el cuidado del medio ambiente en el que viven.

Como se mencionó anteriormente, la *Logística Urbana* tiene distintos enfoques y áreas de implementación, siendo uno de estos el servicio de recolección de residuos sólidos en las zonas metropolitanas, ya que la concentración poblacional en dichas áreas y sus modificaciones en los hábitos de consumo, resultan factores importantes a considerar por su impacto en la sociedad en general.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La problemática surge debido a la necesidad por parte de los municipios de brindar a cabo funciones y servicios públicos de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos de basura, donde la generación de residuos ha ido al alza en las zonas metropolitanas desde 1997 hasta la fecha.

Los residuos sólidos urbanos son el resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (por ejemplo, productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques), cuyo promedio nacional per cápita ha incrementado de 0.83 kg/hab/día desde 1997 hasta 0.99 kg/hab/día en el 2012, dichos residuos tienen distintos tipos de descomposición e impacto en el medio ambiente (SEMARNAT, 2015).

México es uno de los pocos países en que no existe el cobro por la recolección de basura, este servicio representa una preocupación para las autoridades correspondientes al presentarse fallas a la hora de brindar este servicio a la población. Además, algunos de los sistemas de recolección de residuos urbanos carecen de rutas y son determinados de forma empírica, basándose en la experiencia de los encarga-

dos del sistema de recolección o los conocimientos de los operadores de los vehículos (SEMARNAT, 2015).

Al planificar empíricamente se presentan deficiencias en el servicio, ya que tomar la decisión por parte del jefe de limpia y dejar a criterio de los choferes el recorrido diario, se presentan áreas de oportunidad a la hora de brindar un sistema de recolección de residuos sólidos urbanos dejando mucho que desear en cuanto al funcionamiento y aspectos de operación, ya que estas decisiones generan graves daños al sistema como el desperdicio de personal y la reducción de las zonas de cobertura por parte del servicio de limpia.

Con el propósito de estudiar más a detalle el sistema de recolección de residuos sólidos urbanos se realizó esta investigación para ejemplificar los problemas que se presentan en una compañía real. Una compañía que tiene presencia en diversos municipios del estado de Nuevo León, presenta algunas problemáticas en común al momento de satisfacer a todos los clientes en general. Por lo tanto, se identifican tres problemas principales en la compañía:

1. Recolección desbalanceada – Los camiones con que se brinda el servicio en el municipio de San Nicolás de los Garza tienen un rango de capacidad para su correcto funcionamiento, teniendo como problemática la utilización de solo el 29.5 % de la capacidad de recolección en algunas unidades, mientras que otros la llegan a sobrepasar con hasta el 142 % de su capacidad ideal.
2. Daño a unidades – Debido al desbalanceo en las rutas de recolección, los vehículos cuyas capacidades se ven sobrepasadas presentan daños considerables, teniendo que realizar mantenimientos correctivos para reparar la unidad.
3. Altos costos – Con el daño a las distintas unidades, se incurren en costos extras por el mantenimiento a las unidades dañadas y por la reasignación de las unidades con subutilización para apoyar a las rutas con mayor cantidad de residuos.

La compañía caso de estudio brinda el servicio a la comunidad mostrado en la figura 1.1, se observan los distintos colores para ejemplificar el recorrido que realiza cada camión en las colonias del municipio utilizando un sistema “de caracol”, realizando el recorrido azul, rojo, verde y amarillo respectivamente.

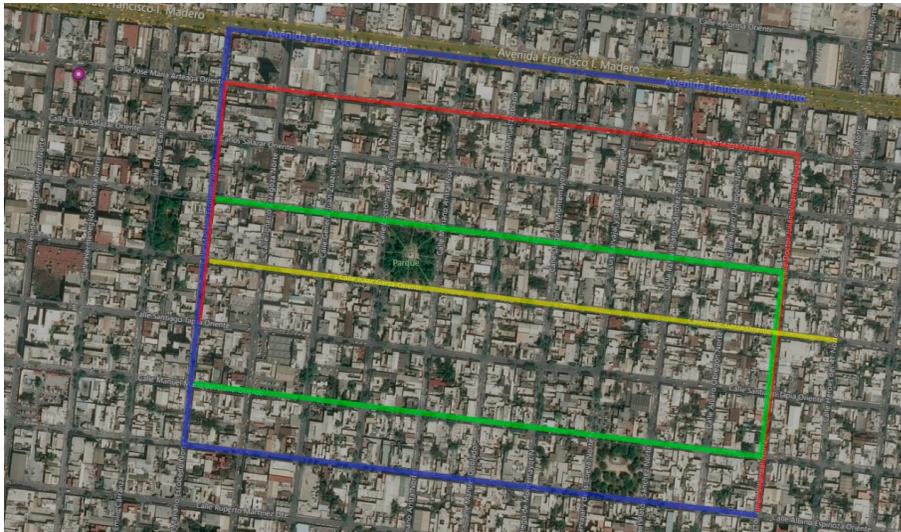


Figura 1.1: Sistema de recolección “de caracol”

Fuente: Elaboración propia

En respuesta a estas problemáticas se plantea utilizar herramientas matemáticas para mejorar el sistema de recolección actual de la compañía, tomando en consideración la información de generación de residuos por territorio, mostrando el objetivo de la investigación a continuación.

## 1.2 OBJETIVO

Rediseñar las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos actuales en una de las áreas del municipio de San Nicolás de los Garza mediante un modelo matemático y simulación, considerando el método de recolección «de acera», permitiendo un balance de carga idóneo en las unidades que prestan el servicio.

### 1.3 HIPÓTESIS

Al implementar un modelo matemático y simulación al sistema actual de recolección de residuos sólidos urbanos, se logrará un balance de cargas al rediseñar la planeación de rutas a nivel macro en una de las áreas del municipio de San Nicolás de los Garza.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Nuevo León es uno de los estados con mayor índice de expedición de residuos sólidos urbanos en los últimos años, siendo el sistema de recolección una prioridad para el estado. Por esto, al aumentar la coordinación y buena administración se logrará brindar este servicio a toda la población con total satisfacción.

Debido a que cada gobierno municipal es el encargado de realizar la recolección por su cuenta, y la manera de prestar el servicio varía de acuerdo con la composición, frecuencia y las rutas de cada municipio, una de las opciones para planificar un sistema integral de residuos sólidos urbanos es utilizar el *manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales* presentado por la SEDESOL (2001).

Aún y cuando cada municipio presenta distintas características para realizar un sistema de recolección, estos se pueden englobar bajo una misma perspectiva de operación, ya que el funcionamiento general ocurre de manera similar en todos los casos (tipos de camiones, recolección en ventanas de tiempo, servicio diario, adecuación de servicios a patrones de demanda, previsiones, prioridades) que involucren a todos los sectores requeridos.

Cabe mencionar que no existen soluciones universales al problema, por lo que es necesario realizar un estudio según la zona, productos, tipos y necesidades del

servicio, considerando las distintas tipologías urbanas. La *Logística Urbana* dispone de áreas de oportunidad para buscar la optimización y disminución de ineficiencias actuales de los procesos en los distintos municipios, ya que estas afectan a todos los usuarios de manera negativa.

Al optimizar el sistema de recolección de residuos sólidos urbanos y disminuir las ineficiencias en el servicio, se eliminan los tiraderos clandestinos de residuos que disminuyen la calidad de vida, se establecen rutas, horarios y frecuencias del servicio considerando las necesidades de la población, se logra atender oportunamente las quejas del público sobre el servicio de limpia y recolección, además de tomar las medidas necesarias de seguridad para evitar accidentes antes, durante y después de la recolección.

Las rutas de recolección representan una de las etapas más importantes en términos de costos dentro de la gestión de residuos, por lo que es necesario establecer una serie de lineamientos que permitan prestar el servicio de una manera eficiente, utilizando alguna herramienta que permita minimizar los costos operativos y mejorar tanto el nivel de servicio como la calidad de vida de la población. Además, el incremento de la población en el estado es un factor importante que considerar, ya que la generación de residuos aumenta proporcionalmente con el aumento de población.

Para la compañía del caso de estudio es de suma importancia el realizar un rediseño en sus rutas de recolección, actualmente, realizan el servicio de manera ineficiente. A continuación se presenta un análisis conciso de la información proporcionada del mes de marzo:

La figura 1.2 contiene dos gráficas con la información de la compañía caso de estudio. La primera, muestra que del total de camiones el 40% realizó dos vueltas en su horario de recolección, mientras que tres camiones realizaron una tercer vuelta dentro de su horario. La segunda gráfica representa el total de la recolección de residuos sólidos urbanos en cada una de las vueltas, donde la carga de camiones de

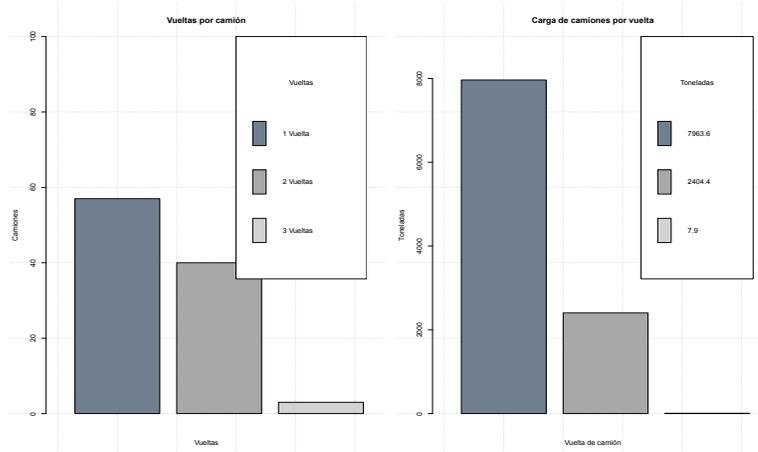


Figura 1.2: Porcentaje de carga de camiones y su tonelaje

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

los primeros viajes tuvo una carga de 7,963.6 toneladas, el segundo viaje tuvo una carga de 2,404.4 toneladas y, el tercer viaje cargó 7.9 toneladas.

En horas de trabajo, se realizó un total de 9,929.75 horas con un promedio de 7.11 horas en cada viaje. Los lunes y martes son los días más cargados de trabajo con un día adicional para la generación de residuos, con una suspensión del servicio los domingos por parte de la compañía. En kilometraje total, los resultados arrojan alrededor de 98,949.48 kilómetros con un promedio de 101.59 km por unidad de recolección. Con lo anterior, se determina que hay áreas de oportunidad en sus rutas de recolección, por lo que se pretende impactar directamente en los horarios de trabajo y balancear las cargas entre sus unidades de recolección.

## 1.5 METODOLOGÍA

Como procedimientos para la investigación científica, se determinó una secuencia de pasos para alcanzar el objetivo esperado y rediseñar los sistemas actuales de recolección de residuos sólidos urbanos, presentando a continuación las fases a seguir del proyecto:

1. *Identificación del problema:* La problemática surge por parte de la organización encargada de la recolección de basura en el municipio de San Nicolás de los Garza, dándonos a conocer los procesos actuales, métodos de recolección, frecuencias y principales características a considerar para trazar sus territorios y rutas de recolección.
2. *Revisión de literatura:* Se ha desarrollado por un largo período de tiempo, buscando obtener la mayor cantidad de información posible del tema en particular, desde conceptos e ideas principales de los distintos autores de la literatura, hasta los procesos más comunes de recolección de residuos sólidos urbanos en México.
3. *Formulación del modelo matemático y simulación:* Se aplicará la adaptación del modelo de diseño de territorios propuesto por Alvarado (2017), tomando en consideración las aplicaciones y enfoques requeridos por la compañía caso de estudio. Con esto, se buscarán los objetivos que pretende alcanzar la empresa de acuerdo con las variables consideradas y las restricciones con las que cuenta el sistema. Además, para el correcto balanceo en las unidades de servicio, se propone un algoritmo para balancear las cargas en los territorios propuestos por el modelo de optimización.
4. *Caso de Estudio: aplicación del modelo y simulación:* La información será proporcionada por la compañía que se encarga de la recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Nicolás de los Garza, brindándonos lo necesario para apegarnos de la mejor manera a la realidad de las rutas de recolección con el fin de brindarles a los tomadores de decisiones un diseño adecuado en sus rutas. Para la validación del modelo, se utilizará la herramienta GAMS/CPLEX que brinde resultados con la información utilizada, apoyándonos también con diversas herramientas para manipular la información, permitiendo compararlo que arroja el modelo como propuesta de territorios, contemplando tres escenarios posibles y realizar una comparación, teniendo los propuestos por la compañía, los que arroja el modelo y los determinados con la simulación.

5. *Interpretación de resultados*: Al obtener los resultados en la etapa anterior, se pretende realizar un análisis de las distintas herramientas como apoyo a la toma de decisiones e implementación para el nuevo diseño en las rutas de recolección en el caso de estudio, teniendo como resultados esperados el disminuir los costos por mantenimientos generados por el desbalance en las unidades de servicio. Es importante mencionar que el método propuesto se espera pueda ser replicado en los distintos municipios en los que la compañía de recolección de residuos sólidos urbanos presta sus servicios.

## 1.6 ESTRUCTURA DE TESIS

La estructura por utilizar en la exposición del trabajo a realizar es la siguiente:

En el primer capítulo, se presenta la descripción del problema, el objetivo principal de la investigación y la hipótesis propuesta. Después, en los antecedentes se exponen los trabajos y propuestas de resolución para esta problemática, explicando los conceptos de *Logística urbana, recolección de residuos, diseño de rutas de recolección y métodos de solución*. En el tercer capítulo, se menciona la metodología a utilizar, cuáles son las características y especificaciones generales del *diseño de territorios*, el modelo propuesto para la aplicación del caso de estudio y el algoritmo de balance para los territorios obtenidos del modelo.

En el cuarto capítulo se muestra el caso de estudio, las pruebas y experimentaciones llevadas a cabo con el modelo matemático de diseño de territorios y simulación y, finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones de la investigación y posibles trabajos a futuro.

A continuación se presenta el capítulo de antecedentes.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

La cadena de suministro está definida por el *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP, 2013) como todas aquellas actividades en las que está involucrada la gestión logística (incluyendo producción, almacenamiento e inventario, abastecimiento de compra, transporte y distribución, entrega y servicio al cliente), incluyendo la integración de sus socios comerciales (proveedores, intermediarios, clientes, servicios externos) con la oferta/demanda dentro y entre las empresas, con la función principal de brindar un servicio o de proporcionar un bien material hacia algún individuo o compañía.

Para lograr proporcionar este bien o servicio, es necesario el correcto funcionamiento de la logística, definida como el área dentro de la cadena de suministro que se encarga del flujo de materiales e información dentro y fuera de la organización para satisfacer los requerimientos de clientes, maximizando la rentabilidad a través de la relación costo-beneficio (Christopher, 2011).

Dentro de una de sus ramificaciones, una parte de la cadena de suministro que se enfoca a dar servicios a la comunidad es la logística urbana o ciudad logística, surgiendo de la necesidad de una planificación y gestión de todas las operaciones y los servicios presentes en la ciudad (transporte urbano, de mercancías, servicios de correos, de limpieza, riego, mantenimiento de calles, recogida de basura, servicios

de respuesta rápida, etc.), con el propósito de optimizar los recursos escasos de las áreas metropolitanas (Robusté *et al.*, 1999).

## 2.1 LOGÍSTICA URBANA

Los conceptos de logística urbana y ciudad logística se han convertido en un factor decisivo para el desarrollo y la competitividad del tejido económico de una ciudad-región, cuyo aumento del volumen de tránsito en las ciudades capitales del mundo, además de una fuerte presión urbanística y la necesidad de preservar el medio ambiente, ha llevado a los organismos públicos a utilizar la logística urbana como herramienta básica de competitividad, ya que afecta de manera transversal tanto la administración pública como a las empresas privadas, representando una parte importante del costo logístico y el nivel de servicio al cliente (Montero y Eslava, 2016).

Una definición más concreta de este término se presenta por los autores Taniguchi y Van der Heijden (2010), donde la logística de la ciudad o logística urbana contempla la gestión de transporte terrestre buscando un equilibrio para realizar la distribución de mercancías de manera eficiente, tomando en cuenta los costos sociales y ambientales (mayor tráfico y ahorro de energía).

Otra de las aplicaciones de la logística urbana es presentada por Hesse (1995), como una estrategia de cooperación e integración para reducir el costo total (económicos, sociales y ambientales), al planificar la distribución y procesos logísticos de la carga urbana dentro de las ciudades de manera eficiente, generando beneficios y asociaciones entre los sectores público y privado.

Con las definiciones presentadas por Montero y Eslava (2016), Taniguchi y Van der Heijden (2010) y Hesse (1995), podemos establecer que la logística urbana busca el desarrollo de una ciudad a través de la eficiencia y estrategias de integración, considerando principalmente los aspectos económicos, sociales y ambientales que

afectan a los individuos.

Un término importante al buscar la distribución eficiente en la logística urbana es la movilidad, ya que es un requisito básico para el transporte de mercancías que se ve influenciado por distintos factores como la seguridad y capacidad de carreteras, donde los distintos métodos de transporte y su infraestructura integrada (red de carreteras y ferrocarril) son esenciales para disminuir tiempos de viaje y mayores puntos de conectividad.

Por eso, la planificación de la logística urbana debe ser adaptada a las distintas condiciones que se presentan en una región, teniendo en consideración los siguientes procedimientos ya que fortalecen la cooperación entre los actores que se ven afectados por su implementación:

- El análisis económico y tendencias logísticas (transporte distribución urbana).
- La identificación de agentes involucrados y sus puntos de vista.
- Obtención de información de los flujos de mercancías.
- Recolección y análisis de datos del flujo de mercancías.
- Identificación de cuellos de botella en la cadena de suministro.

La logística urbana se adapta a las condiciones sociales del entorno que lo rodea, por lo que la importancia de su aplicación se ve sustentado con la idea de Quak (2008) para detallar los distintos tipos de impacto causados por los sistemas de transporte y distribución de mercancías en las zonas urbanas, teniendo como consecuencia:

#### 1. Impactos sobre el planeta

- Emisión de contaminantes (CO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, COV).
- El transporte incide en el cambio climático global.
- Uso de recursos naturales no renovables (combustibles fósiles).

- Productos de deshecho (neumáticos, aceites, plásticos, etc.).
- Pérdida y amenaza para la vida silvestre.

## 2. Impacto sobre las personas

- Consecuencias físicas (emisión de contaminantes por muertes y enfermedades).
- Lesiones y muertes (accidentes de tráfico).
- Aumento de molestias (causadas por ruido, intrusión visual, mal olor, vibraciones).
- Reducción de calidad de vida (pérdida de espacios abiertos y zonas verdes).

## 3. Impacto sobre la economía

- Ineficiencia y despilfarro de recursos.
- Fiabilidad y puntualidad de entregas (bajo nivel de servicio al cliente y pérdida del mercado).
- Reducción de desarrollo económico.
- Congestión y reducción de la accesibilidad urbana.

Como se mencionó a inicios del capítulo, la logística urbana abarca distintas problemáticas dentro de las ciudades que se buscan resolver de manera eficiente. En este caso, el enfoque del tema que se pretende estudiar es el servicio de recolección de residuos sólidos urbanos en una de las zonas metropolitanas del estado de Nuevo León, debido a que la alta concentración poblacional en dichas áreas, los hábitos de consumo y la posición socioeconómica en la que se encuentran, son algunos factores por considerar debido al impacto que tienen en la generación de residuos sólidos urbanos y en la sociedad en general.

## 2.2 RECOLECCIÓN DE RESIDUOS

Según la publicación de la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)* “Los residuos sólidos urbanos son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (p.e., de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole” (DOF, 2004).

Al ser México uno de los pocos países donde no existe un cobro por la prestación del servicio de recolección de basura, el *Artículo 115* constitucional “confiere a los municipios la responsabilidad de administrar y otorgar a la población la dotación y operación de servicios públicos”, siendo la limpieza de las ciudades y el manejo de residuos sólidos un tema importante a considerar por las autoridades municipales.

Debido a que les concierne la prestación de este servicio, las autoridades se ven ligadas directamente a la recolección de residuos sólidos municipales al que pertenecen, por lo que, la menor falla en el servicio público de limpia genera severas críticas, aún y cuando para lograr un manejo adecuado para la recolección se requiere la participación del gobierno, la industria, el comercio y la sociedad en general.

De acuerdo con Saldaña *et al.* (2019), los residuos sólidos se han convertido en un problema urbano representando para la población y el ambiente un grave peligro debido a tiraderos clandestinos y basura encontrada en lotes baldíos, barrancas, cauces de arroyos e ineficiencias de control de saneamiento en los sitios de disposición final. La situación se manifiesta por una recolección ineficiente, causando que los residuos permanezcan en los domicilios hasta por más de tres días, generando condiciones de riesgo a la salud.

Para lograr realizar la recolección adecuada, no solamente se requiere conocer la cantidad de basura generada en las distintas ciudades sino también es necesario realizar un análisis de la composición de residuos sólidos por entidad. El paso del tiempo ha cambiado los hábitos de consumo de la sociedad, pasando de generar basura densa y orgánica, a voluminosa, parcialmente no biodegradable y con mayor porcentaje de materiales tóxicos, siendo necesario prestar mayor atención a este servicio (SEDESOL, 2001).

En la figura 2.1 se identifican los distintos tipos de composiciones de los residuos sólidos urbanos en México, presentando una mayoría de residuos orgánicos. También se encuentran productos de papel, vidrios, aluminio, textiles, metales y otro tipo de basura.

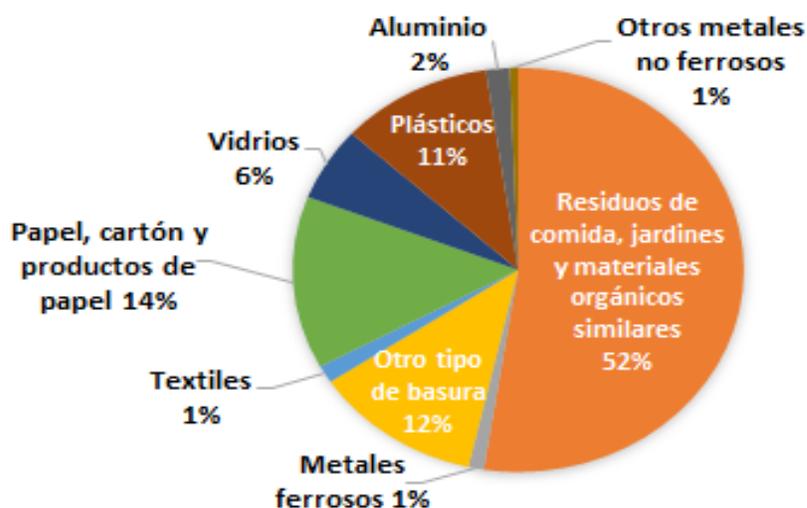


Figura 2.1: Composición de los RSU en México, 2011

Fuente: SEMARNAT (2015)

La SEDESOL (2001) estipula que es necesario un análisis de composición de residuos sólidos urbanos por entidad para realizar la recolección adecuada, y debido a la inexistencia de este tipo de información para el municipio de San Nicolás de los Garza, se incluyeron los estudios de generación y composición de diversas ciudades como *Thailandia*, *Buthan* y *Sri Lanka* para ver las peculiaridades generales de los tipos de composición en otros países y los diversos métodos de recolección y

disposición final.

En el estudio del área de Bután, presentado por Phuntsho *et al.* (2009), determina que la información de los residuos sólidos es esencial para la planeación y programación de un sistema adecuado, realizando la primera encuesta de investigación sobre generación y caracterización mediante el método de muestreo de residuos desde la fuente en ese país.

Otra investigación relacionada a soluciones sostenibles para la gestión de residuos sólidos municipales es presentado por Kaosol (2009) como propuesta para una solución que considere los aspectos ambientales y económicos, tomando en cuenta las principales fuentes de generación, su composición y tendencias.

P K Jayakody *et al.* (2008) presenta un estudio de caracterización a corto plazo para una recolección de residuos sólidos municipales de manera sostenible. Con los resultados, se puede realizar un análisis general del tipo de basura que se obtiene en su mayoría, permitiendo una toma de decisiones de acuerdo con el tipo de disposición final con el que cuentan.

Una de las principales razones por el que la compañía del caso de estudio no cuenta con un análisis de la composición de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Nicolás de los Garza ni en ninguna de las áreas donde tiene presencia, es porque se utiliza el método de recolección “de acera” dificultando este tipo de estudio debido a la ausencia de separación de residuos. En caso contrario donde se tuviera una disposición final de residuos sólidos urbanos de acuerdo con su composición, el método de recolección ideal sería por contenedores como se realiza en diversos países europeos.

Además, de la cantidad y la composición de los residuos, es necesario también el correcto almacenamiento con el propósito de mantenerlos intactos mientras se espera para ser recolectados, entendiéndose como almacenamiento a “la acción de retener temporalmente los residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección o se dispone de ellos” (SEDESOL, 2001). Esta

operación es responsabilidad del generador de basura, cuyo almacenamiento apropiado tiene una influencia positiva en su manejo y en el aseo urbano, mientras que el almacenamiento inadecuado tiene efectos negativos sobre el servicio que se brinda, como lo es el aumento en el tiempo de la recolección, lesiones sufridas por el personal o que se vea afectada la salud de la población por insectos o roedores.

La recolección de los residuos es uno de los pasos más importantes y costosos de todo el sistema, donde autores Das y Bhattacharyya (2015) expresan que los costos de recolección representan entre el 80 al 90 % y el 50 al 80 % para los países de ingresos bajos y medianos, teniendo como objetivo el preservar la salud pública mediante la recolección de la manera más sanitaria posible, eficiente y con el mínimo costo.

Para el diseño de un sistema de recolección de residuos sólidos urbanos, se debe de seleccionar alguno de los métodos más comunes presentados a continuación:

- *Método de parada fija o de esquina* – Consiste en recoger los residuos en las esquinas de las calles, donde mediante una campana se comunica la llegada del camión y los usuarios entregan los residuos.



Figura 2.2: Método de parada fija o de esquina

Fuente: Elaboración propia

- *Método de acera* – Se realiza un recorrido del camión por su ruta, los trabajadores recogen los residuos y los depositan en el camión que avanza sin detenerse.



Figura 2.3: Método de acera

Fuente: Elaboración propia

- *Método de contenedores* – Para este tipo de servicio, son necesarios camiones especiales para realizar la recolección y que los que los contenedores estén ubicados de forma accesible al vehículo. Este método es ideal para centros de gran generación de basura (hoteles, mercados, industrias, etc.).



Figura 2.4: Método de contenedores

Fuente: Elaboración propia

## 2.3 DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCIÓN

En el *manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales* presentado por la *Secretaría de Desarrollo Social* (SEDESOL, 2001) se hace mención a los pasos y decisiones a tomar para diseñar un sistema de recolección eficiente.

La primera decisión es elegir el método y la frecuencia de recolección de residuos, ya que ambos factores impactan en el sistema general (modificando otras variables como el recipiente para almacenamiento, el tamaño de cuadrilla y la selección de vehículo), donde un incremento en la productividad reduciría significativamente los costos globales.

Después se deben elegir las rutas (que es una de las fases más importantes del sistema), siendo “los recorridos específicos que deben realizar diariamente los vehículos recolectores en las zonas de la localidad, donde han sido asignadas con el fin de recolectar en la mejor forma posible los residuos generados por los habitantes

de dicho sector” (SEDESOL, 2001).

El diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos consta de dos etapas principales: 1) Macro-rutas y 2) Micro-rutas, donde, en ambos casos, es necesario considerar distintos factores para su correcto funcionamiento. Se le llama **macrorutas** a la división de la ciudad en distintos sectores operativos, al total de número de camiones necesarios para cada una y a la asignación de un área a cada vehículo recolector. Esta parte, a su vez se divide en *proyecto de gabinete*, que se encarga de calcular la cantidad de basura a recolectar en cada área asignadas por cada vehículo, y el *ajuste de campo*; realiza los contornos de cada área para balancear las cantidades y nivelar las cargas de trabajo entre cuadrillas.

Por otra parte, se le llama **microruteo** al recorrido específico que deben realizar los vehículos de recolección del sector al que han sido asignados, basándose en una serie de factores variables como lo son la topografía, ancho y el tipo de calles, el método de recolección, la densidad de población y la generación de residuos sólidos.

### 2.3.1 DISEÑO DE TERRITORIOS

Para diseñar un sistema eficiente de residuos sólidos urbanos es necesario realizar tanto el macroruteo como el microruteo, por lo que, se plantea utilizar algunas herramientas matemáticas como apoyo para presentar una mejora en el sistema de recolección de una empresa que presta servicios en diversos municipios de Nuevo León. En esta investigación se pretende realizar el macro ruteo de una de las zonas de San Nicolás de los Garza para trazar territorios que cumplan con los componentes de un modelo básico de territorios, conformados por: áreas básicas, centros de territorio, número de territorios, asignación única de áreas básicas, homogeneidad, contigüidad y compacidad.

A continuación, se utiliza la figura 2.5 para presentar un ejemplo de cada uno de los componentes básicos así como también se presentan las definiciones de acuerdo

con la autora Alvarado (2017), ya que son importantes para la aplicación de un modelo básico de diseño territorial, siendo los siguientes:

- *Áreas básicas:* Un problema de territorio abarca un conjunto de áreas ubicadas en un plano con atributos cuantificables para cada una de ellas, generando las medidas de actividad de cada área, siendo un atributo necesario para calcular el tamaño de las zonas. Se identifican en la figura 2.5 como cada uno de los números que pertenecen a cada color.
- *Centros de territorios:* Un centro está asociado a cada territorio, pudiendo ser un sitio específico o el centro geográfico del territorio, predeterminado y fijo o sujeto a la planificación.
- *Número de territorios:* El diseño territorial debe contar con un número fijo de territorios establecidos. Para la figura 2.5 cada uno de los territorios representa un color distinto, teniendo 4 totales.
- *Integridad espacial:* Cada unidad básica debe ser asignado únicamente a un solo territorio, definiendo los territorios como un conjunto distinto de las unidades básicas. Aquí, se representa la integridad espacial en la figura 2.5 al asignar un solo número a cada uno de los territorios, ya que estos no pueden formar parte de dos a la vez.
- *Homogeneidad:* Es el balancear la medida de actividad en los territorios, estando definidos los tamaños de las medidas de actividad dentro de un rango establecido, cuya medida total es el contenido de áreas básicas. En este caso, se balancea la medida de actividad en la figura 2.5 de acuerdo con la cantidad de números dentro de los territorios, teniendo aproximadamente la misma cantidad dentro del rango establecido.
- *Contigüidad:* Cada territorio debe ser contiguo, siendo necesario que para cada par de unidades básicas pertenecientes a un territorio exista una ruta que las comunique. Se ve presente en cada uno de los territorios de la figura 2.5 al

estar cada una de las áreas básicas tocando a las demás dentro de un mismo territorio en alguna de sus extremidades.

- *Compacidad*: Forma territorios geográficamente compactos, disminuyendo la distancia entre unidades básicas dentro de un territorio. Esto se denota en la figura 2.5 al tener territorios aproximadamente cuadrados, por lo que la distancia entre cada uno de las áreas básicas se disminuye.

75	75	75	75	75	130	130	130	130
75	75	75	75	130	130	130	130	130
75	75	75	75	75	130	130	130	130
75	75	75	75	130	130	130	130	130
188	75	75	75	75	130	130	130	54
188	75	188	188	188	54	130	54	54
188	188	188	188	188	54	54	54	54
188	188	188	188	54	54	54	54	54
188	188	188	188	54	54	54	54	54
188	188	188	188	54	54	54	54	54

Figura 2.5: Componentes básicos de modelos de territorio

Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, el modelo de diseño de territorios y sus componentes básicos se muestran en la investigación propuesta por Alvarado (2017), cuyo fin principal es el de realizar un agrupamiento de parques para mejorar el servicio de cobertura de limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales.

Al igual que Alvarado (2017), Buhrkal *et al.* (2012) realiza un agrupamiento para reducir la cantidad de nodos a cubrir y que la solución pueda ser viable. Por otro lado, Laureri *et al.* (2015) utiliza la solución realizada por los encargados del sistema de recolección, siendo aplicada una clusterización de espacio y tiempo.

Se mencionó anteriormente que la intuición es una manera de diseñar y tomar decisiones mostrando resultados deficientes o con áreas de oportunidad. Al ser la

intuición uno de los métodos utilizados por la compañía, se presenta el modelo matemático y simulación como herramientas a utilizar debido a los beneficios que proporcionan, variando según su enfoque y características particulares.

### 2.3.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Actualmente, los algoritmos de resolución matemática cambian de acuerdo con el enfoque de optimización utilizado, dividiéndose en local, global o a qué clase de algoritmo pertenecen, teniendo como resultado los siguientes métodos. Los *métodos exactos* parten de una formulación como modelos de programación lineal y llegan a una solución factible que varía conforme a las condiciones impuestas. Las *heurísticas* son un algoritmo que permiten obtener soluciones de buena calidad en menor tiempo de ejecución, pero sin garantizar la optimalidad de la solución, dividiéndose en: 1) Constructivas, 2) De mejora y 3) Técnicas de relajación. Las *metaheurísticas* son una estrategia (heurística) donde no existe un algoritmo confiable de resolución debido a la complejidad del problema o falta de estudios en la resolución de este. Pueden ser aplicadas a problemas de *Optimización Combinatorial* con resultados cercanos al óptimo. También podemos encontrar los *algoritmos híbridos*, donde se combinan aspectos de varias heurísticas, metaheurísticas o algoritmos exactos para obtener lo mejor de ellos.

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de las distintas herramientas para la toma de decisiones

Herramienta	Ventajas	Desventajas
Modelos exactos	Solución óptima Posibilidad de encontrar respuesta infactible	Tiempo excesivo para un respuesta
Heurísticos y metaheurísticos	Resuelven problemas complejos Cumplen con los elementos de: Precisión, velocidad, simplicidad y flexibilidad	Sin valor óptimo Sin idea clara de la solución si no se compara con otra respuesta
Simulación	Fácil adaptación Experimentación rápida	Sin resultados óptimos Experimentos aislados

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2.1 se presentan algunas de las ventajas y desventajas de utilizar las diversas herramientas para la toma de decisiones. También se incluye simulación a esta tabla para comparar cuales son sus cualidades conforme a los métodos de solución.

Los métodos exactos son aquellos que parten de una formulación como modelos de programación lineal (enteros) y llegan a una solución factible, mostrando en la mayoría de los casos optimalidad. Una de las principales características de este método es que son capaces de mostrar cuando los casos no pueden tener solución, y tienen como desventaja el tiempo excesivo en obtener resultados en algunos casos.

Otro método de solución son las heurísticas y metaheurísticas, diseñados para resolver problemas difíciles de optimización. Las heurísticas son simples, fáciles de implementar, robustas y probadas como altamente efectivas en la literatura, teniendo cuatro atributos principales: precisión, velocidad, simplicidad y flexibilidad. El principal inconveniente de este tipo de solución, es que no se conoce el valor óptimo del problema y al llegar a un resultado, no se tiene una idea clara del nivel de calidad de la solución obtenida.

Por su parte, la simulación presenta mejores resultados que aquellas soluciones basadas en la experiencia del proyectista, siguiendo ciertas reglas y requiriendo un mínimo de esfuerzo, recursos económicos y materiales, siendo de fácil adaptación y teniendo resultados rápidos para distintos problemas. Sin embargo, la principal desventaja es que no se obtenga una ruta óptima como en el procedimiento actual, y cada uno de los experimentos es un caso aislado que toma consideraciones especiales.

A continuación, se presentan en la tabla 2.2 algunos de los campos de aplicación más relevantes al tema y los autores que han desarrollado investigaciones a la solución del problema para los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos. Estas investigaciones realizan propuestas con distintos métodos de solución logrando una mejora de resultados conforme a los iniciales en cada caso, mostrando cuál es el método empleado, el tipo de investigación y el idioma en el que se encuentran.

Tabla 2.2: Antecedentes de métodos de solución al problema de recolección de residuos sólidos urbanos

Autor/Método	Agrupamiento	Modelo exacto	Heurísticas y metaheurísticas	Simulación	Investigación	Idioma
(Nesmachnow et al., 2018)			x		Multi-objetivo x	Inglés
(Son & Louati, 2016)		x				Inglés
(Dotoli & Epicoco, 2017)			x			Inglés
(Das & Bhattacharyya, 2015)			x			Inglés
(Laureri et al., 2016)	x	x	x			Inglés
(Lüer et al., 2009)		x	x		Métodos solución x	Español
(Flores & Alvarez-Madrigal, 2013)			x			Español
(Kaosol, T., 2009)					Caracterización x	Inglés
(Jayokody et al., 2008)					Caracterización x	Inglés
(Phuntsho et al., 2007)					Composición x	Inglés
(Buhrkal et al., 2012)	x		x			Inglés
(Alvarado, M., 2017)	x	x	x			Inglés
(Xue et al., 2015)	x	x				Inglés
(Lee et al., 2016)		x				Inglés
(Magriña & Robusté, 1999)				x		Español

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.1 MODELOS EXACTOS

Una de las principales variantes del problema se ve abordado por Son y Louati (2016) presentando un modelo generalizado de recolección de residuos sólidos urbanos con ventanas de tiempo. El propósito es reducir tanto la distancia de viaje como las horas operacionales de los vehículos, utilizando un modelo matemático para obtener las rutas óptimas mediante tres fuentes principales de generación de residuos: calles, mercados y hoteles y restaurantes. A la par, se implementa el método cualitativo “Analytic Hierarchy Process (AHP)” para evaluar las rutas de recolección basados en cuatro criterios importantes: 1) económicos, 2) ambientales, 3) tecnológi-

cos y 4) sociopolíticos.

Otro de los estudios realizados para el problema de recolección de residuos mediante un modelo de de ruteo de vehiculos, es descrito en la literatura como “vehículos ubicados en un depósito central son utilizados para visitar clientes localizados geográficamente dispersos para satisfacer las demandas (conocidas) de los clientes” (Luer *et al.*, 2009). Por supuesto, se tienen ciertas consideraciones en el problema planteado, como que cada cliente sea visitado una sola vez por uno de los vehículos, respetando las restricciones de capacidad, los tiempos máximos permitidos de trabajo y distancias máximas recorridas, los camiones no pueden dar ciertos giros, entre otros.

En la investigación de Luer *et al.* (2009) desarrollan un modelo de programación lineal entero, donde, debido a su complejidad abordan diversas técnicas para presentar resultados. Es por eso, que, para este tipo de problemas a menudo es deseable obtener soluciones aproximadas, para que puedan ser encontradas suficientemente rápido y que sean suficientemente buenas para llegar a ser útiles en la toma de decisiones.

### 2.3.2.2 HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS

Dotoli y Epicoco (2017) también abordan el problema de ventanas de tiempo, pero desde otra perspectiva de recolección. Se presenta la variante de *Residuos Peligrosos*, mostrando una heurística para obtener las mejores rutas posibles y asignarlas a la flota de vehículos, cuyo propósito principal es minimizar la distancia recorrida, satisfaciendo los requerimientos de los clientes que le proporcione el mayor beneficio a la compañía (8 nodos en total).

El mismo problema con ventanas de tiempo, ahora estudiado por Buhrkal *et al.* (2012), utiliza la metaheurística de *Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)* para resolver dos casos diferentes, obteniendo mejoras en las rutas propuestas por

ambas compañías.

Los autores Laureri *et al.* (2015) a su vez, proponen un algoritmo para obtener la mejor solución en recolección de basura mojada. En este caso, se utiliza tanto un método exacto como una heurística “*Greedy*” que selecciona el siguiente nodo de la manera “más conveniente”, mostrando que el procedimiento propuesto obtiene resultados relevantes. Se utiliza un caso de estudio simple para comparar resultados.

Tanto Son y Louati (2016) como Buhrkal *et al.* (2012) utilizan casos de estudio aplicados con diferente método de solución para obtener un resultado del problema de ventanas de tiempo. Las diferencias principales, es que, en el primer estudio, se llega a los resultados óptimos para las rutas de los vehículos para una cantidad limitada de clientes, siendo un problema de escala pequeña (con cuatro vehículos y solo dos rutas). En el segundo, el heurístico permite incrementar la cantidad de instancias, teniendo desde medianas hasta largas escalas del problema (desde 99 hasta 2092 clientes), pero el resultado obtenido mejora aproximadamente del 30 al 45 % la solución inicial, pero sin obtener los resultados óptimos.

Con lo propuesto por Dotoli y Epicoco (2017) y Laureri *et al.* (2015), vemos que a medida que los requerimientos y especificaciones del caso de estudio incrementan, el método de solución tiende a solucionarse con una heurística para producir la opción mas viable. En el estudio de Dotoli y Epicoco (2017), la heurística presentada no funciona para cantidades grandes de clientes, mientras que los resultados propuestos por Laureri *et al.* (2015), arrojan soluciones un 4.30 % más costosas que el óptimo.

Lo presentado anteriormente, sirve para denotar la importancia tanto de la herramienta matemática a utilizar por parte de los administradores, como el conocimiento y existencia de información confiable para lograr tomar decisiones. La base para generar las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos sigue siendo la experiencia tanto de los trabajadores de las compañías recolectoras, como de los choferes de los camiones que brindan el servicio.

Son y Louati (2016), Dotoli y Epicoco (2017) y Das y Bhattacharyya (2015)

denotan la importancia de una mejora en el proceso de recolección debido a sus altos costos y grandes impactos económicos y sociales, donde con un correcto funcionamiento, se presentan mejoras en el aspecto económico, la planeación urbana y el reciclado de basura de una ciudad.

Mientras que Montero y Eslava (2016) y Buhrkal *et al.* (2012) realizan una clusterización para reducir la cantidad de nodos a cubrir y que la solución pueda ser viable, Laureri *et al.* (2015) utiliza una realizada por los encargados del sistema de recolección, tomando cada uno las consideraciones especiales de cada caso para realizar su propuesta de investigación.

Tanto Phuntsho *et al.* (2009) como P K Jayakody *et al.* (2008) determinan que la información de la composición y generación de residuos son un punto clave en el proceso de planeación, diseño e implementación de un sistema adecuado, Kaosol (2009) deja en claro que con un solo método de disposición final es muy difícil lidiar con todos los materiales de manera sustentable. Además, Kaosol (2009) y P K Jayakody *et al.* (2008) concuerdan que los sistemas deberían estar apoyados por legislaciones y regulaciones generales por parte del estado para desarrollar un sistema sostenible. Por otra parte, Laureri *et al.* (2015) denota como una tarea compleja el problema de recolección de basura para ser resuelto solo por uno de los actores involucrados, siendo necesario involucrar a todos aquellos que están relacionados con la problemática, además de enfocar la reducción de costos mediante la aplicación de métodos y tecnologías que mejoren la eficiencia en el proceso de recolección.

En general, la mayoría de las investigaciones en el campo de residuos sólidos urbanos se realiza bajo aproximaciones heurísticas o metaheurísticas, debido a la gran cantidad de variables y restricciones que presentan (Laureri *et al.*, 2015).

Es por lo anterior y que, debido a la inexistencia de algoritmos o programas para realizar las rutas de recolección de un sistema de residuos sólidos urbanos, realizando un diseño territorial y comprobando sus resultados mediante diversas herramientas matemáticas, se logrará el correcto balanceo para las unidades de servicio.

---

En el capítulo siguiente, se presentan los pasos a seguir para realizar este proceso, abarcando desde la definición de un modelo matemático, sus alcances y aplicaciones, hasta las herramientas propuestas para brindar una mejora a los niveles actuales en los que se encuentra la compañía.

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

Para resolver un problema se tienen que considerar numerosos elementos que intervienen en la toma de decisiones, siendo la intuición una de las formas más comunes que se utilizan. Debido a que cada decisión tomada sobre un asunto importante presenta distintas consecuencias y resultados, es indispensable realizar un análisis correcto de las posibles alternativas que se pueden utilizar para considerar todos los resultados posibles. Es por esto, que en el presente capítulo se incluirá un modelo matemático y un algoritmo de simulación como herramientas de soporte para la toma de decisiones, explicando cómo funcionan, cuales son algunas ventajas de su implementación, que objetivos pueden lograrse y las distintas etapas de su proceso.

### 3.1 APLICACIÓN Y ALCANCE DE UN MODELO

Los modelos matemáticos y computacionales son utilizados en distintas áreas de las ciencias y la industria por un sinnúmero de razones. Al predecir el comportamiento de un sistema bajo ciertas circunstancias particulares y representarlas bajo un lenguaje matemático, se logran distintas ventajas presentadas a continuación:

- Formular ideas y realizar suposiciones
- Al ser un lenguaje conciso, tiene reglas que pueden manipularse para obtener

resultados.

- Los resultados probados a través de los años están a la disposición de todos.
- Las computadoras pueden ser usadas para realizar cálculos numéricos.
- Se logra un entendimiento científico.
- Probar los cambios en un sistema.
- Apoya la toma de decisiones (tanto tácticas como estratégicas).

Debido a que la mayoría de los sistemas son muy complicados de modelar en su totalidad, hay distintos niveles para su correcta aplicación. El primero es identificar cuáles son las partes más importantes del sistema para ser incluidos en el modelo, mientras que lo demás se excluirá. El segundo, se refiere a la cantidad de manipulación matemática que vale la pena utilizar, aún y cuando las matemáticas tienen el potencial de probar resultados generales, estos últimos dependerán de las ecuaciones utilizadas, donde el realizar pequeños cambios en la estructura de estas ecuaciones requiere enormes cambios en los métodos matemáticos.

Los objetivos que se pueden alcanzar al realizar un modelo dependen del conocimiento del sistema y que tan bien esta realizado el modelo, siendo una consideración importante el nivel de detalle que se utiliza para la resolución del problema, ya que tiene un efecto considerable para obtener resultados con éxito.

Un modelo matemático se divide en distintas etapas para su implementación, teniendo que realizar la identificación del problema, recolección y análisis de datos, formulación y construcción del modelo, verificación y validación, experimentación, análisis de resultados, conclusiones e implementación.

## 3.2 MACRO RUTEO - DISEÑO DE TERRITORIOS

Como primer parte para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos, se planea utilizar un modelo matemático para trazar territorios y gestionar la correcta recolección de residuos, cuyo fin principal es el definir las macro rutas en una de las áreas del municipio de San Nicolás de los Garza a través de su zonificación y brindar una posible solución a la problemática que se presenta en la recolección de residuos en las casas/habitación. Al adaptar este modelo, se realizará la partición adecuada de acuerdo con el número de colonias correspondientes a cada uno de los territorios determinados por la compañía recolectora, presentando un balance en los territorios de acuerdo con los residuos generados por área básica.

### 3.2.1 MODELO MATEMÁTICO

El uso de este modelo se determinó para agrupar las zonas de una manera óptima y reducir la escala del problema debido a la gran cantidad de colonias en las que se divide el municipio, además de lograr un balanceo adecuado al considerar la medida de actividad de cada uno de los territorios. Se pretende tener un número determinado de territorios proporcionado por la compañía.

### 3.2.2 CONSIDERACIONES Y SUPUESTOS

- Cada área básica debe estar asignada a un solo territorio.
- El número de territorios es conocido y determinado de acuerdo con la compañía caso de estudio.
- La medida de actividad de casa área básica está determinada de acuerdo con el porcentaje correspondiente al número de manzanas por las que pasa cada ruta

actual en cada colonia, dividiendo el total de tonelaje recolectado por ruta entre el total de manzanas por las que pasa esa unidad, generando un porcentaje de generación y asignandolo a cada manzana de la colonia correspondiente.

### 3.2.3 NOTACIÓN MATEMÁTICA

#### Conjuntos

$I$ : Conjunto de áreas básicas,  $i \in I$

$J$ : Conjunto de centros territoriales,  $j \in J$  y  $J \subset I$

#### Parámetros

$p$ : Número de territorios (cantidad de rutas actuales).

$w_i$ : Medida de actividad (cantidad de RSU a recolectar en la colonia  $i$ ),  $i \in I$

$A = [a_{ij}]$ : Matriz de adyacencia, donde toma el valor de 1 si las colonias son adyacentes y 0 en caso contrario,  $i, j \in I$

#### Variables binarias

$x_j = 1$ , si la colonia  $j$  es un centro de territorio, 0, en caso contrario,  $j \in J$ .

$y_{ij} = 1$ , si la colonia  $i$  es asignada al centro de territorios  $j$ , 0, en caso contrario,  $i, j \in I$ .

#### Variables continuas

$w_j$ : Medida de actividad del territorio  $j$ ,  $j \in J$ .

#### Variables enteras

$h_j$ : Cantidad de vueltas de camión por territorio  $j$ ,  $j \in J$ .

**Modelo**

$$\min \sum_{j \in J} \frac{\bar{w}_j}{8.5} - h_j \quad (3.1)$$

$$\bar{w}_j = \sum_{i \in I} w_i y_{ij} \quad \forall j \in J \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.4)$$

$$h_j \leq \frac{\bar{w}_j}{8.5} \leq h_j + 1 \quad (3.5)$$

$$a_{ij} x_j \geq y_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.6)$$

$$x_j \leq y_{jj} \quad \forall j \in J \quad (3.7)$$

$$x_j, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.8)$$

$$\bar{w}_j \in \mathbb{R} \quad \forall j \in J \quad (3.9)$$

$$h_j \in \mathbb{Z} \quad \forall j \in J \quad (3.10)$$

La función objetivo 3.1 minimiza la cantidad de sobrecarga entre el tonelaje de carga «idóneo» de un camión, buscando acercarse lo más posible a la cantidad de 8.5 toneladas o un múltiplo de este número. La restricción 3.2 calcula la cantidad promedio de medida de actividad de cada territorio. La restricción 3.3 determina que el número de centros instalados sea igual al número de territorios requeridos por la compañía. La restricción 3.4 obliga a todas las unidades básicas a ser asignadas a un único centro de territorio. La restricción 3.5 limita a un solo valor que sea mayor que  $h_j$  y el número entero siguiente. La desigualdad 3.6 establece que una unidad es asignada a un centro de territorio solo si esta es contigua a ese centro. La desigualdad 3.7 determina que si un distrito es centro de territorio, pertenece al mismo. Las restricciones 3.8, 3.9 y 3.10 definen la naturaleza de las variables.

Debido a que la compañía caso de estudio no utiliza alguna zonificación en particular, se desarrolla la metodología con el total de colonias del municipio de San Nicolás de los Garza, esto con el propósito de determinar una serie de pasos a seguir

para desarrollar una propuesta que sirva de base para los distintos municipios en donde tiene presencia la compañía, utilizando este modelo con el objetivo de reducir la complejidad del problema al realizar una agrupación de colonias.

### 3.3 SIMULACIÓN

Debido a que la recolección de residuos sólidos urbanos es una tarea compleja y un escenario de cambios constantes, se complementa el modelo de diseño de territorios empleado en la sección anterior, cuyo fin primordial es el de diseñar territorios lo más balanceados posibles de acuerdo con la capacidad de carga de las unidades de servicio, con la simulación, esto con el propósito de variar los distintos escenarios de generación de residuos por área básica y así lograr determinar los territorios de la manera más cercana a la realidad.

El modelo exacto y simulación son las herramientas utilizadas para desarrollar la metodología propuesta. Primero, se propone un rediseño de macro ruteo al sistema actual de recolección en una de las áreas del municipio de San Nicolás de los Garza, presentando el modelo de diseño de territorios que genere zonas balanceadas. Después, se realizará una variación de generación de residuos en cada colonia, esto para considerar más escenarios ya que hay diversas situaciones que afectan el índice de generación en una zona. Es importante recordar que los nuevos territorios formados después de la simulación, son territorios lo más cercanos a la realidad posible, ya que al considerar más escenarios de generación de residuos en las distintas unidades básicas nos ayuda a predecir un mejor comportamiento del índice de generación que si solo utilizáramos el modelo de territorios por su cuenta.

Al tener nuestros territorios propuestos por el modelo exacto, se realiza el rebalanceo al utilizar simulación, cuyo proceso consta de tres pasos principales: el primero, busca los territorios que tengan algún exceso, selecciona alguno, y después selecciona un territorio contiguo que presente déficits en la carga. Al tener ambos

territorios conectados, se hace un cálculo de cuanta medida de actividad transferir del exceso al déficit, siendo el valor mínimo entre lo que le sobra al exceso o lo que le falta al déficit para entrar en balance, modificando la situación de alguno de los dos. Después de este primer paso, se realiza la transferencia y se hace una actualización de los nuevos valores del exceso, del déficit, y el porcentaje que se le retiro conforme a su medida de actividad inicial.

Al terminar el proceso anterior, pueden ocurrir tres situaciones:

- Se terminan los excesos
- Se terminan los déficits
- O todos los territorios se balancean

Si todavía hay excesos, se repite el mismo proceso mencionado anteriormente. Primero, busca los territorios que tengan algún exceso, selecciona alguno, y después selecciona un territorio contiguo que presente balance en su carga. Segundo, se hace un cálculo de cuanta medida de actividad transferir del exceso al territorio balanceado, siendo el valor mínimo entre lo que le sobra al exceso para balancearse, o lo que le falta al balanceado para llegar a su límite superior de balance, modificando la situación de alguno de los dos. Como tercer paso, se realiza la transferencia y se hace una actualización de los nuevos valores del exceso, del balanceado, y el porcentaje que se le retiro y agrego conforme a su medida de actividad inicial.

Por otro lado, si todavía se presentan déficits, el procedimiento es el siguiente. Primero, busca los territorios que tengan algún déficit, selecciona alguno, y después selecciona un territorio contiguo que presente balance en su carga. Segundo, se hace un cálculo de cuanta medida de actividad transferir del territorio balanceado al déficit, siendo el valor mínimo entre lo que le sobra al territorio balanceado para llegar a su límite inferior de carga, o lo que le falta al déficit para llegar a balancearse, modificando la situación de alguno de los dos. Como tercer paso, se realiza la transferencia y se hace una actualización de los nuevos valores del balanceado, del déficit,

y el porcentaje que se le retiro y agrego conforme a su medida de actividad inicial a cada territorio.

Con lo anterior, se espera que la metodología propuesta logre un rediseño a los territorios que se utilizan actualmente en su sistema de recolección de residuos sólidos urbanos, disminuyendo las unidades que presentan daños por sobrecarga de residuos en las rutas de recolección y disminuyendo el tiempo total de recorrido de las distintas unidades. Además, al complementar el modelo con simulación, se logrará obtener mejores resultados que los propuestos solamente por el modelo, ya que aumenta la cantidad de territorios que se encuentren dentro del balance final.

A continuación, se presenta el algoritmo 1 para modificar los territorios con-

forme a los distintos escenarios de generación de residuos sólidos urbanos:

---

**Algorithm 1:** Transferencia de kilogramos entre territorios

---

```
Inicio;
while  $e > 0$  y  $d > 0$  do
  Seleccionar aleatoriamente un territorio exceso
  Obtener territorios contiguos
  Obtener un territorio contiguo aleatorio con déficit
  Determinar transferencia
  Modificar territorios
  if  $e > 0$  then
    Seleccionar aleatoriamente un territorio exceso
    Obtener territorios contiguos
    Obtener un territorio contiguo aleatorio balanceado
    Determinar transferencia
    Modificar territorios
  else
    Seleccionar aleatoriamente un territorio balanceado
    Obtener territorios contiguos
    Obtener un territorio contiguo aleatorio con déficit
    Determinar transferencia
    Modificar territorios
  end
end
```

**Result:** Territorios balanceados

Fuente: Elaboración propia

---

## CAPÍTULO 4

# CASO DE ESTUDIO

---

En este capítulo se muestra una breve descripción del municipio en el cuál fue aplicado el modelo matemático y simulación, algunas características y datos importantes de la compañía que brinda el servicio, además de la descripción de las herramientas utilizadas para la obtención y manejo de datos. Posteriormente se muestran las pruebas y experimentaciones llevadas a cabo.

### 4.1 MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS DE LOS GARZA

En México, se recolectan diariamente alrededor de 86 mil 343 toneladas de basura provenientes de viviendas, edificios, calles, avenidas, parques y jardines. Nuevo León forma parte de una de las siete entidades en donde se genera más de la mitad de basura de todo el país, encontrándose en primer lugar la Ciudad de México, en segundo, el Estado de México, en tercero, Jalisco, en cuarto, Veracruz, en quinto, Guanajuato, en sexto, Tamaulipas, y en séptimo, Nuevo León.

Uno de los municipios pertenecientes a este estado y que se posiciono en el segundo lugar como uno de los municipios con mayor calidad de vida de acuerdo con el Gabinete de Comunicación Estratégica, es San Nicolás de los Garza, con una población total de 443 mil 273 personas. Por su parte, el total de hogares y viviendas

particulares habitadas es de alrededor de 113,548, con un promedio de 4 personas en cada hogar.

## 4.2 COMPAÑÍA RECOLECTORA DE RESIDUOS

La compañía encargada de brindarnos información para realizar nuestra investigación, tiene más de 22 años prestando el servicio en el país en alguno de sus tres principales unidades de negocio: Recolección domiciliaria, recolección industrial y comercial y disposición final.

Para nuestra área de enfoque de recolección de residuos sólidos urbanos, la compañía cuenta con más de 12 años brindando el servicio en el municipio de San Nicolás de los Garza, encargándose de la recolección de la basura del hogar, entre los cuales se encuentran la comida, desperdicios, plásticos, aluminio, cartón, envases de vidrio y papel.

Además de tener presencia en este municipio, sus servicios se extienden en otros estados y dependencias municipales como:

- Apodaca
- Juárez
- Monterrey
- San Pedro
- Santa Catarina
- Campeche
- Durango
- Querétaro y;

- San Luis

La elección de la aplicación de un modelo matemático y simulación para la recolección de residuos sólidos urbanos en una de las zonas trazadas por la compañía se debe principalmente a que San Nicolás es el municipio clave a la hora de brindar este servicio. Esto, debido a que utilizan este municipio como base para la toma de decisiones respecto a los otros municipios, ya que este es el que tiene mayor control en sus procesos, tiempos, distancias y operación, además de tener bien definidos sus métodos de macro y micro ruteo.

### 4.3 RECOPIACIÓN DE DATOS

Las herramientas que se utilizaron para la recopilación de datos para esta investigación fueron: entrevistas con diversos encargados de la compañía (supervisores de rutas, jefe de operaciones del municipio y el gerente de la recolección domiciliaria), manejo de su base de datos, datos del municipio y Excel.

Las entrevistas y las visitas nos permitieron obtener información acerca de la forma en que trazan el macroruteo del municipio, donde San Nicolás cuenta con 4 zonas (*Mirador, República Mexicana, Constituyentes y Casa Blanca*) y cada una de ellas está dividida en 20 rutas encargadas de realizar el 100% de la recolección de residuos urbanos. En la figura 4.1 se muestran las rutas que conforman la zona de República Mexicana, donde la compañía nos proporcionó la cantidad de colonias a las que les brindan el servicio de recolección y en la tabla 4.1 se muestran los tres escenarios que se consideraron como la generación de basura, donde los datos de dicha recolección son solamente una instancia de todas las recopiladas por cada ruta.

Rutas / Escenario	Generación mínima	Generación promedio	Generación máxima
Ruta 1	6720	9772	14620
Ruta 2	7040	12073	17820
Ruta 3	5250	9304	14240
Ruta 4	7640	11556	16710
Ruta 5	6890	10782	16340
Ruta 6	4440	10687	17130
Ruta 7	7370	11044	16230
Ruta 8	2900	10926	16700
Ruta 9	5650	10042	15080
Ruta 10	5670	9436	14340
Ruta 11	2850	10633	18960
Ruta12	2510	11670	19080
Ruta 13	6220	10788	15770
Ruta 14	6170	11212	16190
Ruta 15	7530	11823	17730
Ruta 16	7770	15044	20830
Ruta 17	7490	11444	16490
Ruta 18	6160	11446	18120
Ruta 19	6870	11389	16060
Ruta 20	6330	11268	18530

Tabla 4.1: Escenarios de generación de residuos sólidos urbanos

Fuente: Elaboración propia con información de compañía recolectora

Si bien el municipio cuenta con una delimitación distrital por parte de gobierno, la compañía define sus propias zonas de recolección de acuerdo con sus criterios, donde, al estudiarlos, surge nuestra propuesta de investigación al obtener un diseño de territorios que realice un balance de residuos sólidos urbanos para su recolección.

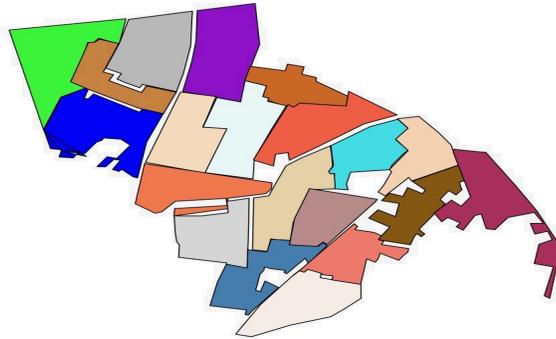


Figura 4.1: Rutas de Recolección de República Mexicana, 2019

Fuente: Compañía recolectora

## 4.4 PRUEBAS Y EXPERIMENTACIONES

Para el modelo exacto se realizaron pruebas de programación en GAMS, que es el software utilizado para resolver este tipo de problemas caracterizados con el uso de datos reales. GAMS fue utilizado con CPLEX versión 12, y se corrió en una computadora Intel Xeon E5-2697v2 2.7GHz con 12 cores cada uno, una memoria RAM de 64 gb y un disco duro de 1 Tb.

Para la parte de la simulación, se obtuvieron los resultados del programa de GAMS de los territorios correspondientes a cada escenario, y se realizó una variación del porcentaje (%) de actividad a los territorios con excesos o con déficits, buscando balancearlos y obtener la carga idónea para cada territorio.

## 4.5 RESULTADOS MODELO

Para el modelo de GAMS, se realizaron algunas pruebas tomando en consideración los supuestos vistos en el capítulo anterior, considerando como áreas básicas las 94 divisiones de las distintas colonias obtenidas de la zona de república mexicana en San Nicolás de los Garza, la cantidad total de vueltas disponibles de los camiones y la matriz de adyacencia de las colonias conforme a especificaciones de la compañía (cruzar las avenidas principales solo en algunos casos).

Como resultados principales, se presentan a continuación los territorios generados para cada uno de los escenarios de recolección de residuos sólidos urbanos en la zona mencionada, presentando los resultados para cada escenario de medida de actividad de cada ruta de recolección, la cantidad de vueltas de camión necesarios para recolectar el 100 % de los residuos y cuantos se encuentran en balance con respecto a la consideración de la carga.

### 4.5.1 ESCENARIO DE GENERACIÓN MÍNIMA

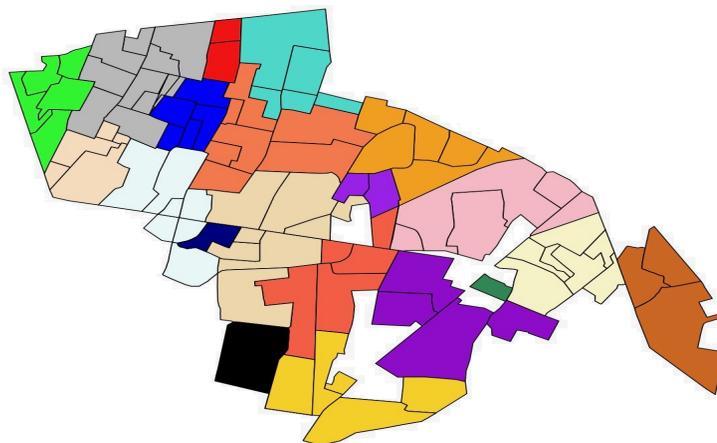


Figura 4.2: Rutas de recolección en el escenario de generación mínima, 2019

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.2 se muestran las agrupaciones de áreas básicas correspondientes del modelo para este escenario, donde cada color representa una ruta de recolección. Cada ruta esta compuesta por diversas áreas básicas y su generación de residuos difiere conforme a las demás. En la figura 4.3 se muestra una gráfica de dispersión de las medidas de actividad para cada ruta determinada por el modelo. También, el modelo define 13 vueltas de camión para brindar el servicio en este escenario, con un 40 % del total de las rutas dentro del balance de carga estimado.

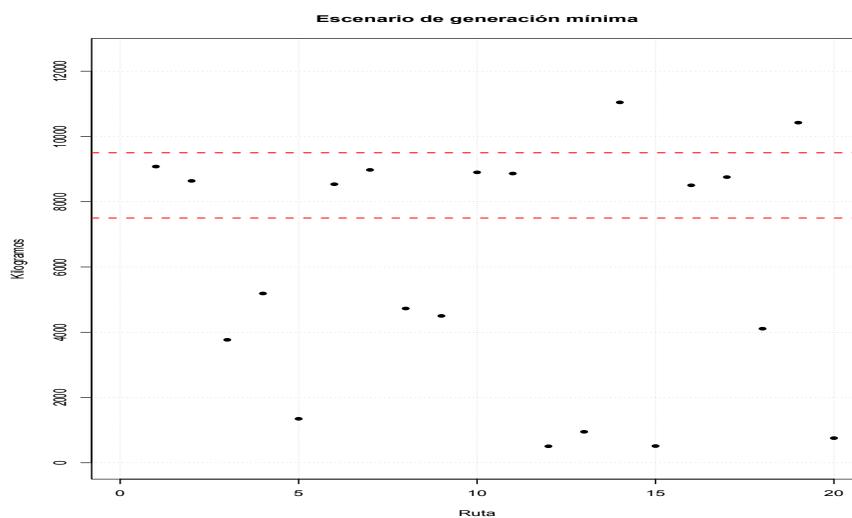


Figura 4.3: Balance de cargas aplicando un modelo matemático

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

#### 4.5.2 ESCENARIO DE GENERACIÓN PROMEDIO

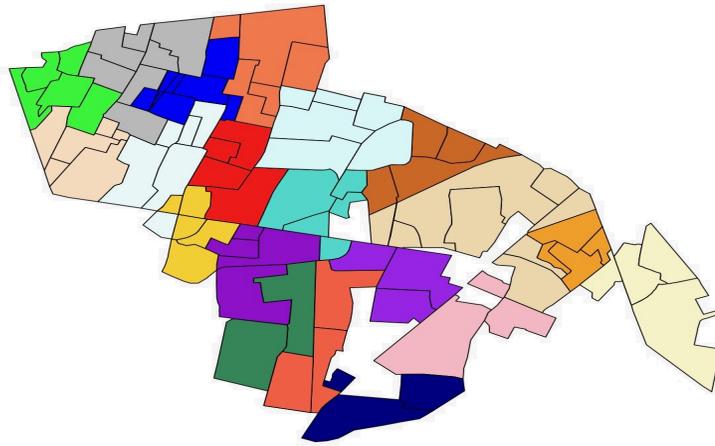


Figura 4.4: Rutas de recolección en el escenario de generación promedio, 2019

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el escenario anterior, cada color de la figura 4.4 representa una ruta de recolección de residuos sólidos urbanos determinada por el modelo. Las medidas de actividad para cada ruta se muestran en la figura 4.5, teniendo un total de 27 vueltas de camión para brindar el servicio, teniendo el 55% del total de rutas dentro del balance de carga estimado.

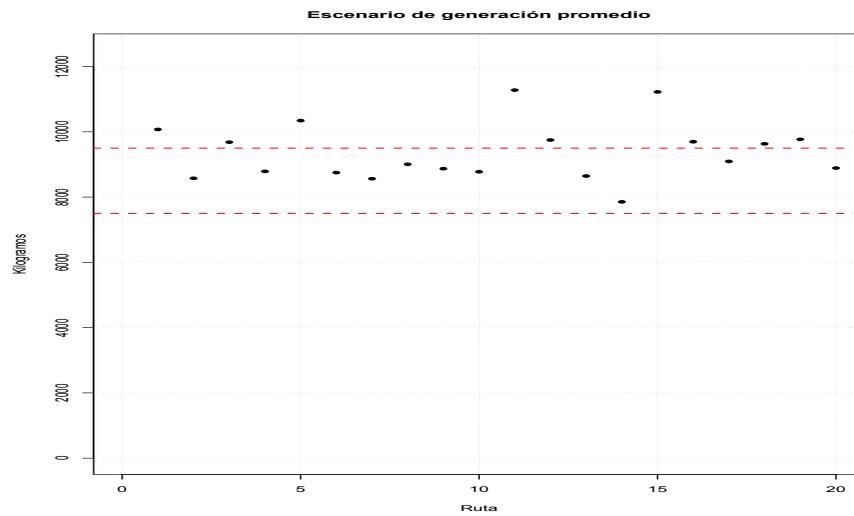


Figura 4.5: Balance de cargas aplicando un modelo matemático

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

### 4.5.3 ESCENARIO DE GENERACIÓN MÁXIMA

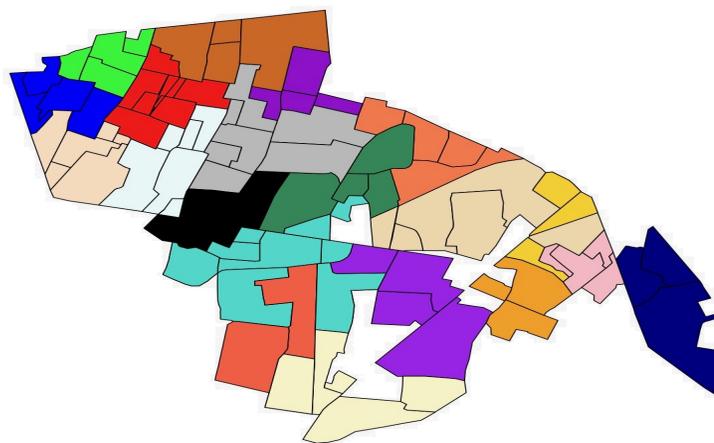


Figura 4.6: Rutas de recolección en el escenario de generación máxima, 2019

Fuente: Elaboración propia

La figura 4.6 muestra los nuevos territorios de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos de acuerdo con el modelo. En la figura 4.7 se presentan las

medidas de actividad para cada uno de los territorios formados por el modelo, teniendo un total del 80 % de los territorios balanceados conforme a sus unidades de carga. Para este escenario, el total de vueltas de camión para brindar el servicio de manera adecuada fue de 44.

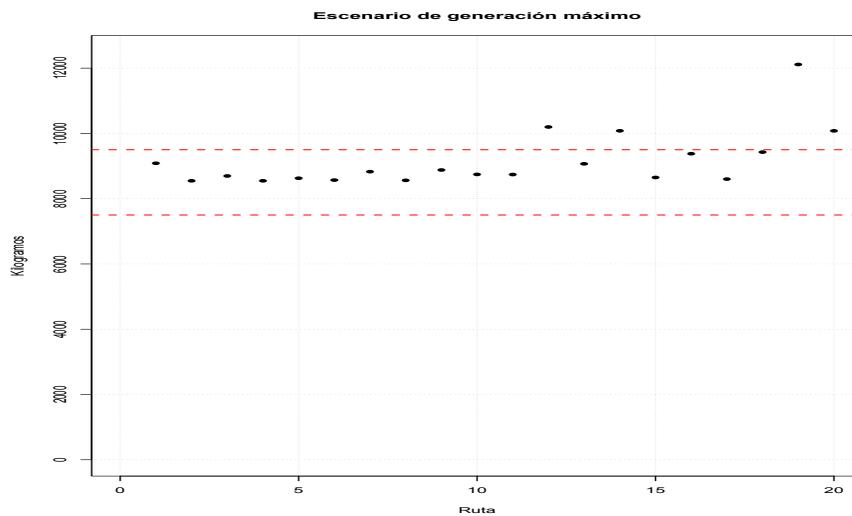


Figura 4.7: Balance de cargas aplicando un modelo matemático

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

Como resultados generales en el modelo matemático de todos los escenarios propuestos, se puede ver que:

- Si se lograran territorios perfectamente balanceados, la medida de actividad de cada territorio estaría en 8,500 kilogramos, permitiendo vueltas de camión a su capacidad ideal en cada territorio.
- Debido a que es imposible que todas las rutas cargen su capacidad ideal debido a la variación en la generación de residuos, se determinó un rango de balance marcado en las figuras 4.3, 4.5 y 4.7 por líneas punteadas rojas, teniendo un rango de carga entre el 7.5 y 9.5 toneladas.
- Al ser la zona de República Mexicana un área de generación heterogénea, y la variación de los escenarios en la generación de residuos sólidos urbanos dificulta el balancear todas las rutas de manera perfecta. Aún al incrementar el rango

de carga en una tonelada hacia arriba y hacia abajo de la capacidad ideal del camión, se pueden encontrar algunas rutas fuera del porcentaje de carga determinado para las unidades de servicio.

- En las agrupaciones de territorio, se puede apreciar que aquellos que serán cubiertos por una misma ruta están respetando la matriz de contigüidad realizada, ya que los resultados se encuentran sujeto a sus restricciones. Además, se puede notar que a medida en que los residuos de recolección aumentan, la cantidad de áreas básicas, disminuye (con excepción en las rutas aisladas de generación mínima).
- También, es importante mencionar que no necesariamente la ruta con mayor medida de actividad está ligada al territorio con la mayor cantidad de áreas básicas, esto se establece con la generación de basura por área básica.
- Con lo anterior, se puede apreciar que a medida que va creciendo la generación de residuos sólidos urbanos, la cantidad de camiones y el balance del total de las rutas, incrementa.

## 4.6 RESULTADOS SIMULACIÓN

Como un siguiente proceso, se realizó una corrida de las distintas instancias de generación de residuos sólidos urbanos para obtener mejores resultados que los anteriores. Para lograrlo, fue necesario la implementación de los resultados obtenidos de la etapa del modelo matemático con simulación. Para determinar la calidad de la respuesta conforme al balance «idóneo» del resultado, se realizó la suma de la cantidad total de kilogramos por los que se encuentra sobre o debajo de la cantidad deseada de 8.5, teniendo un rango de balance desde 7.5 hasta 9.5 toneladas.

### 4.6.1 ESCENARIO DE GENERACIÓN MÍNIMA

Al aplicar simulación a la primera instancia de recolección de residuos sólidos urbanos, se observa el balance de las rutas de recolección correspondientes a los resultados obtenidos por el modelo matemático, dando como resultado la tabla de transferencias 4.2 mostrada a continuación:

Origen	Destino	Kilogramos	Porcentaje
73	66	922	.088466
18	23	1929	.371819
57	42	600	.054328
18	12	862	.166152
30	26	525	.111040
15	4	847	.224787
59	66	513	1
54	43	637	.670526
71	70	746	.181552

Tabla 4.2: Tabla de transferencias simulación

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

En la tabla 4.2 se presentan las cantidades específicas de que territorio origen a que territorio destino mover la cantidad de kilogramos necesarios para tratar de mejorar los resultados arrojados por GAMS. Se envía la cantidad necesaria de los territorios con déficit, para que los territorios que se encuentran balanceados lleguen hasta su límite superior de carga, dejando 8 territorios con una carga de 9500 kilogramos, y una carga de 8964. El resultado total de desbalance, es de 21252 kilos, lo proporcional a tres vueltas de camión adicionales. Como resultados finales de esta instancia, se muestran los territorios resultantes del proceso de simulación que se encuentran dentro del porcentaje de carga idóneo en la figura ??

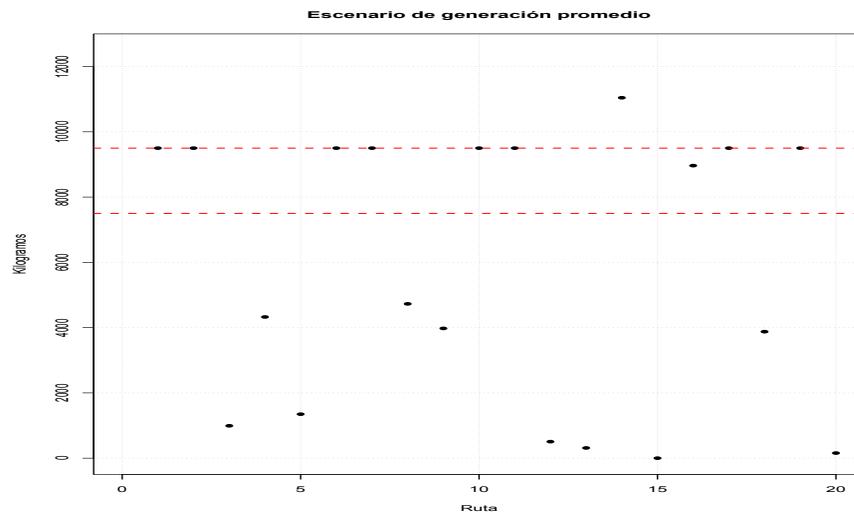


Figura 4.8: Balance de cargas aplicando simulación

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

#### 4.6.2 ESCENARIO DE GENERACIÓN PROMEDIO

Como segunda instancia, se realizó el mismo proceso al considerar los resultados obtenidos de este escenario de generación en el modelo matemático, utilizando el algoritmo de rebalanceo para cumplir con el balance de los camiones en sus rutas. El algoritmo da como resultado la tabla de transferencias 4.3, mostrando la cantidad de kilogramos a cambiar entre las rutas del territorio que presenta excesos a uno que se encuentre balanceado o que presente déficit y sea contiguo, sin exceder su límite de carga superior.

Origen	Destino	Kilogramos	Porcentaje
65	57	389	.020062
15	11	547	.018831
50	43	248	.025441
78	24	270	.027635
49	43	381	.033782
49	46	724	.064195
23	32	495	.047853
23	19	349	.033739

Tabla 4.3: Tabla de transferencias simulación

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

En la figura 4.9 se presentan los 20 territorios finales para este escenario, logrando obtener una cantidad de 16 territorios dentro de la carga «idónea» para las unidades del servicio de recolección. El desbalance final se encuentra alrededor de 3674 kilogramos, viéndose reducido substancialmente conforme al resultado anterior ya que el que se presentaba con el modelo, era de alrededor de 27,099 kilogramos antes de implementar ambos procesos, incrementando un 25 % las rutas que se encuentran balanceadas.

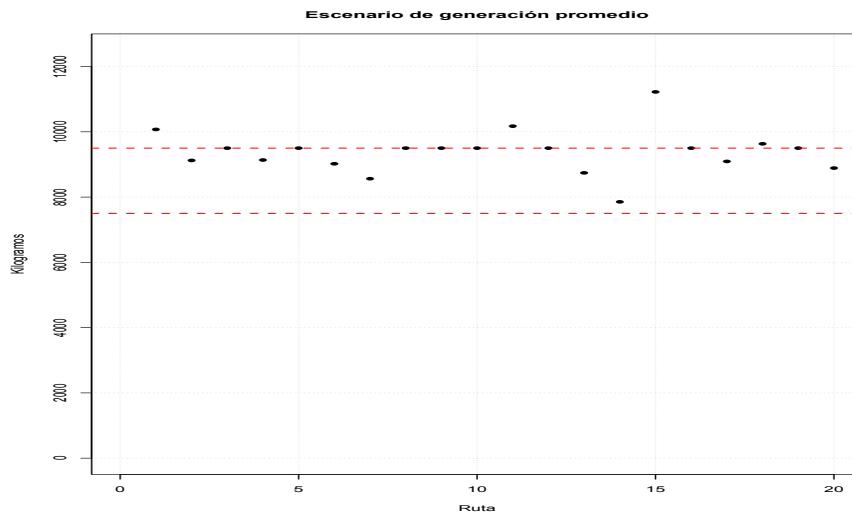


Figura 4.9: Balance de cargas aplicando simulación

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

### 4.6.3 ESCENARIO DE GENERACIÓN MÁXIMA

Como instancia final, se tomaron los datos resultantes del modelo matemático y se utilizó el algoritmo para balancear los territorios encontrados fuera del rango establecido, dando como resultados la tabla de transferencias 4.4. En este proceso, se transfiere la medida de actividad del territorio con excesos de carga a aquellas rutas de recolección que se encuentran balanceadas y contiguas, considerando el envío hasta sus límites de capacidad.

Origen	Destino	Kilogramos	Porcentaje
78	11	1608	.132760
78	26	1004	.082893
88	57	579	.057446
49	43	697	.068353
59	57	580	.057539

Tabla 4.4: Tabla de transferencias simulación

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

Como resultados finales para este escenario, en la figura 4.10 se presentan los 20 territorios establecidos por la compañía dentro del balance «idóneo», donde, en comparación con este mismo escenario antes de utilizar ambas herramientas, tenía un desbalance de 3630 kilogramos y un porcentaje de balance de rutas de 20 % inferior al presentado por la simulación.

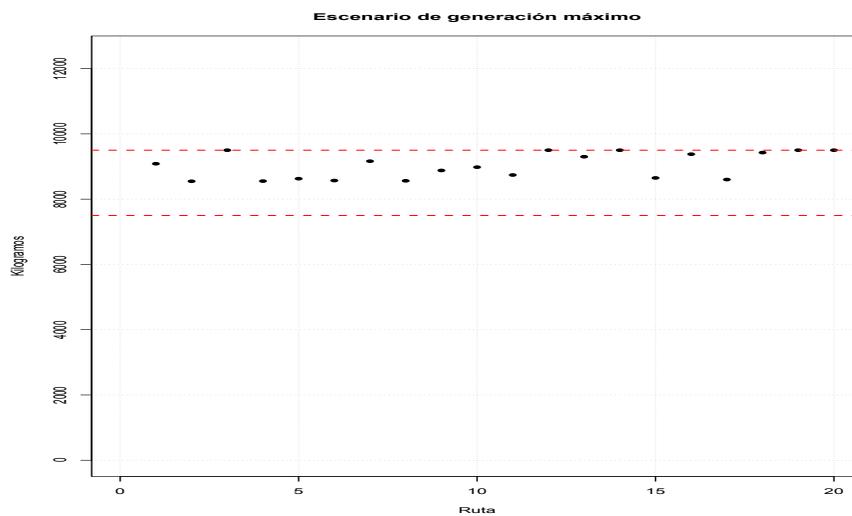


Figura 4.10: Balance de cargas aplicando simulación

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

Como resultados generales después de aplicar simulación a las tres instancias propuestas, se puede ver que:

- Los resultados obtenidos al aplicar simulación a los resultados del modelo matemático mejoran la calidad de la respuesta en todas las instancias. En la generación mínima, debido a que se llegó al límite en 8 de los 9 territorios rebalanceados y se terminaron los adyacentes, no se pudo balancear los otros territorios. En la generación promedio y máxima, los resultados mejoran en al menos un 20 % más, mostrando una mayor cantidad de territorios balanceados.
- Se logra reducir el desbalance total de los territorios conforme a la cantidad total de kilogramos que se encuentran por encima o por debajo del porcentaje de carga idóneo, reduciendo los excesos y los déficits en todos los escenarios

presentados.

- La simulación determina de que territorio origen a que territorio destino se hace la transferencia de cargas, respetando siempre la matriz de adyacencia para no tener discrepancias con la compañía, lo que mejora los resultados finales en todas las instancias de la simulación.

#### 4.6.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Como última parte de este capítulo, se realiza una comparación de los resultados mostrados por la compañía caso de estudio y simulación. En la figura 4.11 se logran identificar dos gráficas: En la primera, se puede ver como los resultados mostrados no se acercan al balance de cargas determinado entre el 111 y el 90 por ciento de la carga idónea de los camiones. En la segunda gráfica mostrada del lado derecho, podemos observar como la mayor cantidad de puntos representando a una vuelta de camión se encuentran dentro del balance de cargas mostrado entre líneas rojas.

En ambas gráficas observadas en la figura 4.11 se encuentran los tres escenarios de generación de residuos sólidos urbanos en el mismo orden:

- Generación mínima (de 0 a 20 camiones)
- Generación promedio (21 a 40 camiones)
- Generación máxima (de 41 a 60 camiones)

En cada escenario de generación se puede notar una mejoría de resultados después de aplicar la metodología propuesta. Además, se puede observar que tanto los resultados mostrados por la compañía como los propuestos por esta investigación mejoran conforme aumenta la cantidad de generación de residuos sólidos urbanos.

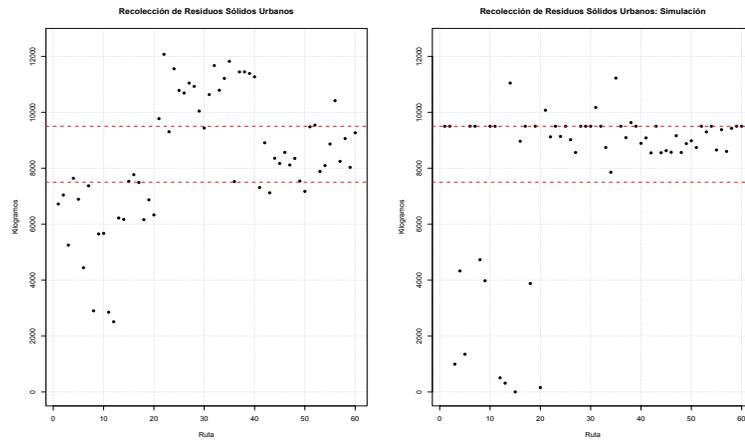


Figura 4.11: Comparación de resultados entre la Compañía y Simulación

Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

Por otro lado, con la ayuda de la figura 4.12 podemos observar cómo se reduce la variabilidad de las cargas del camión, teniendo cargas de entre el 30 y el 142 por ciento en la gráfica de la compañía (izquierda) en una gran cantidad de camiones, mientras que la carga de los camiones propuesta por la simulación, se centra la mayoría de incidencias en el límite de carga superior de los camiones, con 9500 kilogramos. Con las gráficas de la figura 4.12, podemos concluir que al rediseñar las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos actuales en el área de República Mexicana, se logra un balance de carga idóneo en las unidades que prestan el servicio de recolección para la mayor cantidad de rutas.

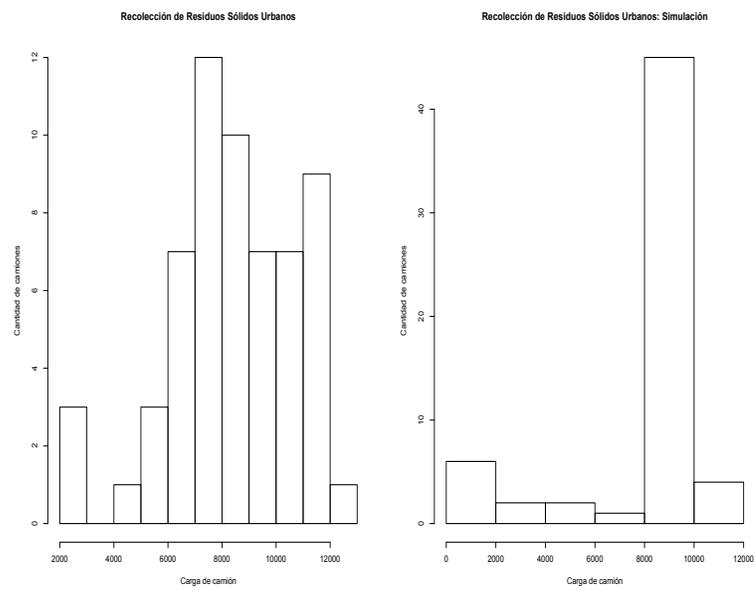


Figura 4.12: Comparación de rutas entre la Compañía y Simulación  
 Fuente: Elaboración propia con datos de la compañía caso de estudio

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

En este capítulo se presentan las conclusiones generales a las que se llegaron en esta investigación, cuáles fueron los aspectos relevantes e implementación de la metodología, así como también las contribuciones y los procesos a seguir para futuras investigaciones con respecto al tema tratado.

### 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Como se mencionó al principio de esta investigación, la logística urbana es un proceso que involucra todas las áreas que se encargan de brindar un bien o servicio a la comunidad de una sociedad. En este caso, nos enfocamos en la recolección de residuos sólidos urbanos en las casas/habitación del municipio de San Nicolás de los Garza.

En la propuesta de investigación se utilizaron diversas herramientas matemáticas para manipular la información existente de la compañía, implementando un modelo de optimización exacto y simulación para mejorar las macrorutas de recolección, cuyo objetivo principal fue el rediseñar conforme a las capacidades de sus unidades de servicio, buscando disminuir la sobrecarga y evitar daños a los camiones.

El modelo matemático se utiliza para trazar un diseño de territorios conforma-

do por distintas partes de colonias en el área de «República Mexicana» del municipio de San Nicolás de los Garza, considerando la cantidad total de residuos a recolectar por escenario de generación, la frecuencia del servicio de recolección, la capacidad de los camiones y la cantidad total de colonias de esta área. Por otra parte, se utilizó la simulación para realizar un rebalanceo de estos territorios conforme a la capacidad de carga «idónea» de los camiones.

El principal aporte de la adaptación de este modelo es la aplicación al servicio de recolección de residuos sólidos urbanos a las casas/habitación, obteniendo un cálculo más real de la medida de actividad (o cantidad de generación de residuos) por macroruta y obteniendo un balance conforme a la carga de las unidades de servicio. Con esto, se puede realizar una planeación del diseño de territorios de recolección de basura más acertada, además de ser una contribución importante para la logística urbana, ya que esta distribución de medida de actividad puede servir para futuros proyectos en esta misma área.

El servicio de recolección de basura para casas/habitación es de suma importancia para la comunidad, ya que ayuda a obtener beneficios sociales, ambientales y económicos, al ser una parte importante de la logística urbana. Es por esto, que la correcta planeación y ejecución de un sistema de recolección de residuos es una materia de estudio e investigación en diversas áreas de literatura, desde las matemáticas e ingenierías hasta las materias de ciencias sociales y economía, considerando los impactos mencionados anteriormente.

Como conclusión, se tiene que los resultados obtenidos mediante el modelo son satisfactorios en la parte computacional, distribuyendo las cargas de trabajo conforme a la cantidad de territorios y la carga de cada uno de ellos, cumpliendo con los criterios de diseño de territorios que son la contigüidad, balance, compacidad e integridad espacial. Una manera adecuada de evaluar estos criterios es a través de la inspección visual de los nuevos territorios formados, permitiendo a los tomadores de decisiones de la compañía el evaluar las distintas opciones con las que cuentan a

la hora de trazar territorios, tomando en cuenta datos cuantitativos.

Como aspecto importante de los resultados obtenidos, es asegurarse que cada territorio se encuentre dentro del porcentaje de carga idóneo considerado como «balanceado», evitando los problemas por sobrecarga donde el beneficio directo para la compañía es la disminución de mantenimientos a sus unidades de servicio.

## 5.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La implementación de los resultados obtenidos con esta metodología depende principalmente de los encargados de tomar las decisiones dentro de la compañía, donde, de acuerdo con las características utilizadas, les sirva de ayuda para mejorar su servicio de recolección al obtener territorios balanceados conforme a la carga de las unidades.

Nuestra propuesta para lograr que la compañía pueda utilizar la metodología, fue utilizar una herramienta computacional que facilite el estudio y planeación de nuevas macrorutas de recolección. Esta herramienta debe tener implementado el modelo de territorios y nuestro algoritmo de rebalanceo, brindando la facilidad de poder ingresar las características e información de cada municipio donde brindan el servicio para la generación de territorios, y así, pueda aplicarse en todas las áreas con las que cuenten información, trayendo como beneficio la carga balanceada en sus unidades de recolección, disminuyendo los daños actuales por sobrecarga en la unidad.

## 5.3 CONTRIBUCIONES

Una de las principales contribuciones fue la forma de calcular la medida de actividad de cada uno de los territorios, siendo esto la cantidad de basura a recolectar

por área, donde esta repartición sirve para que la compañía identifique aquellos territorios que son más propensos a generar una mayor cantidad de residuos y tomar las consideraciones necesarias para la correcta recolección y toma de decisiones.

También se adaptó un modelo de optimización exacto que, ayudado con esta medida de actividad, permite formar nuevos territorios con una generación de basura adecuada para brindar el servicio de manera idónea por parte de las unidades de recolección, buscando acercar estos territorios a una cantidad de alrededor de 8.5 toneladas o un múltiplo de ese número.

Además, se realizó un algoritmo de balanceo considerando diversos escenarios para los territorios obtenidos del proceso anterior, logrando partir los territorios y asignando esa partición a aquellos que son contiguos y que les permita estar dentro de un rango entre el 90 al 111 %, disminuyendo la variabilidad de carga de los camiones y los casos de sobrecarga.

Con estos procesos se realizó el rediseño al servicio de recolección de residuos sólidos urbanos en una de las áreas del municipio de San Nicolás de los Garza, cuyo objetivo final se logró al distribuir los territorios con base en su medida de actividad y la carga idónea de los camiones, buscando también que puedan realizar este mismo proceso a los distintos municipios en donde la compañía caso de estudio brinda el servicio.

## 5.4 TRABAJO A FUTURO

En el municipio de San Nicolás de los Garza, la compañía recolectora de residuos cuenta con más de 12 años prestando su servicio de manera ininterrumpida, haciendo lo necesario para recolectar el 100 % del total de los residuos, donde, si bien, con el esta investigación se puede realizar un estimado más exacto de la cantidad de residuos sólidos urbanos a recolectar por cada casa/habitación, es importante destacar que cada área de la prestación del servicio cuenta con distintas características

en cuanto a la generación y composición de basura.

Debido a la falta de información por parte del gobierno y de las distintas compañías de recolección en México, sería importante considerar en investigaciones futuras la separación de residuos sólidos urbanos en las casas/habitación para ver cómo se comporta la distribución de residuos por territorio, ayudando a determinar futuras planeaciones de acuerdo con otros temas relacionados, como el reciclaje de residuos o la toma de decisiones en cuanto a la disposición final de residuos en su sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- ALVARADO, M. (2017), *Diseño de territorios para la recolección de residuos sólidos en áreas municipales*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- BUHRKAL, K., A. LARSEN y S. ROPKE (2012), «The Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context», *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **39**, pág. 241–254.
- CHRISTOPHER, M. (2011), *Logistics supply chain management*, cuarta edición, Prentice Hall, México, DF.
- CSCMP (2013), «Supply Chain Management Terms and Glossary», .
- DAS, S. y B. K. BHATTACHARYYA (2015), «Optimization of Municipal Solid Waste Collection and Transportation Routes», *Waste Management*, **43**, págs. 9 – 18, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15004432>.
- DOF (2004), «Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003», .
- DOTOLI, M. y N. EPICOCO (2017), «A Vehicle Routing Technique for Hazardous Waste Collection», *IFAC-PapersOnLine*, **50**(1), pág. 9694 – 9699, 20th IFAC World Congress.
- HESSE, M. (1995), «Urban Space and Logistics: on the Road to Sustainability», *World Transport Policy Practice*, **1**(4), págs. 39–45.
- KAOSOL, T. (2009), «Sustainable Solutions for Municipal Solid Waste Management in Thailand», *World Acad Sci Eng Technol*, **60**, págs. 534–539.

- LAURERI, F., R. MINCIARDI y M. ROBBA (2015), «An algorithm for the Optimal Collection of Wet Waste», *Waste management (New York, N.Y.)*, **48**.
- LUER, A., M. BENAVENTE, J. BUSTOS y B. VENEGAS (2009), «El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución, estado del arte», .
- MONTERO, J. y A. ESLAVA (2016), «La logística urbana, la ciudad logística y el ordenamiento territorial logístico», *Revista especializada en tecnologías transversales de la organización*, **4**(4), págs. 21–40.
- P K JAYAKODY, K., L. JAYAKODY, A. KARUNARATHANA y B. BASNAYAKE (2008), «Municipal Solid Waste Management System And Solid Waste Characterization At Hikkaduwa Secretariat, Galle, Sri Lanka», .
- PHUNTSHO, S., I. DULAL, D. YANGDEN, U. M TENZIN, S. HERAT, H. SHON y S. VIGNESWARAN (2009), «Studying Municipal Solid Waste Generation and Composition in the Urban Areas of Bhutan», *Waste management research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, **28**, págs. 545–51.
- QUAK, H. (2008), *Sustainability of Urban Freight Transport Retail Distribution and Local Regulations in Cities*, Tesis Doctoral, Erasmus University Rotterdam.
- ROBUSTÉ, F., J. CAMPOS y D. GALVÁN (1999), «Nace la Logística Urbana», .
- SALDAÑA, C., I. PAZ, H. ROSALES, S. RUTH y M. FERNÁNDEZ (2019), «Modelo de gestión integral de residuos sólidos urbanos hacia la sustentabilidad de la ciudad de tepic», .
- SEDESOL (2001), «Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales», .
- SEMARNAT (2015), «Informe de la situación del medio ambiente en México», *Informe técnico*.

---

SON, L. H. y A. LOUATI (2016), «Modeling Municipal Solid Waste Collection: A Generalized Vehicle Routing Model with Multiple Transfer Stations, Gather Sites and Inhomogeneous Vehicles in Time Windows», *Waste Management*, **52**, págs. 34 – 49.

TANIGUCHI, E. y R. VAN DER HEIJDEN (2010), «An Evaluation Methodology for City Logistics», *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, **20**(1), págs. 65–90.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

Erick Orlando De Hoyos Argueta

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Logística y Cadena de Suministro  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE  
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Hijo de Santiago de Hoyos Aguilar y Juanita Argueta Estebes, nacido el 24 de agosto de 1994 en Monterrey, Nuevo León. Titulado como Licenciado en Negocios Internacionales por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey.