



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA DE SISTEMAS – INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**INFLUENCIA DEL TRÁNSITO VEHICULAR SOBRE LA DISTRIBUCIÓN URBANA  
DE MERCANCÍAS EN LA ZMCM**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**JULIO CÉSAR GALLO RIVERA**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2014**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. ACOSTA FLORES JOSÉ JESÚS

Secretario: M.I. FUENTES ZENÓN ARTURO

Vocal: M.I. SOLER ANGUIANO FRANCISCA IRENE

1 er. Suplente: DR. ACEVES GARCÍA RICARDO

2 d o. Suplente: M.I. RIVERA COLMENERO JOSÉ ANTONIO

Lugar donde se realizó la tesis: México, D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

M.I. Francisca Irene Soler Anguiano

-----  
**FIRMA**

***A mi familia, gracias por su apoyo incondicional y por siempre confiar en mí.***

***A mi mamá y a mi papá, por estar a mi lado en momentos difíciles, por alentarme a seguir adelante y nunca darme por vencido pero sobre todo por ayudarme a hacer mis sueños realidad.***

***A mi hermana y a mi hermano, por ser mis ejemplos a seguir.***

## AGRADECIMIENTOS

A la UNAM por la educación de calidad recibida.

Al CONACyT por la beca otorgada.

A la M.I. Francis Soler por todo su tiempo y paciencia, por apoyarme en todo momento, pero sobre todo gracias por nunca dudar de mí.

Al M.I. Arturo Fuentes Zenón por sus excelentes cátedras, charlas, recomendaciones, chistes...

Al M.I. José Antonio Rivera Colmenero por su interés en el aprendizaje de los alumnos y por los atinados comentarios y observaciones del presente trabajo de investigación.

A los Dres. José Jesús Acosta Flores y Ricardo Aceves García por ser grandes ejemplos en la Facultad de Ingeniería.

A todos mis amigos, por sus consejos, por su tiempo, por los momentos de ocio y diversión, por ayudarme en la búsqueda de información, por las observaciones sobre el trabajo de investigación, por su amistad incondicional.

A todos mis profesores de la maestría, sin duda alguna me llevo grandes enseñanzas y experiencias de vida.

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS.....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1 “PANORAMA GENERAL DE LA ZMCM”.....</b>	<b>3</b>
1.1 Características geográficas, demográficas, económicas y sociales de la ZMCM.....	3
1.2 Parque vehicular en la ZMCM y sus características .....	8
1.2.1 Inventario vehicular .....	8
1.2.2 Edad promedio y otras características .....	9
1.2.3 Tecnologías de vanguardia.....	10
1.3 Tránsito vehicular.....	14
1.3.1 Inventario de vialidades .....	14
1.3.2 Movilidad en la ZMCM .....	17
1.3.3 Manifestaciones, plantones y movilizaciones.....	18
1.3.4 Restricciones viales.....	19
1.4 Contaminación atmosférica.....	20
1.4.1 Programa para contingencias ambientales atmosféricas.....	20
<b>CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO” .....</b>	<b>22</b>
2.1 Distribución urbana de mercancías .....	22
2.1.1 ¿Qué es la distribución urbana de mercancías? .....	22
2.1.2 Actores de la distribución urbana de mercancías .....	24
2.1.3 Problemática asociada a la distribución urbana de mercancías.....	26
2.1.4 Actualidad en la distribución urbana de mercancías .....	30
2.2 Decisiones sobre transporte y almacenaje en la DUM.....	35

2.2.1 El proceso de diseño de rutas .....	36
2.2.2 Métodos para el diseño y optimización de rutas .....	37
2.2.3 Software para diseño y optimización de rutas .....	40
2.3 Decisiones sobre almacenaje en la distribución urbana de mercancías .....	41
2.3.1 Generalidades del almacenaje en la distribución urbana de mercancías .....	42
2.3.2 Métodos para determinar la localización de infraestructura .....	45
2.4 Ciclos de manejo .....	47
2.4.1 ¿Qué son los ciclos de manejo? .....	47
2.4.2 ¿Para qué se utilizan los ciclos de manejo? .....	48
2.4.3 El desarrollo de los ciclos de manejo .....	50
2.4.4 Ciclos de manejo en el mundo .....	53
<b>CAPÍTULO 3 “METODOLOGÍA” .....</b>	<b>55</b>
3.1 Metodología .....	55
3.2 Colaboración en el desarrollo de los experimentos .....	57
3.3 Equipo y software utilizados.....	58
3.3.1 Vehículo utilizado.....	58
3.3.2 Sistema de posicionamiento .....	59
3.3.3 Software .....	60
3.4 Experimento I .....	61
3.5 Experimento II .....	63
3.6 Experimento III .....	64
<b>CAPÍTULO 4 “ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y PROPUESTA DE ESTRATEGIAS” .....</b>	<b>68</b>
4.1 Análisis de información .....	68
4.1.1 Experimento I, tratamiento estadístico .....	68
4.1.2 Experimento II, tratamiento estadístico.....	70
4.1.3 Experimento III, procesamiento de información .....	72
4.2 Propuestas.....	81
4.2.1 Cuadrícula de tránsito de la ZMCM.....	82
4.2.2 Diseño de rutas incorporando el criterio de velocidad de tránsito .....	85

4.2.3 Localización de centros de carga de pedidos con base en la cuadrícula de tránsito.....	87
<b>CAPÍTULO 5 “CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO” .....</b>	<b>91</b>
5.1 Conclusiones .....	91
5.2 Trabajo futuro .....	92
REFERENCIAS .....	94
ANEXO A “TABLAS PARA LA REALIZACIÓN DE RECORRIDOS” .....	98
ANEXO B “VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS, EXPERIMENTO I” .....	100
ANEXO C “VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS, EXPERIMENTO II” .....	104
ANEXO D “LA ZMCM Y LA ZMVM” .....	107
ANEXO E “ANOVA Y PRUEBAS PARA LA VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS” .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 “ZMCM”.....	3
FIGURA 2 “URBANIZACIÓN EN LA ZMCM” .....	4
FIGURA 3 “TIPOS DE PROPULSIÓN EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS” .....	12
FIGURA 4 “VEHÍCULO ELÉCTRICO DE REPARTO” .....	13
FIGURA 5 “VIALIDADES PRINCIPALES EN LA ZMCM” .....	16
FIGURA 6 “REPRESENTACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO” .....	22
FIGURA 7 “INVENTARIO DE EMISIONES DEL AÑO 2012” .....	27
FIGURA 8 “ATENUACIÓN DEL RUIDO CONFORME A LA DISTANCIA” .....	28
FIGURA 9 “TRÁNSITO CITADINO” .....	29
FIGURA 10 “TRANSPALETA EN CURITIBA, BRASIL ” .....	33
FIGURA 11 “ELECTROBICICLETA DE CARGA” .....	34
FIGURA 12 “MÉTODO DEL BARRIDO” .....	38
FIGURA 13 “PLATAFORMA LOGÍSTICA URBANA. CORTE TRANSVERSAL Y VISTA SUPERIOR” .....	44
FIGURA 14 “CICLO DE MANEJO DESARROLLADO POR LA EPA” .....	48
FIGURA 15 “FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN” .....	51
FIGURA 16 “REPRESENTACIÓN DE LA TÉCNICA CHASE CAR” .....	52
FIGURA 17 “IMAGEN DEL TIPO DE VEHÍCULO UTILIZADO” .....	58
FIGURA 18 “RUTA A” .....	62
FIGURA 19 “RUTA B” .....	66
FIGURA 20 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD DE ACCESO CONTROLADO” .....	74
FIGURA 21 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: ARTERIA PRINCIPAL” .....	76
FIGURA 22 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: EJE VIAL ” .....	78
FIGURA 23 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: SECUNDARIA” .....	80
FIGURA 24 “PROCESO DE GENERACIÓN DE UNA CUADRÍCULA DE TRÁNSITO” .....	84
FIGURA 25 “PROCESO DE DISEÑO DE RUTAS INCLUYENDO LA VELOCIDAD MEDIA COMO FACTOR DE DECISIÓN” .....	86
FIGURA 26 “PROCESO DE LOCALIZACIÓN DE UNA MPLU CON BASE EN LA CUADRÍCULA DE TRÁNSITO” .....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 “PARQUE VEHICULAR EN LA ZMCM” .....	8
TABLA 2 “VEHÍCULOS DE CARGA EN LA ZMCM” .....	9
TABLA 3 “INVENTARIO DE VIALIDADES” .....	15
TABLA 4 “VELOCIDAD MEDIA A TRAVÉS DE LOS AÑOS” .....	18
TABLA 5 “COMPARACIÓN DE SOFTWARE” .....	60
TABLA 6 “CARACTERÍSTICAS DE RUTA B” .....	66
TABLA 7 “DATOS DEL EXPERIMENTO I” .....	69
TABLA 8 “ANOVA DEL EXPERIMENTO I” .....	70
TABLA 9 “DATOS DEL EXPERIMENTO II” .....	71
TABLA 10 “ANOVA DEL EXPERIMENTO II” .....	72
TABLA 11 “PRUEBA T DEL EXPERIMENTO II” .....	72
TABLA 12 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: ACCESO CONTROLADO” .....	73
TABLA 13 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: ARTERIA PRINCIPAL” .....	75
TABLA 14 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: EJE VIAL” .....	77
TABLA 15 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: SECUNDARIA” .....	79

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las grandes metrópolis presentan un sinnúmero de problemas debido a la gran cantidad de personas que en ellas habitan. La necesidad de servicios, alimentos, artículos de primera necesidad, entre otros productos que necesitan ser distribuidos por toda la mancha urbana, son motivos por los cuales todos los días existe un gran número de reparto de mercancía en toda la ciudad. Además, el crecimiento poblacional implica un aumento en la cantidad de vehículos automotores circulando a diario por las calles y, por ende, un aumento del tránsito en las ciudades. Esto retrasa la distribución de los artículos que se necesitan día con día en la ciudad, haciendo que su entrega sea lenta y costosa.

La presente investigación tiene como objetivo principal el **proponer nuevas estrategias en el proceso de distribución urbana de mercancías, con base en el comportamiento particular del tránsito vehicular en la ZMCM**. Esto se justifica debido a que en la actualidad el trazado de rutas para la DUM es basado principalmente en optimización de distancia recorrida y no son incluidos otros parámetros como tránsito en diferentes horarios del día, posibles zonas de manifestaciones, zonas de riesgo, entre otros. Dando esto como resultado una ruta que podría ser mejorada incluyendo todos estos parámetros. En este trabajo de investigación se utiliza como herramienta principal los ciclos de manejo, la cual se usa para evaluar los niveles contaminantes de los diferentes vehículos automotores. Con esta técnica se obtienen las velocidades medias con sus respectivas desviaciones estándar, si se realiza un tratamiento adecuado de la información y además muestreos en diferentes horas del día se define con buena precisión el efecto del flujo de automotores en las diferentes vialidades de la ZMCM, teniendo de esta manera un panorama más claro del comportamiento del tránsito vehicular. Con base en éste panorama y en el proceso se prevé la generación de nuevas estrategias que ayuden a mejorar el proceso en sí.

### **Los objetivos específicos de la presente investigación son:**

- Diagramar el macroproceso (genérico) que es seguido en la etapa de transporte en la distribución urbana de mercancía.
- Identificar posibles áreas susceptibles a mejora con la introducción de nuevas estrategias.
- Identificar horarios problemáticos en la ZMCM.
- Proporcionar un panorama general del tránsito vehicular a lo largo del día hábil.

## ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación consta de 5 capítulos cuyo contenido se describe a continuación.

**El primer capítulo** es una recopilación de información relevante y antecedentes sobre la zona de estudio, es de suma importancia conocer cómo ha evolucionado y se ha ido transformando con el paso del tiempo, además de observar cómo ha repercutido en la distribución urbana de mercancía.

**En el segundo capítulo** se hace referencia a la distribución urbana de mercancía, sus generalidades, los involucrados en todas las actividades del proceso, así como la problemática que envuelve a cada uno de los participantes y al proceso en general. También se hace una revisión sobre cómo tomar decisiones de localización de instalaciones y de diseño de rutas. Además de proporcionar un panorama general de la actualidad que se enfrenta en los temas de almacenaje, transporte, tecnologías de la información aplicadas a la DUM, etc. Se abordan por igual las tendencias tecnológicas actuales en el área del transporte, así como las tecnologías verdes que se han ido implementando en los últimos años por empresas socialmente responsables.

**En el tercer capítulo** se realiza una descripción detallada de la herramienta elegida para describir el comportamiento actual del tránsito en la ZMCM, los ciclos de manejo. También se proporciona una definición de ciclo de manejo, se mencionan los principales usos de la técnica, se describen las diferentes formas de obtención y se muestra un panorama mundial actual. Además, se aborda el tema de diseño de experimentos, su utilidad en la industria y en la investigación, así como, el análisis de datos relacionado con el experimento.

**En el cuarto capítulo** se presentan los experimentos realizados para describir el comportamiento del tránsito de la ZMCM utilizando como parámetro principal de comparación la velocidad media de viaje. Son tres experimentos con diferente objetivo cada uno de ellos, tomando como base algunos principios de los ciclos de manejo. Además, se muestra el análisis de resultados y se realizan propuestas al proceso de la DUM.

**En el quinto capítulo** se presentan las conclusiones y propuestas de trabajo futuro.

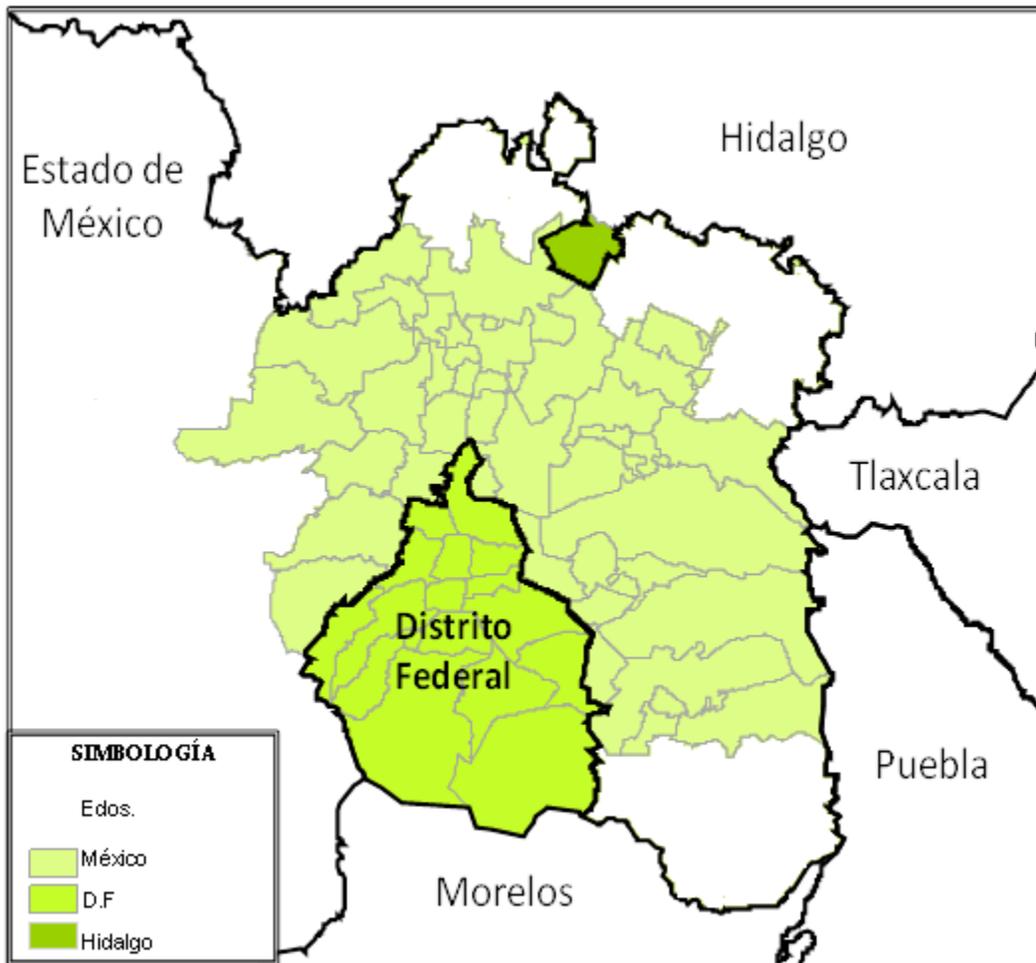
## CAPÍTULO 1 “PANORAMA GENERAL DE LA ZMCM”

### 1.1 Características geográficas, demográficas, económicas y sociales de la ZMCM.

#### Geográficas

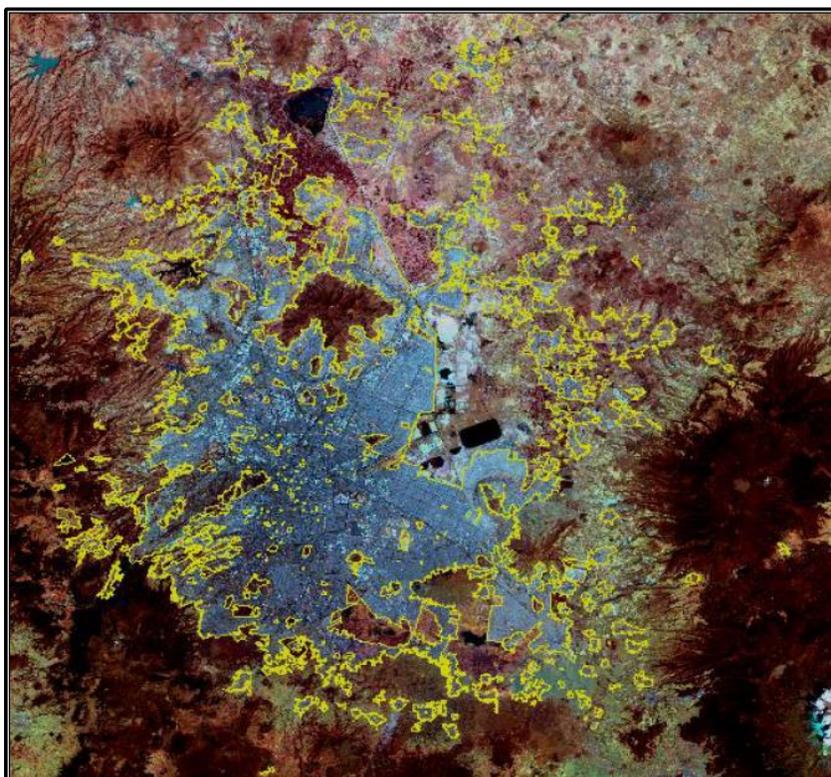
La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) está conformada por 58 municipios y delegaciones (INEGI, 2010): 16 delegaciones pertenecientes al Distrito Federal, 41 municipios pertenecientes al Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo. Conforme el paso del tiempo ha ido creciendo la mancha urbana de la ciudad, municipios que antes no se consideraban pertenecientes a la ZMCM han sido anexados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En la figura 1 se muestra la ZMCM.

FIGURA 1 “ZMCM”



Localizada dentro de los límites que marcan las coordenadas: al norte 19°54' de latitud norte en el extremo norte del municipio Zumpango, al sur 19°03' de latitud norte en el extremo sur de la delegación Milpa Alta, al este 98°38' longitud oeste en el extremo occidental del municipio Texcoco y al oeste 99°31' de longitud oeste en el extremo oriental del municipio Nicolás Romero (INEGI,2005), la ZMCM se asienta sobre la planicie aluvial a una altura promedio de 2240 msnm que dejaron los antiguos lagos de Texcoco, México, Chalco y Xochimilco en el interior de la cuenca del Valle de México la cual se encuentra en la región central del territorio nacional. Está rodeada por sistemas montañosos de grandes alturas (con alturas mayores de 4000 msnm), entre ellos destacan: al suroeste se encuentra la Sierra del Ajusco, al norte se encuentra la Sierra de Guadalupe y el Cerro del Chiquihuite, al sureste se localizan los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, al oeste se localiza la Sierra de las Cruces que marca una separación con el Valle de Toluca y dentro de la misma cuenca de la Ciudad de México se localiza el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina.

**FIGURA 2 “URBANIZACIÓN EN LA ZMCM”**



*Fuente: Tesis Doctoral “Transporte de materiales peligrosos en la ZMVM”, Muñoz 2011*

La zona donde se encuentra ubicada la Ciudad de México y su zona metropolitana abarca un área total de 4,979 km<sup>2</sup>, de los cuales, 1,484 pertenecen al Distrito Federal y 3,495 pertenecen a los municipios del Estado de México; sin embargo, la superficie urbana solo abarca un porcentaje del 36% del espacio total, es decir que en el Distrito Federal se encuentran urbanizados 794 km<sup>2</sup> y en el Estado de México 999 km<sup>2</sup> (INEGI,2003). Esto quiere decir que las poblaciones en la ZMCM no se encuentran todas unidas formando una única mancha urbana, sino que conforme se alejan del centro las poblaciones se separan unas de otras, dificultando así el trazado de rutas de distribución urbana de mercancía, debido a que se deben recorrer grandes distancias en poco tiempo. La figura 2 ilustra la urbanización en la ZMCM.

En la actualidad aún existen algunos ríos que se consideran restos de los lagos existentes en la antigüedad en la cuenca del Valle de México; sin embargo, estos ya no contribuyen al abasto de agua de la Ciudad de México puesto que por ellos circulan aguas negras. En épocas de lluvia afluentes como el río de los Remedios, el canal de la compañía, el río de la Piedad (entubado) o el río o canal Churubusco (entubado) suelen desbordarse debido a que se excede su capacidad de descarga generando inundaciones que bloquean las arterias vehiculares de alrededor provocando congestiones viales, pérdidas materiales, aumento en emisiones contaminantes, entre otros múltiples problemas.

La localización, historia y mala planeación de la Ciudad de México hace que la Distribución Urbana de Mercancías (DUM) sea una red interminable de rutas y de vehículos de reparto que generan excesiva cantidad de contaminantes emitidos. Por lo que existe una gran área de mejora de la DUM en la ZMCM. Un ejemplo de ello es que debido a la variación de terrenos que se tiene en la Cuenca del Valle de México se deben tener diferentes estrategias para cada tipo de zona, desde el tipo de vehículos utilizados hasta los horarios de reparto.

## **Demográficas**

La Ciudad de México es la cuarta metrópoli más poblada (20.8 millones de habitantes) del planeta sólo después de Tokyo, Japón (37.2 millones de habitantes), Nueva Dheli, India (24.9 millones de habitantes) y Shanghai, China (22.9 millones de habitantes). El aumento desmedido de la población genera una necesidad imperante de servicios básicos como

electricidad, agua, gas, medicinas, artículos pertenecientes a la canasta básica, etc. sobre todo en zonas suburbanas.

En los últimos años se ha presentado un crecimiento en zonas específicas del Valle de México (Cruz, 2000), al norte principalmente en los municipios del estado de México como son: Ecatepec, Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán Izcalli, Tultitlán y Naucalpan. Asimismo, también el crecimiento de la zona urbana se ha presentado en gran medida en la zona oriente en delegaciones del Distrito Federal como Iztapalapa y en municipios del estado de México como Chalco, Ixtapaluca, Chimalhuacán y Nezahualcoyotl, éste último municipio es el más densamente poblado del país con una media de 17,537 habitantes por kilómetro cuadrado (Pérez, 2011).

Existe una mayor concentración de población en las delegaciones del Distrito Federal y municipios del Estado de México ubicados al Norte y al oriente de la Ciudad de México, en ellos varios grupos inmobiliarios como Consorcio ARA, Corporación GEO, Grupo SADASI, entre otros han desarrollado proyectos habitacionales como el centro Urbano San Buenaventura en el municipio de Ixtapaluca o como el conjunto de los Héroes en Tecamac (Enguntza, 2011). Dichos conjuntos habitacionales ofrecen casas económicas y con facilidades de pago, lo que permite estén al alcance de la mayoría de la población, sin embargo su lejanía dificulta el traslado a los centros de trabajo.

La expansión de viviendas en los márgenes de la ZMCM genera la proliferación de pequeños negocios (tienditas de esquina, farmacias pequeñas, zapaterías, tiendas de conveniencia, panaderías, etcétera) debido a que, por lo general, en espacios con una baja densidad poblacional no se pueden establecer tan cerca de la población grandes minoristas (Wal-Mart, Comercial Mexicana, entre otros) porque no resultaría rentable. Analizado desde el punto de vista económico, esto puede ser un promotor de los negocios familiares; sin embargo, desde el punto de vista logístico se vuelve un problema al existir un mayor número de puntos de venta alejados entre sí, resultando esto no sólo en perjuicio del distribuidor, sino también de la población en general porque si aumentan los costos logísticos, también aumenta el costo final de la mercancía.

## **Económicas y Sociales**

Como en todas las grandes metrópolis existe una inmensa división económica, desde los estratos más bajos que no tienen acceso a servicios básicos (luz, agua, canasta básica, etc.) como los estratos más altos. Por lo general, los estratos más bajos se localizan en los márgenes de las ciudades.

La ZMCM, al ser la urbe más grande del país, es donde se concentra el 20.6 % de la población económicamente activa (PEA) que contribuye con un 26.1% del producto interno bruto (PIB) nacional, pero en lo que concierne a la capital el 62% de su población vive en condiciones de pobreza y/o marginalidad. La tasa de desempleo es relativamente alta respecto a otras ciudades de México, ésta es de alrededor del 6.3% y la tasa de informalidad es una de las más altas en el país, rondando el 35% (INEGI, 2010).

El tipo de negocio que se puede encontrar en una colonia varía dependiendo de su estrato socioeconómico. Al igual que en otras ciudades del mundo, en la ZMCM las necesidades, por así decirlo, no son las mismas para una persona que vive con un ingreso del salario mínimo en municipios considerados de bajo nivel socioeconómico a personas que viven en los municipios de más alto nivel socioeconómico. Por ello, la concentración de tiendas, centros comerciales, restaurantes, lugares de servicio y venta de mercancías se da en la zona central de la ZMCM, mientras que los pequeños comercios de esquina proliferan más en zonas de escasos recursos, que generalmente son las periferias de las grandes urbes.

La concentración económico-poblacional en determinados sectores de la ciudad, así como la expansión y flujos hacia nuevos sitios de creciente importancia sugieren claramente que la población se ha desplazado de lugares de escasa concentración económica a sitios donde el trabajo y las “oportunidades” abundan. Sin embargo, este fenómeno es continuo, se van creando nuevos centros de trabajo y las personas tienden a migrar hacia ellos. Debido a ello las diferentes zonas industriales de la ciudad pronto se ven rodeadas de asentamientos humanos generalmente de escasos recursos. Tal es el caso de la zona industrial ubicada al norte de la ZMCM en varios municipios, que en los últimos años se ha visto rodeada por innumerables zonas habitacionales con viviendas de bajo costo (Ramírez, 2008).

## 1.2 Parque vehicular en la ZMCM y sus características

### 1.2.1 Inventario vehicular

En la ZMCM se tiene registrado, al año 2010, un parque vehicular (incluyendo todo tipo de automotores) de 5,024,618 vehículos (Secretaría del Medio Ambiente, 2012) entre automóviles, SUV's, motocicletas, microbuses, autobuses, combis, camionetas de carga, vehículos de carga menores a 3.8 toneladas, tractocamiones, etc. En la tabla 1 se muestra el número de unidades registradas en la ZMCM clasificadas por entidad y por tipo de vehículo.

**TABLA 1 "PARQUE VEHICULAR EN LA ZMCM"**

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Distrito Federal</b>	<b>Estado de México</b>	<b>ZMCM</b>	<b>Porcentaje</b>
Autos particulares	1,832,278	1,234,135	3,066,413	61.03%
Camionetas particulares	441,027	323,985	765,012	15.23%
Taxis	131,729	69,040	200,769	4.00%
Combis	5,820	39,981	45,801	0.91%
Microbúses	19,510	12,115	31,625	0.63%
Pick up y carga ligera	124,014	301,283	425,297	8.46%
Tractocamiones	50,920	18,862	69,782	1.39%
Autobuses	32,970	14,039	47,009	0.94%
Carga pesada	57,625	105,366	162,991	3.24%
Motocicletas	161,087	48,599	209,686	4.17%
Metrobús	233	-----	233	0.00%
Total	2,857,213	2,167,405	5,024,618	100.00%

*Fuente: Elaboración propia con información del "Inventario de emisiones de la ZMCM 2010".*

Como se puede observar claramente en la tabla 1, los vehículos particulares como son automóviles, camionetas o SUV's y motocicletas representan la gran mayoría del parque

vehicular, lo que representa una relación muy pequeña entre el número de pasajeros transportados contra el número de vehículos destinados a dicha transportación, es por ello que los problemas de tránsito se incrementan cuando toda esta cantidad de automotores se desplazan a su destino.

Por otro lado, el número de vehículos de carga se incrementa cada año, abriendo paso a nuevas tecnologías y reduciendo así el número de vehículos con motor a gasolina. El número de vehículos dedicados exclusivamente al transporte de carga registrados en la ZMCM para el año 2010 se muestra en la tabla 2, cabe mencionar que es la estimación más reciente que se encontró, sin embargo, al final de la tabla se encuentra una estimación para el año 2012 con base en el crecimiento del parque vehicular en estos años (utilizando un crecimiento del 4.5% mantenido en estos 2 años).

**TABLA 2 “VEHÍCULOS DE CARGA EN LA ZMCM”**

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>ZMCM 2010</b>	<b>ZMCM 2012*</b>	<b>Porcentaje</b>
Pick Up	398276	438103	65%
Carga y Wagon < 3.8 tons	27021	29723	6%
Carga > 3.8 tons	162991	179290	26%
Tractocamiones	18862	20748	3%
<b>Total</b>	<b>607150</b>	<b>667865</b>	<b>10%</b>

*Fuente: Elaboración propia con información del “Inventario de emisiones de la ZMCM 2010”.*

### **1.2.2 Edad promedio y otras características**

En los últimos años el parque vehicular ha presentado un crecimiento en edad promedio, del parque vehicular que utiliza gasolina, el 52% de los vehículos tienen condiciones tecnológicas que los ubica como unidades altamente emisoras, toda vez que por su edad

carecen de motores energéticamente eficientes y sistemas avanzados de control de la contaminación (unidades 1990 y anteriores); este tipo de unidades aporta cerca del 68% de las emisiones totales que se liberan a la atmósfera de la ZMCM (Comisión Ambiental Metropolitana, 2003).

El resto de las unidades fueron diseñadas de forma tal que cumplieron con niveles mucho más estrictos de emisiones, para lo cual se requirió el uso de convertidor catalítico, sistemas computarizados de control de la mezcla aire-combustible, etc. Según datos del inventario de emisiones, este grupo tecnológico, correspondiente a los vehículos modelo 1991 y posteriores, constituye el 48% del parque en circulación y participa con el 32% de las emisiones totales. Con respecto a la porción del parque vehicular que utiliza diesel, tenemos que estos vehículos se caracterizan por su longevidad y el deficiente mantenimiento que reciben. Al analizar la flota vehicular por año modelo tenemos que del total de unidades, el 83% (vehículos de años modelo 1990 y anteriores) contribuye con el 80% de las emisiones totales, de acuerdo al inventario de emisiones 1998 (Comisión Ambiental Metropolitana, 2003).

### **1.2.3 Tecnologías de vanguardia**

Un fenómeno reciente es que gran parte de las grandes empresas ubicadas en la ZMCM están comprometidas con el medio ambiente y la preservación del mismo, mediante el sello ESR o algunos otros. Dichas empresas están en una búsqueda constante de nuevas tecnologías, esto con el objetivo no solo de reducir las emisiones de contaminantes de sus respectivos vehículos de reparto, sino también con el objetivo de disminuir costos de entrega, costos de mantenimiento, gastos de combustible, tener procesos más eficientes, etc. Es por eso que algunas ya han implementado nuevas tecnologías que en el presente se denominan acciones de sustentabilidad.

En específico para la distribución urbana de mercancías estas acciones han tomado una dirección concreta: actualización y renovación de los vehículos encargados de la DUM. Actualmente se basan en las principales características de este tipo de distribución para la elección de los nuevos integrantes de su flota, comparadas con la distribución troncal tiene muchas diferencias entre las que destacan baja velocidad y trayectos cortos.

Es por ello que el desarrollo de nuevos prototipos ha girado en base a estas características, múltiples empresas se han encargado de diseñar prototipos de acuerdo a necesidades específicas. Entre las principales tecnologías de propulsión desarrolladas los últimos años se destacan:

- **Propulsión Híbrida**

Los vehículos de propulsión híbrida, como su nombre lo dice, funcionan de dos formas distintas: con combustible fósil y con electricidad. Su misión no es reducir drásticamente las emisiones contaminantes ni minimizar el consumo de combustible al máximo, en realidad, buscan mejorar el desempeño de los vehículos utilizando la energía desperdiciada generada en algunos procesos del automóvil (González, 2005). Existen diferentes tipos de propulsión, donde el motor eléctrico juega papeles diferentes, en el sistema paralelo el motor principal es el de combustión interna y el motor eléctrico actúa en caso de que la potencia exigida sea mayor; en el sistema combinado el motor eléctrico funciona cuando la potencia exigida es menor, es decir a bajas velocidades y cuando el vehículo se encuentre detenido, y por último se tiene la propulsión en serie, en éste tipo el motor de combustión interna se encarga de mover un generador y este es el que alimenta al motor principal, el motor eléctrico.

La elección de la propulsión ideal dependerá de las características del tipo de distribución, generalmente, para distribuciones de última milla se utiliza del tipo sistema combinado.

La energía utilizada por el motor eléctrico en el sistema combinado puede provenir de diferentes fuentes; sin embargo, en los modelos más recientes proviene de baterías alimentadas por un sistema de volantes de inercia colocados en los ejes que se encargan de transformar la energía cinética en energía eléctrica por medio de generadores. Como el mismo volante de inercia es capaz de almacenar energía se puede prescindir de la batería, pero esto eleva el costo del sistema.

Entre los vehículos de reparto que han tenido éxito y por tanto han conseguido una fabricación en serie, bajo líneas de producción de grandes empresas están los vehículos híbridos diésel-eléctricos.

**FIGURA 3 “TIPOS DE PROPULSIÓN EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS”**



Fuente: Recurso electrónico ([www.feelmotor.com](http://www.feelmotor.com))

#### - Propulsión eléctrica

Un vehículo de propulsión eléctrica generalmente se conforma de los siguientes subsistemas: subsistema de motorización, subsistema de alimentación, subsistema de control, transmisión y otros elementos. Uno de los elementos más importantes es el motor (eléctrico) que puede ser de corriente alterna o directa, lo más común en vehículos de reparto suele ser directa, sin embargo, esto dependerá completamente de las necesidades particulares (Larroché, 1997). Otro elemento importante para el correcto funcionamiento y responsable por el tiempo de autonomía de los vehículos es el sistema de alimentación que incluye las baterías y el cargador, aún en estos tiempos donde la tecnología está fuertemente desarrollada respecto a capacidad de almacenaje, la duración de las baterías sigue siendo crítico debido a que no se ha alcanzado un nivel de duración que satisfaga todas las necesidades, en especial, de vehículos de reparto.

Para la carga del sistema de alimentación de este tipo de vehículos basta un contacto a una red eléctrica doméstica; sin embargo, las empresas suelen adquirir también un centro de carga de baterías para así facilitar y economizar recursos. Actualmente en grandes ciudades, principalmente europeas, ya existen centros de carga públicos (debido a la gran presencia de automóviles eléctricos) donde las baterías son sometidas a una carga bajo alta corriente y así, en sólo unos minutos se recupera la autonomía del vehículo.

Entre las ventajas de utilizar un vehículo eléctrico para reparto se encuentran:

- Emisión cero de contaminantes.

- Autonomía neta medida en kilómetros recorridos (sin importar condiciones de tránsito)
- Propulsión económica.
- Tamaño de vehículos generalmente reducido que permite entregas en lugares de difícil acceso.

Así como existen grandes ventajas también existen desventajas:

- Bajo nivel de autonomía, por tanto, es recomendado para distribución de última milla.
- Baja capacidad de carga.

**FIGURA 4 “VEHÍCULO ELÉCTRICO DE REPARTO”**



*Fuente: Reacondicionamiento del prototipo de Vehículo Eléctrico de Reparto "VER",  
UNAM 2010*

**- Propulsión mediante motor diésel**

Aunque la tecnología diésel, así como las anteriores es muy vieja, muchas empresas siguen desarrollando vehículos de reparto por la eficiencia relativamente buena que tienen

estos motores. La tendencia de estos vehículos es, en recientes años, alimentar el motor de combustión interna con biodiesel (no es usado en la ZMCM), el cual es un biocombustible que proviene de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales y que tiene características muy similares al diésel proveniente del petróleo, se ha comprobado que éste combustible emite cerca de 50% menos de partículas contaminantes (Demirbas, 2008). Aunque por ahora el precio comercial de este combustible respecto al diésel de origen mineral es ligeramente mayor en países con cierta historia de obtención del biocombustible, la tendencia mundial es que los valores de los dos combustibles converjan para posteriormente el biodiesel quedar más barato que el obtenido del petróleo.

### **1.3 Tránsito vehicular**

#### **1.3.1 Inventario de vialidades**

En la ZMCM existen diferentes tipos de vialidades que son clasificadas dependiendo sus características como el flujo de automóviles permitido, velocidades máximas, etcétera. Dependiendo el tipo de vialidad que sea, recibirá el mantenimiento adecuado de acuerdo con su nivel de importancia. En el Distrito Federal el órgano encargado de realizar mantenimiento, clasificación, y todo lo relacionado a la red vial de la entidad es la Secretaría de Transporte y Vialidad (SETRAVI) que utiliza una clasificación de vialidades que ellos consideran, según el programa integral de transporte y vialidad 2007-2012, normas internacionales, y que ésta, a su vez, clasifica a las vialidades en dos tipos:

#### **Vialidad primaria**

Se caracteriza por la gran capacidad para la movilización de vehículos que puede tener. Se subdivide en:

- Acceso controlado: dígame de arterias principales con carriles de alta y baja velocidad, en los carriles de alta velocidad se tiene prohibida la circulación de vehículos de carga por el riesgo que presenta la máxima velocidad permitida en ellas, además de los problemas de tránsito que representaría dejar circular vehículos de carga por dichas vialidades. Algunos ejemplos de estas vialidades son: Viaducto Miguel Alemán, Periférico, Circuito Interior. Cabe destacar que

dichas vialidades no tienen semáforos, topes, reductores de velocidad, etc. en sus carriles centrales.

- Arterias principales: son vialidades que también se caracterizan por el flujo tan importante de vehículos que pueden llegar a movilizar, sin embargo, a diferencia de las vialidades controladas estas pueden presentar semáforos para la interacción con otras vialidades. Además pueden permitir el tránsito de vehículos de carga.
- Ejes viales: son arterias que forman una malla a lo largo y ancho del territorio del Distrito Federal y que continúan en el Estado de México, son arterias de un solo sentido de circulación que en ocasiones presenta un carril confinado para el tránsito de transporte público. Presentan semáforos y en ocasiones pueden presentar topes o reductores de velocidad.

**TABLA 3 “INVENTARIO DE VIALIDADES”**

<b>Tipo de vía</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Primarias</b>	913	9.00%
Acceso controlado	172.42	1.70%
Arterias principales	320.57	3.10%
Ejes viales	421.16	4.10%
<b>Secundarias</b>	9287	91.00%
<b>Total</b>	10200	100.00%

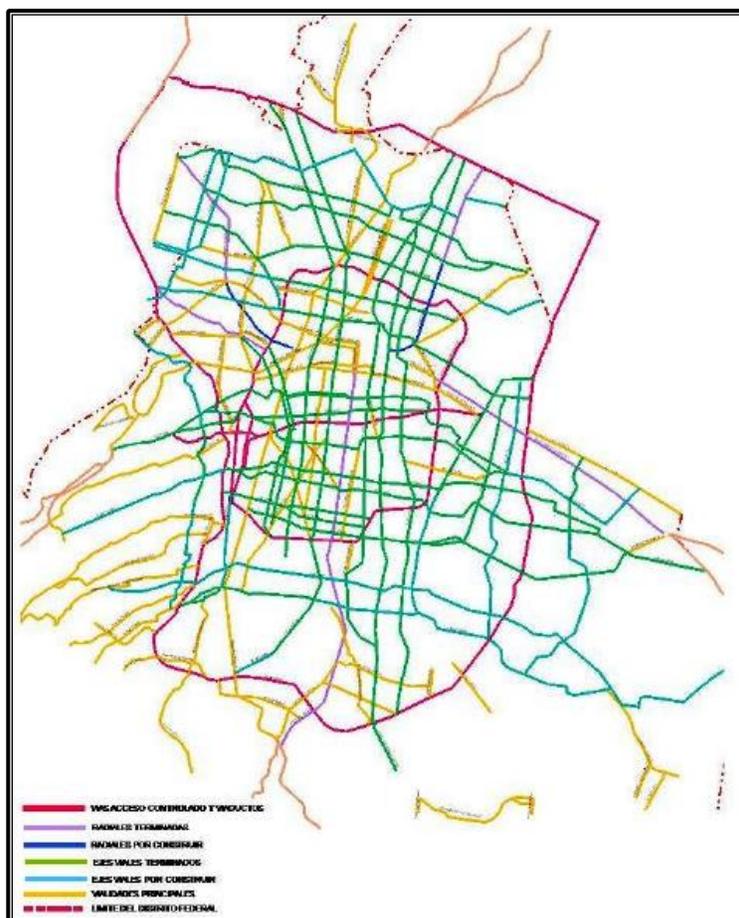
*Fuente: Programa integral de transportes y vialidad 2006-2012.*

### **Vialidades secundarias**

Las vialidades secundarias son aquellas que no permiten un alto flujo vehicular, la mayoría de ellas se encuentran en zonas habitacionales. Son vialidades que por su naturaleza y por ley, no se permite transitarlas a alta velocidad. Generalmente presentan topes y permiten estacionamiento en ambos lados de la vialidad. La tabla 3 muestra el

inventario de vialidades para el Distrito Federal, para la parte de la ZMCM que corresponde al Estado de México no existe la información.

**FIGURA 5 “VIALIDADES PRINCIPALES EN LA ZMCM”**



Fuente “Programa Integral de Transporte y Vialidad 2006-2012”

### **Vialidades de cuota**

Las vialidades de cuota fueron recientemente introducidas en la ZMCM, iniciando como una continuación del segundo piso del Periférico. Actualmente, la autopista urbana sur, la autopista urbana norte, la supervía poniente y el viaducto elevado Bicentenario conforman estas vialidades. Dichas vías se caracterizan por ser autopistas dentro de la ciudad, tienen restricciones de tamaño para vehículos que pueden transitar y en algunos tramos

son de un solo sentido y funciona por horarios pico (Viaducto Elevado Bicentenario). Tienen múltiples accesos y salidas en puntos clave de mayor concurrencia automovilística. El costo ha variado y es diferente en cada uno de los tramos, sin embargo, se puede considerar una media a enero de 2014 de 1.4 pesos por kilómetro recorrido.

Siendo una megalópolis, la Ciudad de México se enfrenta a innumerables problemas de vialidad, en algunas ocasiones provocados por la relación tan baja entre el total de vialidades [km] y el número de vehículos que circulan a diario por la ZMCM, así mismo, el estado actual del transporte público incentiva la compra de automóviles incrementando el tránsito y disminuyendo la velocidad de circulación dentro de esta zona.

### **1.3.2 Movilidad en la ZMCM**

Desde hace algunos años, la movilidad dentro de la ZMCM se ha visto perjudicada por el incremento en el número de automóviles circulando por ella, perjudicando esto no sólo a los habitantes que diariamente se trasladan a sus lugares de trabajo, sino también a la distribución de mercancías, demorando entregas, bajando la eficiencia en el número de las mismas, etc. En la tabla 4 se muestra la velocidad media de los vehículos en la ZMCM de algunos años.

Según la encuesta origen destino 2007 (EOD 2007) en la ZMCM se realizan cada día hábil más de 22 millones de viajes, de los cuales más del 60% se realizan en transporte público y el otro 40% representa vehículos lo que se traduce a una saturación de las vialidades en la ZMCM. Debido a diversos factores como hora de entrada y salida de oficinas, entrada y salida de estudiantes y un poco por horario de comida de oficinas, existen horarios picos de saturación de vialidades que se han extendido a lo largo del tiempo así como se ha visto reducida la velocidad media. Según la EOD 2007 en 1990 solo se tenía un horario de saturación que eran las 7 a.m., en la actualidad este horario no solo se ha visto ampliado de las 5 a.m. a alrededor de las 9 a.m. Por el contrario han aparecido nuevos horarios de saturación, alrededor de las 2 p.m., debido a la salida de estudiantes y al horario de comida en oficinas. También apareció un nuevo horario de saturación que va de las 6:30 p.m. hasta alrededor de las 9:30 p.m. que se debe a la salida de trabajadores de sus respectivos centros de trabajo.

**TABLA 4 “VELOCIDAD MEDIA A TRAVÉS DE LOS AÑOS”**

<b>Año</b>	<b>Velocidad Media (km/h)</b>
1990	38.5
2003	28.1
2004	21
2007	17

*Fuente: Programa integral de transporte y vialidad 2006-2012.*

### **1.3.3 Manifestaciones, plantones y movilizaciones**

Dentro de la ZMCM se encuentra el Distrito Federal, que es sede de los poderes de la unión y que desde 1997 tiene un gobierno elegido democráticamente, estos son los dos principales motivos por los cuales las manifestaciones ciudadanas se concentran en esta parte del país. Dichas manifestaciones ciudadanas son motivadas por diferencias entre el gobierno (local y/o federal) y la ciudadanía, por motivos deportivos o religiosos, entre otros. Dichas manifestaciones son exponencialmente mayores en esta parte del país debido a la gran concentración de servicios, instituciones públicas y privadas, y demás entidades.

Es por ello que, en el dato más reciente dado a conocer por el gobierno del Distrito Federal, se muestra un número tan alto de movilizaciones en el período comprendido entre el 5 de diciembre del 2006 y el 31 de julio de 2007, un total de 1779 sucesos. De los cuales 1444 fueron alguna clase de marcha, mitin, plantón, etc., de ellos el 35% fueron de carácter local y el 65% restante tuvieron una relación con el gobierno federal. Todos estos actos contaron con la participación de alrededor de 700,000 personas.

Sin duda alguna este gran número de personas en las calles generan problemas como lo son: destrucción de propiedad, aumento de contaminación, impedimento de acción rápida de servicios de emergencia, pérdidas económicas en negocios, etc. pero lo más importante en materia de DUM es que se ve perjudicada la eficiencia de las entregas de

mercancía debido al tránsito generado o debido a la imposibilidad de tránsito de los vehículos de reparto.

Las estadísticas nos dicen que las pérdidas en los comercios son millonarias. La Cámara de Comercio, Servicios y Turismo en Pequeño (CANACOPE) estima que por cada marcha o plantón el comercio establecido deja de ganar 10 millones de pesos, esto incluyendo las pérdidas por conceptos logísticos, aunque no detalla a cuánto ascienden las pérdidas en este rubro en particular.

En la actualidad la logística actúa de forma tan rápida que es posible adecuar una ruta con solo unas horas de anticipación a su partida, pero es necesario conocer la ruta por donde ésta transitará y las posibles rutas alternas por donde se podría transitar. Por ello es necesario conocer los tipos de vialidades así como su respectivo comportamiento.

#### **1.3.4 Restricciones viales**

En la ZMCM existe un tipo de transporte colectivo que se denomina Autobús de Tránsito Rápido (BRT por sus siglas en inglés) que utiliza carriles confinados para conservar una mayor velocidad y así tener una gran capacidad de movilización de personas. En el Distrito Federal este tipo de transporte se llama Metrobús y actualmente cuenta con 5 líneas que juntas significan 105 km. de vialidad confinada (Metrobús, recurso electrónico). En el caso del Estado de México son dos rutas las que operan actualmente con una longitud de 35.8 km de vialidad confinada. Generalmente, en las avenidas por las que circula el Metrobús y Mexibús son prohibidas las vueltas a la izquierda para agilizar la circulación y evitar accidentes; sin embargo, esto genera rutas de distribución más largas, o división de rutas de reparto lo que implica más costos. Además de lo planteado en el último punto se limita la parada de vehículos, en algunos casos restringiéndola al máximo (caso de la Av. Insurgentes).

Además de la restricción vial del metrobús dada en los últimos años, también existe la restricción de circulación de vehículos pesados por carriles de alta velocidad en arterias primarias como Periférico, Viaducto Miguel Alemán, Viaducto Bicentenario, etc. por el riesgo tan alto que representaría un accidente donde se involucrara uno de estos vehículos. También existen vialidades cero emisiones, tal es el caso de Eje Central

“Lázaro Cárdenas”, donde al igual que en vialidades primarias se prohíbe la circulación de vehículos pesados, para evitar la emisión excesiva de contaminantes en ésta vía tan concurrida.

Otra restricción vial, que aún no representa un gran obstáculo, son las calles peatonales que ya existen y las que se piensan destinar a ello. En el centro histórico del Distrito Federal existen actualmente 3 calles cerradas al tránsito vehicular: Madero, Regina y Talavera. La proyección del Gobierno Capitalino es intervenir aún más calles para mejorar la movilidad de la zona, lo que representaría un reto para la distribución de mercancía en esa zona en particular.

#### **1.4 Contaminación atmosférica**

La ZMCM presenta acumulación de contaminantes atmosféricos debido a las cadenas montañosas que rodean la Cuenca del Valle de México, este fenómeno se presenta principalmente en la temporada de invierno por causa de las bajas temperatura que caracterizan a esta época del año. Para medir tales emisiones cada año se presenta un inventario, que indica que a partir de las 4 a.m. y hasta las 9 a.m. las emisiones se van incrementando hasta alcanzar un máximo entre las 9 a.m. y las 3 p.m., existen diversas fuentes pero todas ellas contribuyen a la emisión de contaminantes y de COV (compuestos orgánicos volátiles).

##### **1.4.1 Programa para contingencias ambientales atmosféricas**

En ocasiones la emisión de contaminantes es demasiada y esto representa graves riesgos para la salud de los habitantes y para el medio ambiente en general, por lo que fue creado el programa para contingencias ambientales atmosféricas.

Este programa como su nombre lo dice busca fortalecer las medidas para la reducción de contaminantes en episodios agudos de contaminación en la ZMCM (GDF, 2008). La industria y el transporte de carga también son afectados en caso de que se entre en alguna de las 3 fases del programa, que dependiendo de la medición de puntos IMECA (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire) se irán activando. A continuación se

muestran las fases y las medidas tomadas relacionadas con la industria y el transporte de carga:

- Precontingencia: suspensión de quema de materiales y suspensión de programa de pavimentación y de bacheo (GDF, 2008).
- Fase 1: dejarán de circular de forma alternada los vehículos con holograma 2, tomando en cuenta los vehículos con holograma dos que hayan circulado en la contingencia inmediata anterior. Además de esto, se aplica una reducción del 30% de las emisiones contaminantes de la industria.
- Fase 2: dejarán de circular todos los vehículos con holograma 2. Además de una serie de restricciones a la industria manufacturera que incluyen una reducción del 60% de sus emisiones contaminantes (GDF, 2008).

Como control adicional, a partir de 1990 se encuentra vigente un programa para reducir la emisión de contaminantes de fuentes móviles al ambiente. El *hoy no circula* es un programa que restringe la circulación de los vehículos que circulan dentro de la ZMCM. Aquellos que poseen holograma uno (vehículos que tienen más de 9 años de antigüedad y hayan cumplido con los requerimientos) no circulan un día a la semana y dos sábados del mes, los que tienen holograma 2 (vehículos que tienen más de 15 años de antigüedad y aquellos que no cumplieron las especificaciones requeridas para obtener alguno de los otros hologramas) no circulan 1 día a la semana y ningún sábado, mientras que los vehículos que tienen hologramas 0 (automóviles de entre 0 y 9 años de antigüedad) y 00 (vehículos del 0 a 2 años de antigüedad) no tienen restricciones. Para el transporte de carga aplican las mismas restricciones, incluyendo al transporte de carga federal.

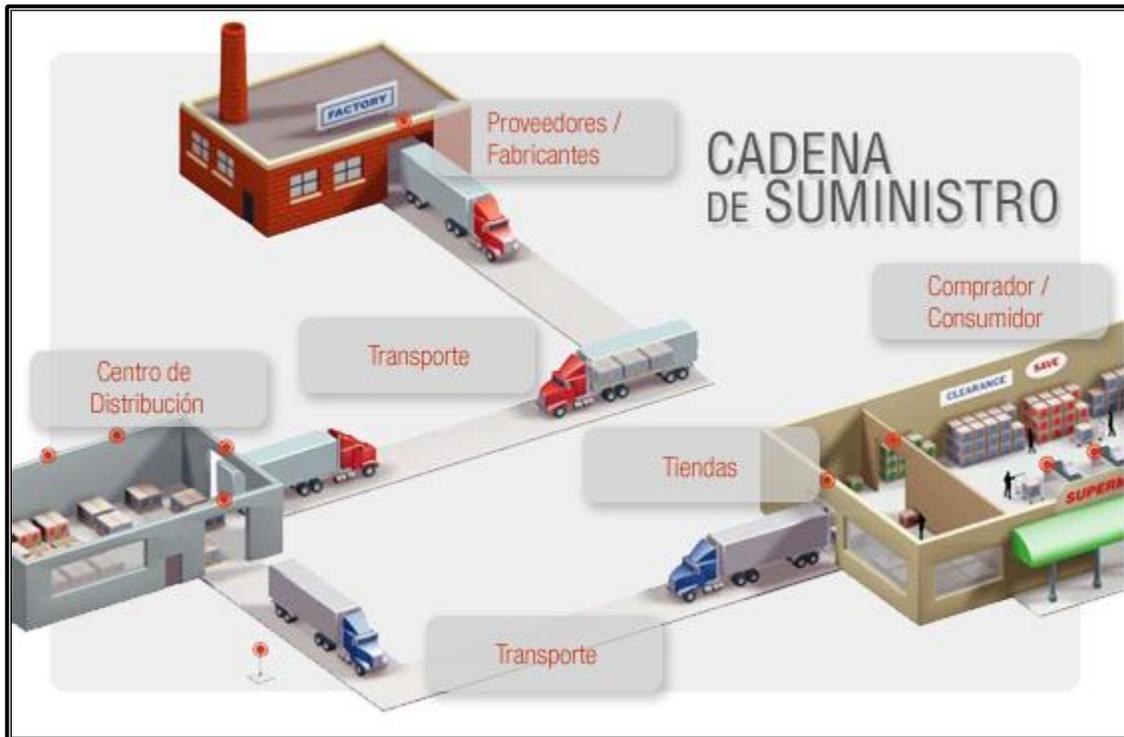
## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

### 2.1 Distribución urbana de mercancías

#### 2.1.1 ¿Qué es la distribución urbana de mercancías?

En las últimas décadas tomó fuerza el concepto de cadena de suministro o Supply Chain (SC) que puede definirse como un conjunto de actividades del proceso de abastecimiento, fabricación y distribución que operan de forma integrada con las áreas de ventas, marketing y desarrollo de nuevos productos para de esa forma lograr una sinergia entre todos los actores involucrados en el proceso de creación de nuevos productos y/o servicios (Chávez, 2012).

FIGURA 6 “REPRESENTACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO”



Fuente: Recurso electrónico, sitio web de la empresa SINTEC “Customer and operations strategy”

Como se puede apreciar en la figura 6, se representa la cadena de suministro (aunque ésta pueda incluir un mayor número de actores), se aprecian todas las etapas que la conforman incluyendo a los proveedores y los clientes.

*El último eslabón de servicio de la cadena de suministro se conoce como logística de última milla, o en este caso denominada distribución urbana de mercancía (también es llamada city logistics). La distribución urbana de mercancías (DUM) “engloba esencialmente los elementos relacionados a la actividad comercial, incluye el transporte de mercancías con sus operaciones asociadas (entrega, recolección, transferencias, carga y descarga, colocación en puntos de venta, cross-docking con o sin almacenamiento transitorio para múltiple resurtido en la jornada en centros de carga de pedidos y retornos en logística inversa) en el tejido urbano” (Antún 2013).*

Todas estas actividades deben estar coordinadas de forma que se pierda la menor cantidad de recursos como son tiempo, espacio de almacenamiento, dinero, mano de obra, entre otros. Es por ello que todos los actores trabajan conjuntamente para lograr ese objetivo, cabe destacar que actualmente uno de los objetivos, no sólo de la DUM sino de la cadena de suministro es reducir costos integrando un canal de información entre todos los actores de la cadena, como algunas empresas ya lo hacen.

Existen diferentes clasificaciones de la DUM; se toman diferentes parámetros para poder categorizarlas, entre ellas destacan (Antún, 2013):

#### Según optimización de la ruta:

- Optimizadas por distancia: son aquellas que se trazan de forma en que la distancia recorrida sea la menor sin importar otros factores. Generalmente ésta es la forma de ruteo que utilizan las empresas.
- Restringidas por ventanas horarias: se traza la ruta de esta forma cuando los establecimientos tienen horarios estrechos para la recepción de mercancías, entonces los proveedores se ven obligados a trazar la ruta con dichas restricciones.

#### Según itinerarios de distribución:

- Distribución centralizada: la mercancía es transportada de los centros de distribución (CEDIS) directamente a los establecimientos.

- Distribución con paradas múltiples: en este caso la mercancía es enviada directamente de los fabricantes a los establecimientos.
- Distribución combinada: es una mezcla entre las dos anteriores.

Según el factor de carga del vehículo:

- Factores de carga bajos: se distinguen por ser vehículos pequeños, con frecuencias de envío elevadas.
- Factores de carga elevados: se distinguen por ser vehículos grandes y generalmente son empresas grandes las que los utilizan.

Según la coordinación de destinatarios:

- Destinatarios sin una logística de distribución propia.
- Destinatarios con una logística de distribución coordinada por las compañías.
- Destinatarios con una logística de distribución coordinada por ellos mismos.

Según características del reparto.

Las anteriores están organizadas de mayor a menor importancia de acuerdo a los objetivos del presente trabajo, caso que el lector quisiera leer a detalle, se recomienda una consulta a (Antún, 2013).

### **2.1.2 Actores de la distribución urbana de mercancías**

En la distribución urbana de mercancías intervienen diferentes actores con diferentes objetivos cada uno de ellos, en ocasiones éstos suelen ser opuestos, por ejemplo, mientras un grupo busca entregas en horas establecidas, otro grupo busca flexibilidad en los horarios y días de entrega, es por ello que una de las metas en la DUM y la logística en general es promover una correcta interacción entre los diferentes actores que genere una ganancia para todos los involucrados. A continuación se muestran los principales actores que intervienen en la DUM:

- Proveedores y/o transportistas

Se incluyen todas las compañías grandes, hombres-camión y autónomos que transportan carga dentro de la ciudad. Su principal actividad es la de entregar bienes (mercancía),

existe desde una motocicleta que se encarga de entregar pequeños paquetes hasta vehículos que se encargan de transportar toneladas de mercancía. Entre los objetivos que se plantea un transportista destacan: la reducción en tiempos de reparto, reducción de costos operacionales, mejora del nivel de servicio al cliente, aumento de la seguridad de mercancía, etc.

- Receptores de mercancía

La mayoría de las actividades comerciales y de servicios va asociada en mayor o menor medida con el transporte de mercancía, desde un puesto callejero de jugos de naranja hasta un centro comercial donde converge un gran número de entregas de diferentes productos al día. Todas estas actividades requieren entregas a específicas horas del día, para algunas es posible manejar cierto nivel de flexibilidad en los horarios y los días de entrega, sin embargo, para muchas no lo es debido a la alta rotación de los productos, al poco espacio de almacenaje con el que cuenta el receptor, o debido a otros factores. Aunado a lo anterior, los receptores de mercancía suelen mostrarse poco accesibles en las entregas debido a que saben que el sector del transporte de mercancía es un entorno competitivo y que, en caso de que uno no satisfaga sus necesidades, encontrarán rápidamente a otro que si lo haga.

- Residentes

Los residentes se definen como las personas que habitan en la zona de estudio, en el caso de la DUM son todas aquellas personas que habitan en las ciudades y áreas metropolitanas, y que se ven afectadas o beneficiadas con las decisiones en materia de distribución de mercancías.

- Administración

Se llama administración a la autoridad responsable de planear y ejecutar proyectos que repercutirán directa o indirectamente en la distribución urbana de mercancías, siempre tomando en cuenta los objetivos de los diferentes actores involucrados para, de esta manera, conseguir que cada uno de ellos se vea beneficiado de la misma forma. La administración también se beneficia de la DUM por la generación directa de empleos, por las obras que se construyen en conjunto con la iniciativa privada y que disminuyen el costo para la misma administración, entre otros beneficios.

De igual forma, se encarga de servir como mediador en conflictos que pudieran existir entre los diversos actores debido a las actividades relacionadas con la logística de última milla como transporte, almacenaje, o la más conflictiva de todas, las maniobras de carga y descarga, que suelen ser las que más problemas ocasionan.

- Externos

Son todos aquellos que no se encuentran en ninguno de los grupos anteriores, de ellos se puede destacar a los compradores de la mercancía entregada, es decir, los clientes de los establecimientos, que generalmente buscan un ambiente relajado, un lugar poco concurrido y, en su caso, un lugar de estacionamiento. En resumidas cuentas, buscan realizar sus compras o recibir un servicio con todas las comodidades que se les pudieran brindar.

En este grupo también se puede clasificar la delincuencia, que en los últimos años ha crecido considerablemente afectando principalmente a la operación del transporte debido al robo de camiones.

### **2.1.3 Problemática asociada a la distribución urbana de mercancías**

La distribución urbana de mercancía, como cualquier fase en el proceso de la cadena de suministro conlleva una problemática asociada a su desarrollo. Existen diferentes ámbitos en los que interfiere, perjudica y/o contribuye, no solo a los involucrados directos (proveedor y cliente), sino también a otros de los actores. Entre estos rubros se pueden destacar el social, ambiental, financiero e inclusive político, en los siguientes párrafos se describe brevemente como la DUM interactúa con ellos:

#### **Ambiental**

El uso de vehículos propulsados por motores de combustión interna aumenta la emisión de contaminantes, estos contaminantes no solo afectan al aire, también se presentan en forma de contaminante acústico. Existen 3 rubros principales, donde se pueden englobar cada uno de estos impactos producidos por el transporte (Fernández, 2008):

*Calidad del aire:* los vehículos encargados de la DUM emiten como resultado de la combustión gases contaminantes (monóxido y dióxido de nitrógeno, el sulfuro, el

monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, partículas de agua y ozono). Todos estos contaminantes traen efectos perjudiciales a la salud, corrosión de edificaciones, lluvia ácida, además de que, en caso de sobrepasar los límites permitidos de ciertas partículas (PM10 y ozono) se entrará en contingencia ambiental y esto repercutirá directamente en las entregas de mercancía y en la producción de la industria manufacturera. Cabe destacar que según (Antún, 2013) la DUM representa el 40% del consumo energético de los vehículos urbanos y que además de esto, los vehículos destinados al transporte en la DUM son responsables del 20 al 35% de las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero en las áreas metropolitanas.

**FIGURA 7 “INVENTARIO DE EMISIONES DEL AÑO 2012”**

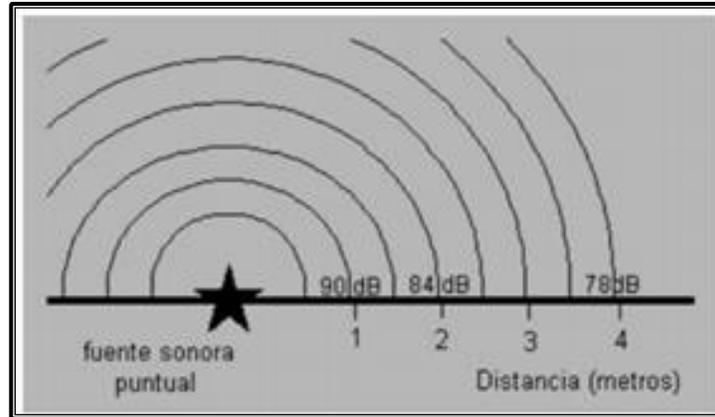
Fuente contaminante	Emisiones [t/año]										
	PM10	PM2.5	SO <sub>2</sub>	CO	NOX	COT	COV	NH <sub>3</sub>	Tóxicos	CN	CO <sub>2</sub> eq.
Puntuales	7,491	1,219	4,157	7,357	13,349	183,679	174,698	245	35,304	162	10,708,786
Área	21,841	4,995	289	20,249	12,449	474,418	231,282	39,025	94,195	278	14,369,344
Móviles	3,966	2,946	421	1,578,442	209,717	210,328	199,824	4,922	59,512	1,676	24,424,880
Vegetación y suelos	1,379	291	N/A	N/A	3,617	26,944	26,944	N/A	6,804	N/S	N/A
<b>Total</b>	<b>34,677</b>	<b>9,451</b>	<b>4,867</b>	<b>1,606,048</b>	<b>239,132</b>	<b>895,369</b>	<b>632,748</b>	<b>44,192</b>	<b>195,815</b>	<b>2,116</b>	<b>49,503,010</b>
	Emisiones [%]										
Puntuales	21.6	12.9	85.4	0.5	5.6	20.5	27.6	0.6	18.0	7.7	21.6
Área	63.0	52.9	5.9	1.3	5.2	53.0	36.5	88.3	48.1	13.1	29.0
Móviles	11.4	31.1	8.7	98.2	87.7	23.5	31.6	11.1	30.4	79.2	49.3
Vegetación y suelos	4.0	3.1	N/A	N/A	1.5	3.0	4.3	N/A	3.5	N/S	N/A
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

N/A. No Aplica – N/S No significativo

*Fuente: Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero, 2012.*

**Ruido:** no sólo existe contaminación ambiental por gases, también existe la contaminación sonora que puede significar daños a la salud de los habitantes de la ZMCM, padecimientos como estrés, trastornos del sueño y de comportamiento, pérdida de calidad de vida son sólo algunos. En Guadalajara (México) se realizó un estudio en 2013 que reveló que al menos el 59% del área urbana de la zona metropolitana se ve perturbada por el ruido que producen en especial los camiones de transporte de pasajeros y los de carga (entre 80-90 dB), lo que para ésta ciudad, representa más de 3 millones de personas afectadas por el ruido. Además en dicho estudio también se asegura que el 80% del ruido en un área urbana se debe al tránsito rodado (Gobierno del Estado de Jalisco, 2013).

**FIGURA 8 “ATENUACIÓN DEL RUIDO CONFORME A LA DISTANCIA”**



*Fuente: Instituto de información territorial del Estado de Jalisco, Nota Técnica 017/2013.*

Una afectación más, son las vibraciones producidas por el paso de los camiones pesados, dichas vibraciones pueden producir afectaciones a los edificios cercanos, al pavimento o a cualquier infraestructura que se encuentre cerca del paso continuo de transporte de carga.

### **Social**

Uno de los principales problemas asociados a la DUM, además de otros factores, es la congestión urbana debido a que la distribución urbana de mercancía, representa un gran número de operaciones diarias que cada día va en aumento debido al crecimiento del mercado y de la población, se calcula que aproximadamente el 16% de los viajes diarios en una ciudad son de distribución de mercancía. Ligado a dichas operaciones se encuentran los movimientos de carga y descarga que deterioran la imagen urbana, sumado a esto cabe destacar que alrededor del 70% de las maniobras de estacionamiento relacionadas a la DUM se realizan de forma ilegal, es decir, utilizan espacios de entrada y salida de vehículos, se estacionan en doble fila o en lugares prohibidos (Fernández, 2008). Todos estos números representan gran molestia para los habitantes pues se invaden lugares vitales para los conductores de vehículos particulares o de transporte público, así como también lugares de paso peatonal.

Un problema más de tránsito asociado a la DUM, son los múltiples accidentes viales en los que se ven involucrados los vehículos de reparto y que en ocasiones, debido a las

dimensiones de éstos, se convierten en accidentes fatales, se estima que en entre el 15 y el 20% de accidentes en el núcleo urbano se ven relacionados dichos vehículos. Conductores poco capacitados, vehículos sin seguro de responsabilidad civil, etc., son factores que podrían agravar situaciones como ésta.

**FIGURA 9 “TRÁNSITO CITADINO”**



*Fuente: Recurso electrónico (<http://mexico.cnn.com>)*

### **Financiero**

En este rubro se puede englobar el costo que tiene para la administración de la ciudad las operaciones de la DUM. En primer lugar el costo por la contaminación del aire de la ciudad, la administración debe tomar cartas en el asunto además de invertir recursos del erario para hacer campañas y programas como: verificación vehicular, hoy no circula, de contingencia ambiental, etc. En segundo lugar el costo de manutención y reparación de vialidades dañadas por el paso constante de vehículos de carga. Cabe mencionar que la DUM no solo afecta el aspecto financiero, también contribuye para su desarrollo, debido a que representa un gran dinamismo económico, por los empleos generados directa e indirectamente y por el flujo de mercancías que contribuye a un buen desenvolvimiento económico en la ciudad.

## 2.1.4 Actualidad en la distribución urbana de mercancías

### Problemas que actualmente enfrenta la DUM

Como cualquier etapa de la cadena de suministros, la DUM enfrenta grandes problemas y tiene grandes metas por alcanzar, en la DUM existen problemas que se podrían denominar “externos”, es decir, su solución no depende directamente de las empresas por lo que, lo único que se puede realizar, es sacar la mayor ventaja con soluciones internas, e “internos” donde se hace todo lo posible para su optimización. Algunos de los problemas a los que actualmente se enfrenta la DUM son (Fernández, 2008):

- *Relacionados con la carga y descarga:*

La existencia de lugares exclusivos para carga y descarga de mercancías permite a los repartidores realizar su labor sin interferir con el tránsito, rápidamente y de forma más segura, sin embargo, en toda la ciudad predomina una escasez de lugares destinados exclusivamente para carga y descarga momentánea, ésta situación se agrava cuando hablamos de zonas con calles angostas como los centros de las delegaciones y municipios pertenecientes a la ZMCM.

Algunos establecimientos cuentan con su propia área de carga-descarga pero desgraciadamente solo son los de mayor tamaño, como la mayoría no dispone de ellos, los conductores se ven en la necesidad de utilizar estacionamientos públicos (de pago por hora o por día) o incluso realizar su labor de carga o descarga estacionados ilegalmente. Una tendencia de empresas con productos de alta rotación en zonas muy conflictivas es situar un vehículo de reparto en un estacionamiento público y utilizarlo como centro de carga de pedidos para resurtir desde ese lugar los comercios aledaños.

- *Relacionados con el consumidor-receptor*

Uno de los problemas más importantes asociados a la relación con el cliente, tiene que ver con la responsabilidad en los tiempos de entrega, generalmente el proveedor marca una franja horaria de entrega para tener libertad de optimizar sus rutas, sin embargo, los clientes (receptores) se vuelven más exigentes en los horarios de entrega, cerrando las franjas horarias, evidentemente esto genera mayor gasto en el transporte porque las compañías no pueden optimizar las rutas.

Otro problema del mismo rubro es la superficie de almacenaje con la que cuentan los receptores, que en ocasiones es muy reducida y no se realizan repartos de gran volumen, ello implica más repartos de menor tamaño a la semana, inclusive dos o más repartos en un solo día, lo que sin duda alguna es un generador de costos para el proveedor o la compañía encargada de la distribución.

Las entregas a domicilio representan otro problema debido a que suponen la gestión de una gran cantidad de clientes, se dificulta el trazado de la ruta por la gran variabilidad de su forma, además de esto, es difícil la identificación de los lugares de entrega y en ocasiones pudieran surgir contratiempos en el trayecto o en el predio de entrega, entre otros.

- *Compañías de transporte*

Actualmente las compañías de transporte no aplican estrategias como imponer una carga mínima de pedido, ajuste de tarifas según el horario de entrega, delimitación el tiempo de entrega, la flexibilidad del horario, entre otras. Estas estrategias ayudarían para tener una reducción en la flota utilizada, se necesitaría menos personal y menos vehículos de reparto para realizar las mismas tareas. Aunado a lo anterior se tiene la competencia entre compañías que genera una ardua rivalidad para ganar un poco de mercado, la misma rivalidad es la que impide la implementación de dichas estrategias porque quedan a la completa disposición de lo que desee el cliente, sin poder defender sus intereses.

A menudo, por ser empresas hombre-camión, las compañías utilizan vehículos que podrían no ser adecuados para el reparto de mercancía lo que podría generar un mal servicio al cliente. Al ser demasiado grande el camión se podrían presentar retrasos en las entregas, ocasionados por la dificultad al maniobrar con vehículos de tales dimensiones, lo mismo pasa si la unidad se encuentra en malas condiciones mecánicas, se verían mermadas las entregas en caso de una avería. Si el vehículo no está adecuadamente equipado con todos los mecanismos necesarios para las maniobras de carga y descarga o para el transporte de mercancías especiales podría presentarse un daño en la mercancía o alguna lesión en los operadores.

## **Tendencias actuales en la distribución urbana de mercancía**

En materia de transporte, almacenaje y gestión en la DUM se han tenido grandes avances debido a las estrategias utilizadas en los últimos años para disminuir costos generando una sinergia entre los actores principales. Estas son algunas tendencias en la logística de distribución urbana de mercancía relacionadas principalmente con el transporte, el almacenaje y la gestión de los mismos (Antún, 2013):

- *“Reducción de inventarios mediante un sistema integrado por un solo centro de distribución y un conjunto de centros de carga de pedidos satélite mediante “cruce de andén” para satisfacer los niveles de servicio al cliente.”*

Los inventarios siempre han presentado un alto costo dentro de la logística empresarial, estos representan alrededor de un 30% de los costos logísticos, de ahí la necesidad de reducirlos al mínimo, una acción para lograrlo ha sido reducir el número de centros de distribución, es decir, centralizar la distribución (Antún, 2013) en un solo centro de distribución debido a que, según teoría básica de inventarios, el tener dos centros de distribución elevaría los costos logísticos en 41%, el tener 3 en 71%. Sin embargo, el cierre de centros de distribución (CEDIS) implicaría arriesgar la respuesta eficiente al consumidor (ECR), es por ello que dicha estrategia tiene que ir de la mano con una más, que garantizaría el abasto de producto en áreas metropolitanas, la implementación de centros de carga de pedidos para realización de Cross Docking o cruce de andén, ésta operación debe realizarse para tener solo inventario en tránsito en los centros “satélite”, algunas empresas realizan el surtido de las microplataformas logísticas por la noche o en horas de escasa circulación vehicular para optimizar el transporte y las operaciones de descarga.

Otra acción en este mismo ámbito es la reducción de SKU's, en la medida de lo posible, para así manejar una mezcla de productos necesaria y no excesivamente numerosa que implicaría mucho más inventario o, también, manejar productos de entrada por salida, que generalmente son productos de temporada o promocionales. Relacionado también con los SKU's, algunas empresas han optado por tener respaldos para rupturas de inventario en un CEDIS “central” y contratar servicio de paquetería express en caso de necesitarse.

- *“Preferencia para la localización de soportes logísticos corporativos propios y/o de operadores logísticos con operación dedicada en centros logísticos.”*

Actualmente las empresas prefieren soportes logísticos de plataforma para centralizar sus operaciones, es decir que optan por una localización propia de sus centros de distribución o, en caso de contratar un tercero para que realice sus operaciones, es muy probable que este tenga instalaciones en parques logísticos aledaños a la ciudad, donde se faciliten las maniobras con vehículos grandes y sea de fácil acceso a la ciudad. En la ZMCM dichos parques logísticos o centros logísticos se sitúan cerca de las vías principales de acceso, tal es el caso de San Martín Obispo donde algunas empresas han montado sus centros de distribución.

- *“Innovaciones en la tecnología de los vehículos”*

Reducir costos se ha vuelto una necesidad de las empresas por lo cual las innovaciones tecnológicas son imperantes en la distribución urbana de mercancía. Algunos de los últimos desarrollos son los siguientes: motores híbridos diésel-eléctricos (su funcionamiento está detallado en el primer capítulo), vehículos eléctricos tipo “transpaleta” para reparto de mercancía en lugares de difícil acceso y calles peatonales (se muestra un ejemplo en la figura 14), modificación de chasis para aligerar la unidad y ganar capacidad de carga, rediseño de las cajas de los vehículos para elevar el volumen de carga, aseguramiento de cadenas de frío para garantizar la calidad del producto y montaje de equipo GPS y computadoras a bordo de los vehículos.

**FIGURA 10 “TRANSPALETA EN CURITIBA, BRASIL”**



Fuente: Recurso electrónico (<http://cadeialogisticadofrio.blogspot.mx>)

La figura 10 muestra un vehículo utilizado en el reparto de mercancía en calles peatonales del centro de Curitiba, Brasil. Dicho vehículo es tipo “transpaleta” donde el operador lleva el mando a través de un manubrio, esto representa ningún esfuerzo para él debido a que el movimiento es asistido con motores eléctricos.

Otra innovación presente en algunas ciudades españolas como Barcelona es el reparto en bicicletas eléctricas modificadas para poder cargar hasta 180 kg netos. El objetivo de ésta clase de transporte es dar una solución ecológica al transporte de mercancías de última milla, así se garantiza una entrega rápida debido a que las bicicletas de carga pueden entrar adonde vehículos más grandes no lo pueden hacer. En la figura 11 se puede observar uno de estos vehículos cuyo volumen total de carga es de 1.5 metros cúbicos.

**FIGURA 11 “ELECTROBICICLETA DE CARGA”**



*Fuente: Recurso electrónico (Sitio web de la empresa VANAPEDAL)*

- *Externalización de operaciones mediante operadores logísticos con flotas dedicadas.*

Según el instituto mexicano de la competitividad, en México se alcanza un 23% de externalización de procesos, tendencia creciente en los últimos años. Las empresas se ven motivadas por diferentes causas entre las que vale la pena destacar: la mejora de servicio al cliente, la diversificación de la mezcla ofertada y la ampliación del mercado geográfico. Sus ventajas son claras, evitar grandes inversiones periféricas ajenas al

negocio de la compañía, costos logísticos transparentes, ganar economías de competencia, etc. Además de todo esto, existen niveles de externalización, desde externalizar todo el departamento de logística, integrar alianzas con operadores logísticos, o simplemente delegar operaciones como el transporte o el almacenaje a terceros. Dependiendo de la empresa y sus objetivos será la decisión. Sin duda alguna, los resultados de una externalización serán positivos debido al “know how” de los especialistas en logística y además de todo, permite la focalización en el verdadero negocio de la compañía.

- *“Introducción de innovaciones de tecnología de la información en logística.”*

En los últimos años se ha presentado una evolución en las tecnologías utilizadas no solo en los vehículos de reparto de la DUM, también la gestión de información se ha visto beneficiada impulsada por diversos factores entre ellos debido a la respuesta eficiente al consumidor (ECR), que en el 30% de los casos resultan ser grandes cadenas de supermercados. Las medidas hasta ahora bien adoptadas en la última fase de la cadena de suministro como radiofrecuencia para la recepción de mercancía y para gestión de inventarios, software transaccional para una comunicación eficiente entre proveedor y cliente, además de gps y computadora en vehículos (aunque cabe destacar que en México dichas tecnologías solo son puestas en marcha por grandes empresas y operadores logísticos debido al alto costo que estas implican).

## **2.2 Decisiones sobre transporte y almacenaje en la DUM**

Las exigencias en el mercado nunca se detienen, la necesidad de disminuir los costos siempre está presente en las decisiones de las compañías, la evolución y el avance no se pueden detener, es materia del día a día, ello genera un aumento en la complejidad en los procesos, lo que termina dificultando la toma de decisiones en cuanto a materia de distribución se refiere puesto que en la actualidad los clientes necesitan, además de un producto de calidad al menor costo posible, tener el producto en el momento que ellos lo vayan a utilizar y de la forma en que lo hayan ordenado. El nivel de servicio al cliente es en lo que actualmente se basan algunas decisiones de distribución, o se podría decir que es una restricción puesto que la palabra del cliente es lo que tiene que hacer, entonces

las empresas tienen que trabajar con base en ello para después tomar decisiones sobre sus rutas.

### **2.2.1 El proceso de diseño de rutas**

El proceso de ruteo (como también se le suele conocer) está presente en los tres niveles de decisión dentro de una empresa: estratégico (nivel de dirección), táctico y operativo, cada uno de estos niveles influye de manera diferente en la toma de decisiones. Las decisiones que se relacionan con el sistema de distribución en su totalidad se dan en el nivel estratégico, en él se sientan las directrices que se deberán seguir mientras que las decisiones del día a día, como reparaciones, horario de partida de rutas, siempre se darán en el nivel operativo.

El objetivo de diseñar una ruta es optimizarla, y por ello se puede entender la reducción al mínimo de la distancia recorrida contemplando la mayor cantidad de puntos de entrega. Sin embargo, hay varias consideraciones que se deben tener para realizar un buen diseño de una ruta de distribución, las más importantes son (Ballou, 2005):

- *Cargar los camiones con volúmenes de parada que estén lo más cercanos unos de otros:* esto con el fin de reducir la distancia total recorrida y el tiempo de viaje entre cada una de ellas.
- *Las paradas en diferentes días se deberían ordenar de tal manera que formen agrupaciones más estrechas:* cuando las paradas se efectúan en diferentes días de la semana deben segmentarse en problemas de programación de rutas separados para cada uno de los días de la semana, y los segmentos diarios deberán evitar la superposición de rutas, así se disminuirá la flota utilizada.
- *Construir rutas comenzando con la parada más lejana al depósito:* primero se debe seleccionar ésta parada, después seguir asignando a la misma ruta las paradas más cercanas a ella hasta acabar con la capacidad disponible del vehículo, para después seguir con otro vehículo.
- *Las rutas más eficientes se construyen utilizando los vehículos más grandes disponibles:* con el fin de abarcar el mayor número de paradas con un solo vehículo, de ésta forma se ahorraran recursos, sin embargo, se tiene que evitar la

práctica si el factor de carga del vehículo es bajo, es decir, si no se utiliza al máximo su capacidad.

- *Las recolecciones deberían mezclarse dentro de las rutas de reparto, en lugar de ser asignadas al final de las rutas.*
- *Una parada que se halla a gran distancia de una agrupación de ruta es buena candidata para un medio alternativo de reparto: en caso de que una parada se encuentre muy alejada y maneje una entrega de bajo volumen, se debe considerar una entrega en un vehículo con capacidad de carga menor u otras alternativas.*

Estas recomendaciones suelen tomarse en cuenta para el diseño de rutas aunque algunas podrían interferir con el nivel de servicio al cliente, es por ello que sólo sirven como guía en el proceso de ruteo.

## **2.2.2 Métodos para el diseño y optimización de rutas**

Actualmente las empresas diseñan y optimizan sus rutas con diferentes métodos, todos o por lo menos casi todos ellos son basados en distancias y en tiempo (tomando en cuenta restricciones horarias que designe el cliente y otros factores como limitaciones en vehículos, barreras viales y/o naturales, tiempo de descanso y comida para el conductor, entre otras. Existen métodos sencillos y algunos que pueden considerarse complejos debido a la cantidad de factores que incluyen, aquí se abordarán sin entrar en detalles 3 de ellos:

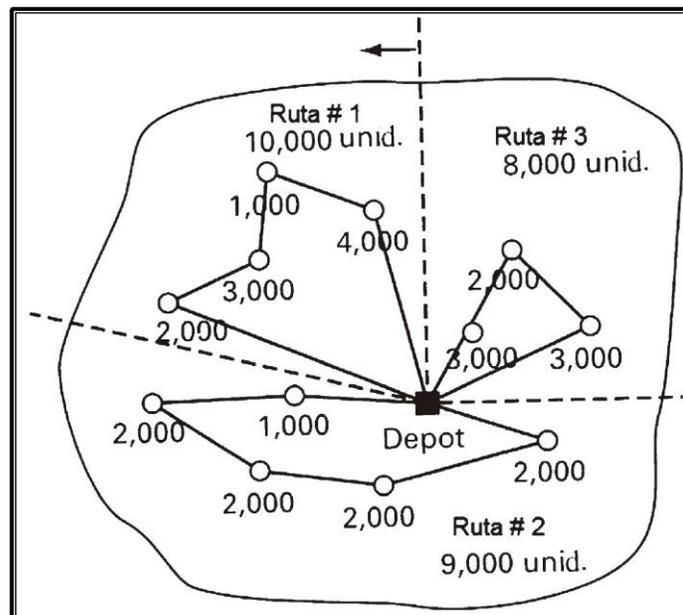
- Método del barrido (Ballou, 2005):

Sin duda el más sencillo de los métodos, inclusive se puede hacer a través de cálculos manuales con una gran cantidad de puntos, el error medio se estima en un 10%, lo cual es permisible en caso de que las rutas tengan que obtenerse de forma rápida y se necesiten buenas soluciones, sin embargo, el método también tiene una desventaja que se relaciona con la forma de dibujar la ruta ya que el tiempo total que se emplea, no está sincronizado, así como el momento oportuno (horario de entrega ideal). Su algoritmo tiene dos etapas y se conforma de la manera siguiente:

- 1) Se localizan todas las paradas y los depósitos, CEDIS, etc.

- 2) Se debe trazar una línea recta, desde el depósito con cualquier dirección en una cuadrícula y girarla hasta que intersecte con la primer parada. Se realizará la siguiente pregunta: Si se incluye en la ruta ésta parada ¿se excede la capacidad del vehículo?, en caso de ser negativa la respuesta se incluye y sigue girando, en caso de ser positiva no se incluye este punto, se cierra la ruta y se comienza desde ese último punto que se excluyó.

**FIGURA 12 “MÉTODO DEL BARRIDO”**



*Fuente: Administración de la cadena de suministro, Ballou 2005.*

- Método del agente viajero

El método del agente viajero se puede considerar el mismo que el de barrido con la diferencia de que en cada una de las rutas obtenidas se optimiza la distancia total recorrida por el vehículo, esto puede ser mediante el método del vecino más cercano donde se realiza una secuencia de entrega siempre haciendo el siguiente al punto de entrega más cercano.

- Método de los ahorros (Ballou, 2005):

El objetivo del método es minimizar la distancia recorrida por todos los vehículos e indirectamente reducir el número de los mismos. Entre sus principales bondades destacan la flexibilidad para manejar un gran número de restricciones prácticas, facilidad para el cálculo en computadora y que las soluciones que genera son muy próximas a lo considerado “óptimo”.

La lógica del método comienza suponiendo un vehículo por cada parada que significa la distancia máxima que se recorrería, después se combinan dos paradas en la misma ruta para que un vehículo pueda eliminarse y la distancia del viaje se reduzca, para determinar cuáles rutas se fusionaran se toma en cuenta la distancia ahorrada antes y después de la combinación y se deja la que representa un mayor ahorro en distancia recorrida.

La fuerza del método se debe a la capacidad de asignar simultáneamente la parada a la ruta y asignarle un lugar en la secuencia de reparto.

- Otros

Existen además de los mencionados anteriormente, otros métodos más complejos, se denominan metaheurísticos, estos métodos parten de una solución existente e intentan encontrar una mejor hasta, eventualmente, encontrar la óptima. Algunos de los métodos que trabajan de esta forma son:

- 1) *Simulated annealing*: es un método probabilístico que construye nuevas configuraciones aleatoriamente y las somete a reglas de probabilidad para su aceptación, evitando de esta manera la caída en óptimos locales. El proceso termina después de un cierto número de iteraciones (indicadas inicialmente) y tiene como objetivo obtener soluciones cercanas al óptimo global (Robusté, 2005).
- 2) *Taboo search*: Dada una solución  $x$  se define un entorno o vecindario  $N(x)$ , se evalúa y se “mueve” a una mejor solución pero, en lugar de considerar todo el entorno o vecindario la búsqueda tabú define el entorno reducido  $N^*(x)$  como aquellas soluciones disponibles (no tabú) del entorno de  $x$  (Riojas, 2005).

Los métodos metaheurísticos son mucho más potentes que los abordados en primera instancia, sin embargo requieren de una gran cantidad de recursos computacionales que a veces no están disponibles en todas las organizaciones.

### 2.2.3 Software para diseño y optimización de rutas

Actualmente existe un sinnúmero de programas especializados en el trazo y optimización de rutas de reparto, algunas de ellas de gran robustez pero con un tiempo de cálculo muy elevado, otras muy sencillas pero con la solución un poco más alejada de la óptima. Cada empresa deberá determinar que herramienta se adapta más a sus necesidades, por ello el responsable debe conocer los requerimientos de su distribución, los alcances del proyecto, los recursos disponibles, etc. para poder seleccionar el software que ocuparán. Cabe destacar que además del software que se pone a disposición de las empresas con costo, existe software libre para el trazado y optimización de rutas, aunque éste suele ser un poco más básico y no cuenta con todos los módulos que podrían ser de utilidad para algunas empresas.

El software especializado es capaz de acercar lo más posible el diseño de ruta a lo óptimo pudiendo el usuario ingresar un gran número de restricciones como: número de vehículos así como sus respectivas capacidades en peso y volumen, restricciones horarias de los clientes, horario de comienzo y término de la actividad, duración máxima de la jornada laboral así como consideración de los horarios de comida. Algunos programas que actualmente están en el mercado son los siguientes:

- 1) AXIODIS: es un software desarrollado por la empresa “system”, es una herramienta de planificación y optimización de transportes que actúa en los tres niveles de la empresa (operativo, táctico y estratégico). El objetivo de su implementación es aumentar el nivel de servicio al cliente, optimizar las rutas de transporte reduciendo los costos logísticos, garantizar las entregas y las condiciones requeridas por los clientes y la calidad. Además de la ubicación de puntos de entrega en el espacio, se puede en su interfaz visualizar mapas cartográficos, vista interactiva de las rutas y la zonificación. Además de tener un módulo que permite calcular rutas teniendo en cuenta la carga volumétrica en 3D.
  
- 2) TOURSOLVER: es un software diseñado por la empresa Opti-Time, es un software de optimización de rutas que permite evaluar, optimizar y planificar los itinerarios de transporte. Este software garantiza una reducción de al menos 20% de los kilómetros recorridos por los vehículos de reparto reduciendo así, un 15% sus costos. Tiene un módulo que se encarga de la simulación de algunos aspectos

como son el aumento del número de vehículos y la incorporación de nuevos puntos de entrega. Aunado a esto, el software también puede descargar las rutas a PDA's para un mejor control de las entregas.

Hasta ahora se presentaron dos software especializados en el diseño y la optimización de rutas, un objetivo puntual, sin embargo existen otros software conocidos como ERP (Enterprise resource planning) son sistemas que integran y administran la información generada en cada área de la organización logrando automatizar aspectos operativos y productivos del negocio (Hernández, 2009), los ERP de la actualidad son tan completos y tienen todos los módulos que alguna empresa podría llegar a necesitar. Algunos de ellos también sirven para optimizar el transporte y los repartos de las empresas, sin embargo, suelen ser muy caros y en ocasiones muy complejos.

Las empresas también suelen utilizar software basado en sistemas de información geográfica (p.e. MapInfo) que además de ser una herramienta de creación de mapas, sirve para ubicar en ellos a todos sus clientes distinguiendo entre los de mayor venta, los de menor, el tamaño de ellos, etc. también es funcional al realizar análisis geográficos sencillos o complejos, para poder detectar áreas de influencia, para zonificar y determinar distancias entre el almacén y los puntos de entrega o entre los mismos puntos. Básicamente las empresas utilizan ésta herramienta para tener una mejor interpretación de los datos geográficos de sus clientes, para realizar una correcta segmentación, mejorar el nivel de servicio al cliente y sobre todo para tomar mejores y bien fundamentadas decisiones.

### **2.3 Decisiones sobre almacenaje en la distribución urbana de mercancías**

No solo el transporte es una operación indispensable, también lo es el almacenaje. En caso de no contar con un respaldo adecuado y una buena planeación de inventarios podrían surgir fallas en el abastecimiento a los clientes y esto afectaría directamente a la percepción del cliente de la compañía. Es por ello que las estrategias de transporte y de almacenaje deben ir de la mano para así encontrar lo que funcionará de mejor manera para la compañía.

### 2.3.1 Generalidades del almacenaje en la distribución urbana de mercancías

Como ya se observó anteriormente, una de las estrategias actuales de las empresas en cuanto a DUM se refiere, relacionado directamente con el almacenaje de mercancía, es la reducción del número de centros de distribución así como la creación de centros de carga de pedidos para realizar cross docking, esto ayuda a garantizar un abasto ininterrumpido de mercancía. Sin embargo, no se pueden colocar tantos centros de carga de pedidos como la empresa desee, ni tampoco se pueden cerrar CEDIS indiscriminadamente, se tiene que definir con anterioridad los sitios donde se podrían establecer (ya sea un centro de carga de pedidos o un centro de distribución) o conservar dichas infraestructuras. Determinar el lugar idóneo para establecer alguna de estas instalaciones no es una tarea fácil y no existe un proceso definido, es más bien la experiencia combinada con algunos factores de decisión, lo que en conjunto consigue una localización útil de la instalación. Algunos factores que deben ser tomados en cuenta para encontrar el sitio ideal para ubicar una instalación tan importante para la empresa son (Ballou, 2005):

- Acceso de transportación
- Transportación saliente
- Proximidad con el cliente
- Disponibilidad de mano de obra
- Costos de mano de obra
- Transportación entrante
- Ambiente sindical
- Impuestos
- Leyes e incentivos estatales
- Costo de terrenos
- Servicios públicos

Los factores anteriormente citados son importantes a tomar en cuenta al tomar la decisión de donde ubicar un centro de distribución, sin embargo, este tipo de instalación es muy diferente de otras instalaciones logísticas urbanas, a continuación se da una pequeña definición de cada una de las dos instalaciones de interés, así como también se hace una pequeña descripción de sus principales características:

- Centro de distribución (CEDIS):

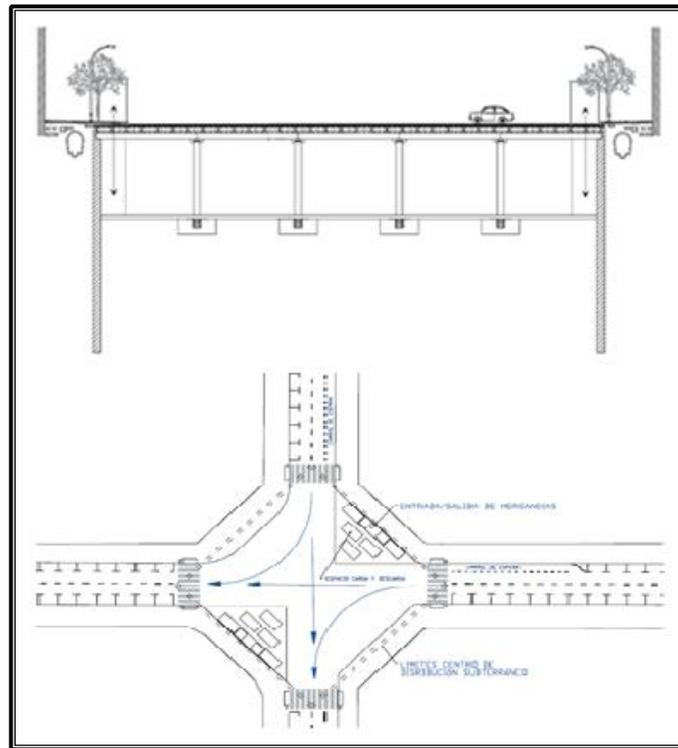
Un centro de distribución es una infraestructura logística donde se resguarda mercancía de uno o diferentes proveedores con el fin de surtir pedidos y, de esta forma, tener en abasto continuo de mercancía a los clientes. En ésta infraestructura, que suele tener un tamaño considerable, además de la operación de almacenaje, se tienen algunas otras como son: recepción y despacho de mercancías, gestión de pedidos, cross-docking, paletización, picking, etc. Por lo general, se localizan en zonas de actividades logísticas, parques logísticos o parques industriales.

- Centro de carga de pedidos o microplataforma logística urbana (mPLU):

Las microplataformas logísticas urbanas son soportes logísticos de plataforma ubicados, como su nombre lo dice, en zonas urbanas con restricciones de circulación (tipo de vehículos, tránsito, horarios), ellos permiten la correcta distribución de productos terminados en un área bien delimitada (Hernández, 2002).

Estas infraestructuras son de menor tamaño que los centros de distribución y a diferencia de éstos, en ella, no suelen recibirse vehículos de grandes capacidades. Generalmente los productos se encuentran almacenados por poco tiempo debido a la alta rotación de mercancía y a que se procura consolidar envíos tomando en cuenta su destino final (distribución física centralizada). Por ello, el cross docking o cruce de andén es una de las herramientas más utilizadas, la finalidad de esta herramienta es asegurar el movimiento constante de productos reduciendo el tiempo de almacenaje pasando éstos del muelle de descarga al de carga directamente, para que dicha herramienta sea verdaderamente útil se necesita una gran coordinación entre los embarques entrantes y salientes, así se garantizarán plazos muy cortos.

**FIGURA 13 “PLATAFORMA LOGÍSTICA URBANA. CORTE TRANSVERSAL Y VISTA SUPERIOR”**



*Fuente: Un nuevo concepto de plataforma logística urbana, González 2002.*

Las infraestructuras logísticas conocidas como mPLU o PLU se pueden establecer en estacionamientos públicos (mPLU improvisadas) hasta centros comerciales (en niveles inferiores donde no interfiere con el desarrollo de las actividades normales). Una propuesta para la ubicación de PLU es construirlas de forma subterránea (González, 2002) en los cruces de calles que así lo permitan.

En la figura 13 se muestra la propuesta de localización de una plataforma logística urbana por debajo de la intersección de dos vías de un solo sentido. En tal infraestructura los vehículos no descenderían debido al espacio tan limitado (se contempló un tamaño de 1600 m<sup>2</sup>) y la mercancía se manipularía con montacargas y manualmente. Al ser las vías de un solo sentido, se tendrían dos lados del polígono libres para carga y descarga de mercancía durante todo el día.

### 2.3.2 Métodos para determinar la localización de infraestructura

A diferencia del trazado de rutas, para localizar una infraestructura de esta naturaleza no existen métodos tan avanzados para optimizar su ubicación, sin embargo, existen algunos para la localización de instalaciones como el método del centro de gravedad, el de la mediana, el de la cuadrícula y el del centroide.

#### Método del centro de gravedad (Pau i Cos, 1998)

El método de centro de gravedad se basa en la premisa de que la mejor situación geográfica de un almacén es el centro de gravedad de la demanda por los costos de transporte.

Las coordenadas de los puntos de origen y destino se pueden representar en una cuadrícula y lo que se busca son las coordenadas del centro de gravedad que se determinan con datos conocidos como el volumen transportado desde y hacia la instalación y el costo del transporte asociado a estos movimientos. Además se pueden obtener mejoras considerando diferentes niveles de servicio al cliente asociados a las distancias entre almacenes y puntos de entrega, sin embargo, esto implicaría cálculos más complejos.

#### Método de los factores ponderados

Aunque este es un método básicamente cualitativo, a diferencia del anterior que es cuantitativo y en cierta medida entrega una buena solución, sigue siendo utilizado en la actualidad sobre todo cuando las opciones de localización son pocas y se encuentran ya definidas. Para llevar a cabo el método se debe seguir el siguiente algoritmo, aunque existen variaciones, en esencia se trata de lo mismo:

- 1- Hacer una relación de los factores relevantes para la toma de decisión.
- 2- Asignar un peso a cada factor que refleje su importancia relativa.
- 3- Fijar una escala para evaluar los factores (0-100).
- 4- Hacer que los responsables de la toma de decisión evalúen cada factor en cada localización.

- 5- Multiplicar la puntuación por los pesos para cada uno de los factores involucrados y obtener el total para cada localización.

En el caso de las microplataformas logísticas urbanas (mPLU) se podría utilizar uno de los métodos descritos anteriormente, sin embargo, se debe tener cuidado al considerar las condiciones tan particulares en una ciudad, como son el tránsito, la ocupación tan grande de predios, etc. Además, para ubicar una mPLU se deben considerar otros factores como los son el giro comercial, el promotor del proyecto, características del mercado, zona a atender, entre otras (Antún, 2013).

Los criterios citados anteriormente se pueden clasificar para influir en diferentes niveles de decisión, aquí se presentan los factores que influyen en la ubicación y en la elección del predio (Hernández, 2002):

Ubicación: conectividad primaria con el entorno, accesibilidad dentro de la zona en cuestión, seguridad, predios disponibles.

Elección del predio: peso de los productos, naturaleza de los productos (materiales), volumen de los productos, número de puntos de venta aledaños, volumen de ventas en la zona.

Como puede apreciarse, los procesos de transporte y almacenaje asociados a la distribución urbana de mercancías están muy bien definidos, asimismo, existe software para la optimización de las rutas y localización de instalaciones, sin embargo, aún se presentan problemas dentro de la DUM, afectando al entorno en que se desarrolla. Es por ello que conocer el comportamiento del tránsito vehicular ayudaría a disminuir la problemática y a proponer nuevas estrategias en materia de DUM, para ello, los ciclos de manejo, podrían representar una herramienta muy útil para la colecta de información del tráfico en la ZMCM.

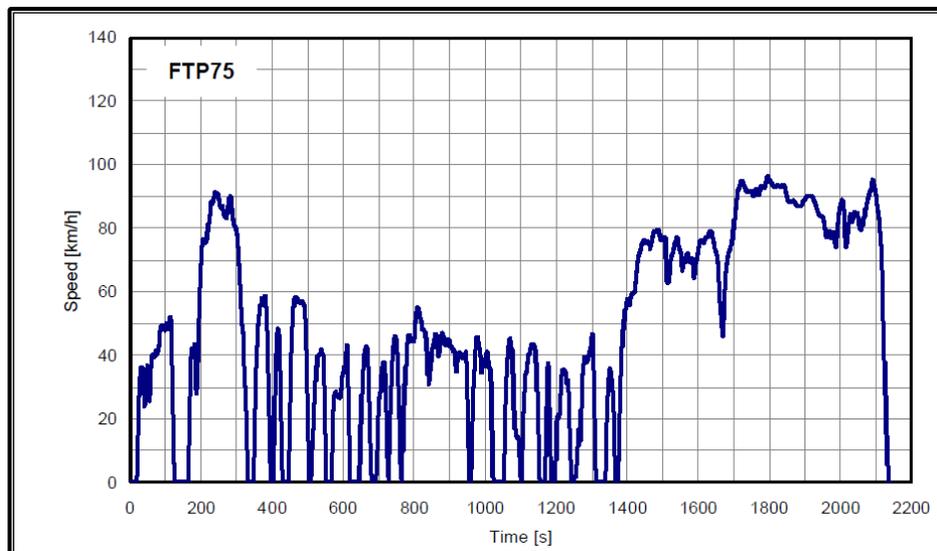
## **2.4 Ciclos de manejo**

### **2.4.1 ¿Qué son los ciclos de manejo?**

Desde hace algunas décadas en las grandes ciudades se ha venido presentando un creciente problema de movilidad urbana, dicha situación se agrava cuando no existió un correcto diseño y se conjuga con una mala gestión de las vialidades de la ciudad. Es por ello que el desarrollo tecnológico dentro del ámbito automotriz, en cierta medida, se ha enfocado hacia el rendimiento y economía del transporte, es decir, realizar los mismos viajes con una mayor eficiencia y al menor costo. La industria automotriz no ha dejado de invertir en el desenvolvimiento de motores más eficientes y en diferentes formas de regeneración de energía. Sin embargo, para desarrollar lo que necesita el mercado es indispensable conocer la situación actual que se enfrenta, es por ello que algunas empresas utilizan ciertos datos obtenidos de investigaciones científicas para desenvolver con mayor precisión lo que es demandado en la actualidad. Tal es el caso de la técnica llamada “Driving Cycles” o “Ciclos de Manejo”.

Un ciclo de manejo es un perfil de velocidades trazado en un plano velocidad contra tiempo que representa una forma típica de conducir en una ciudad (zona urbana), carretera o autopista, zona rural o combinado. En dicho perfil se consideran las características del vehículo, las condiciones climatológicas y geográficas (como la altitud), el perfil de los conductores y la más importante, las características del tránsito vehicular de la zona (González, 2003). Sin embargo, no sólo se llevan a cabo mediciones de la velocidad del vehículo, también se realizan mediciones sobre características del vehículo como el consumo de combustible, las emisiones de partículas contaminantes. Como es esperado estos últimos parámetros variarán dependiendo de la intensidad del tránsito, altitud, del vehículo mismo, de temperatura y de las condiciones del pavimento. Justamente estas mediciones son de gran utilidad para la identificación de posibles áreas de mejora dentro de la industria automotriz. En la figura 14 se muestra un ciclo de manejo urbano desarrollado por la Environment Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos.

**FIGURA 14 “CICLO DE MANEJO DESARROLLADO POR LA EPA”**



*Fuente: The representativeness of driving cycles in real world traffic, Färnlund 2001.*

Los objetivos principales de los ciclos de manejo son básicamente dos: el primero de ellos es proveer un indicador confiable de las emisiones vehiculares y del consumo de energía a nivel local, es decir, cada zona en particular, tendrá su ciclo de manejo representativo y sus parámetros serán diferentes. El segundo de ellos es funcionar como un control instrumental para tener una inspección eficiente y llevar un adecuado mantenimiento de los diferentes vehículos que circulan por las ciudades (Färnlund, 2001).

Hasta la fecha se han desarrollado un sinnúmero de ciclos de manejo alrededor del mundo, los pioneros en el ámbito fueron los Estados Unidos, Japón y Europa debido a los altos niveles de contaminación que empezaban a presentar, posteriormente, otros países fueron utilizando la técnica al ser observados los beneficios y la facilidad de realización de la misma.

#### **2.4.2 ¿Para qué se utilizan los ciclos de manejo?**

Los ciclos se han utilizado durante décadas como medio para estimar el consumo de combustible de los nuevos vehículos que se integran al mercado en diferentes condiciones de manejo, diferentes condiciones de tránsito, diferentes condiciones de

carga, etc. así como también para estimar las emisiones contaminantes en las mencionadas condiciones.

- Estimación de consumo de combustible

El consumo de combustible se ve altamente relacionado con el tránsito vehicular en el cual se conduce el vehículo en cuestión, los ciclos de manejo pueden aportar gran precisión en la estimación de consumo de combustible cuando se utilizan para este fin.

La forma en que comúnmente se mide el consumo de combustible por medio de un ciclo de manejo es reproduciendo el mismo en un dinamómetro de chasis con el vehículo automotor que estará sujeto a investigación. Se mide el volumen de combustible que tiene el tanque del vehículo antes de iniciar el ciclo y al finalizar éste se vuelve a medir, en ocasiones se utiliza un depósito temporal de combustible para facilitar las mediciones.

- Estimación de emisiones contaminantes

Los ciclos de manejo sirven para evaluar las emisiones contaminantes de las cuales será responsable un vehículo en caso de circular en las condiciones particulares de cierta zona. La medición, al igual que con el consumo de combustible, se realiza reproduciendo el ciclo de manejo en el dinamómetro de chasis.

Existen formas y equipo necesario para llevar a cabo correctamente las mediciones. En caso de que las mediciones se deban realizar cuando el vehículo automotor se encuentre circulando por las calles se pueden adaptar sensores de gases en la parte final de la etapa de escape e irse monitoreando constantemente.

- Velocidad Media

Al irse incrementando los problemas de circulación en las ciudades, se volvió materia de estudio la velocidad a la que transitaban los vehículos en las calles de la ciudad. A través de técnicas de ingeniería de tránsito es como se obtiene el valor de la velocidad media de tránsito en las ciudades.

Una forma de hacerlo es realizar conteos de vehículos que transitan por la vía, se puede realizar de forma manual (cuando una persona cuenta el número de vehículos), con contadores mecánicos (no necesitan un operador permanente y su funcionamiento se basa en diferentes principios) y con contadores portátiles (generalmente son tubos neumáticos y un operador puede manejar varios). Con el conteo realizado se calcula la velocidad según el tipo de vía y el aforo vehicular, esto se denomina nivel de servicio de la vía y con ello se obtiene un aproximado de la velocidad con la que circulan los vehículos en la vía (Montoya, 2005). Dichas investigaciones son realizadas con el objetivo de determinar si se requieren obras viales en ciertos puntos que presentan problemas muy severos de circulación.

Otra técnica que se utiliza es la del vehículo en movimiento, éste método se emplea para obtener volúmenes de tránsito en cierto tramos de interés de la vía, sin embargo, también es muy útil para determinar tiempos de traslado y velocidades de recorrido medias. Para llevar ésta técnica a cabo, se necesitan varios observadores dentro de un mismo vehículo que registran el tiempo de tránsito por las avenidas, la cantidad de vehículos que se cruzan con él en sentido contrario y los que se dirigen en el mismo sentido que son pasados o que se adelantan a él (Montoya, 2005).

Los ciclos de manejo también son comúnmente utilizados para determinar la velocidad media de tránsito en una ciudad. Al obtener el ciclo representativo de la zona en cuestión, la velocidad promedio del mismo podría ser representativa de la ciudad (dependerá de la forma en que fueron escogidas las rutas), de esa forma, más fácilmente se tendrá un valor aproximado y se evitarán costosos experimentos y levantamientos de datos.

### **2.4.3 El desarrollo de los ciclos de manejo**

Para iniciar, se debe definir el objetivo de la investigación, es decir, para que se usará el ciclo manejo obtenido. Existen ciertos conceptos que se deben tener en cuenta para la correcta definición del objetivo, entre ellos se pueden mencionar: la representatividad que se quiere que alcance el ciclo de manejo resultante, la diversidad de vehículos que se tomará en cuenta, las categorías vehiculares, el número de vías que serán objeto de investigación (carretera, autopista, urbano, rural, etc).

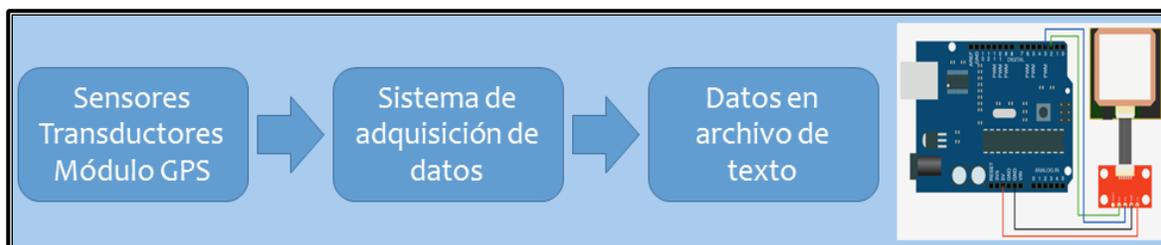
El propósito de definir el objetivo correctamente es la optimización y reducción de recursos necesarios para la investigación, es decir, conocer los parámetros que serán verdaderamente útiles en la obtención de los resultados deseados, por ello desde el principio se limitarán los parámetros sujetos a medición que pueden ser tan básicos como: velocidad, aceleración, posicionamiento geográfico, emisiones contaminantes, temperatura del agua o del aceite, etc., o tan complejas como fuerza del frenado, consumo de combustible o posición de la caja de velocidades (Rincón, 2001).

Para la medición de parámetros cada desarrollador se adapta a sus recursos disponibles y generalmente son ellos mismos quienes desarrollan el equipo con el que se realizarán dichas mediciones. Habitualmente se desenvuelve un dispositivo electrónico que permite tomar todas las mediciones a cada segundo, dicho dispositivo está conformado por:

- Un cerebro que dirige la toma de mediciones, además de marcar el tiempo en el que se toman las mismas y que finalmente se encarga de almacenar en la memoria.
- Sensores de diferentes tipos colocados estratégicamente en el vehículo, con la finalidad de tener correctamente monitoreados los parámetros.
- Etapa de acondicionamiento de señal, se encarga de eliminar ruidos y amplificar la señal, para evitar errores de cálculos y detectar errores en la tomas de los datos.
- Una memoria para almacenaje de los datos, que podría ser inoperante si se transmiten directamente a una computadora para su análisis.

Comúnmente, a grandes rasgos, así se compone un sistema de adquisición de datos. Cabe destacar que el sistema de adquisición debe tener características como: tamaño reducido al mínimo para evitar cualquier perturbación al vehículo o al conductor, consumo eléctrico limitado al máximo y debe contener una protección contra los cambios voltaicos en la red eléctrica del vehículo (Ramírez, 1997). En la imagen 15 se muestra la forma en la que puede operar el mencionado dispositivo.

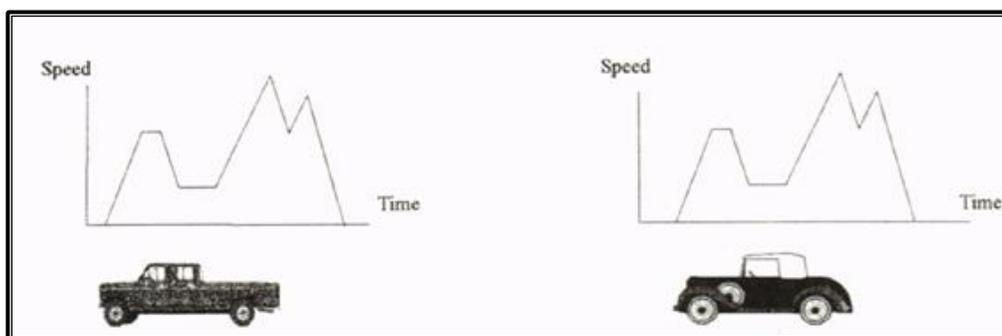
**FIGURA 15 “FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN”**



Algunos de los investigadores, dada la naturaleza de la técnica de ciclos de manejo, utilizan tantos vehículos como los recursos lo permitan, puesto que con mayor cantidad de datos se logra una mayor representatividad del ciclo de manejo, sin embargo, esto implica la instalación de sistemas en todos los vehículos que se utilicen para la obtención de datos. Es por ello que en algunos casos se opta por utilizar la técnica “chase car”.

El “chase car” es una técnica que se utiliza para disminuir la influencia de algunos factores externos que podrían afectar las mediciones como la diferencia entre vehículos de muestreo o los diferentes hábitos de manejo entre los diferentes conductores. Además, con la implementación del chase car se puede ahorrar recursos al no equipar todos los vehículos que serán sujetos de mediciones y solo invertir en instrumentación en uno o dos, lo cual reduciría costos significativamente. La técnica chase car consiste en seleccionar aleatoriamente un vehículo cualquiera en el tránsito de la zona de nuestro interés, el cual será seguido por el vehículo instrumentado a lo largo de la ruta particular del vehículo elegido, en caso de que el vehículo se detenga demasiado pronto, sospeche que es seguido (podría ser peligroso para las partes) o al presentarse cualquier anomalía en el trayecto, el vehículo instrumentado inmediatamente seguirá a otro, igualmente seleccionado (Sigua, 1997)

**FIGURA 16 “REPRESENTACIÓN DE LA TÉCNICA CHASE CAR”**



*Fuente: Development of driving cycle for metro Manila, Sigua.*

En la técnica chase car, el vehículo instrumentado se encargará de llevar las mediciones segundo a segundo de parámetros como la velocidad y la aceleración o desaceleración a las cuales están sujetos los vehículos, así como otros parámetros relacionados con la forma típica de manejo. Cabe destacar que dicha técnica sólo es útil para investigaciones relacionadas con el tránsito y no para investigaciones enfocadas a algunos vehículos en particular, esto debido a que se toman los parámetros del vehículo instrumentado y no

directamente del vehículo que es seguido. En la figura 16 se muestra la relación entre las mediciones del vehículo instrumentado y el vehículo que es seguido.

Con las necesidades técnicas cubiertas, se procede a tomar las muestras de datos, para ello, en algunas ocasiones se traza una ruta que cubra las zonas de interés para que el ciclo pueda ser representativo procurando que la misma incluya todo tipo de vialidades (autopista, carretera, vías primarias urbanas, vías secundarias urbanas, caminos rurales, etc.), sin embargo, en la mayoría de las experimentaciones realizadas hasta ahora, no se ha realizado un diseño de ruta, se ha trabajado con pequeños trayectos aleatorios de entre aproximadamente 10 a 15 minutos de duración.

El paso siguiente para la obtención de un ciclo de manejo es el procesamiento de los datos obtenidos. Para iniciar, se deben segmentar patrones de manejo, para ello se pueden crear divisiones de las vialidades por importancia tanto como se requiera (vía principal, vía secundaria, vía terciaria, u otro tipo de clasificación) y junto con ello se puede hacer una clasificación para el tránsito (ligero, pesado, hora pico, libre, u otra clasificación). Después se procede a (opcional), con base en una tabla de probabilidades (que se puede generar o utilizar una existente que sea similar), determinar que patrón de manejo es más común que preceda y siga al otro para así crear una cadena que posteriormente se llenará con cadenas representativas de cada patrón de manejo, generando así un ciclo de manejo de la duración deseada (André, 2006).

Ésta es solo una de las maneras en que se puede crear el ciclo de manejo como tal, existen que son similares, que pueden incluir un mayor procesamiento matemático de los datos o que incluso pueden ser más sencillos. Dependerá de la cantidad de datos, los alcances del proyecto y los recursos disponibles. Recalcando que no es necesario seguir el proceso mencionado anteriormente.

#### **2.4.4 Ciclos de manejo en el mundo**

Debido a los múltiples usos de los ciclos de manejo y a la vigencia que estos tienen en la actualidad, se han ido desarrollando en todo el mundo, desde Europa, hasta Asia y Norteamérica.

- Europa “Artemis Driving Cycle” (André, 2004)

Éste gran proyecto europeo fue realizado principalmente para generar y fijar un ciclo de manejo de referencia que incluyera a Italia, Suiza y el resto de la unión europea, de éste modo se aseguraría la compatibilidad y la integración de todos los sistemas europeos de inventarios de emisiones.

- Asia (Bangkok) (Tamsanya, 2009)

Algunos científicos de Bangkok en Tailandia, decidieron realizar un ciclo de manejo representativo de esa ciudad porque las autoridades seguían basando sus normas en ciclos desarrollados en la unión europea.

- Estados Unidos (Lin, 2003)

En los Estados Unidos, la Agencia de Protección al Ambiente (EPA por sus siglas en inglés) desarrolló los ciclos de manejo MOBILE6 en tres ciudades: Los Ángeles, Baltimore y Spokane.

- México (González, 2003)

En México también se han desarrollado ciclos de manejo para algunas de las ciudades más importantes del país, entre ellas, la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey.

Algunos de los objetivos de dichas investigaciones han sido: la homologación de vehículos ligeros, la validación de modelos que predicen el comportamiento de un vehículo en un trayecto y para tener un inventario confiable de emisiones contaminantes.

En la Universidad Nacional Autónoma de México, se han desarrollado algunos ciclos de manejo de la ZMCM. Sin embargo, no se tiene como objetivo el describir la situación de tránsito, o los factores que influyen directamente sobre la velocidad media, sus principales objetivos están asociados a la medición de contaminantes. Esta herramienta será muy útil en el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo, con ella se puede conocer el comportamiento del tránsito vehicular con precisión.

## CAPÍTULO 3 “METODOLOGÍA”

### 3.1 Metodología

La metodología del presente trabajo se basa en tres experimentos realizados para describir el comportamiento del tránsito de la ZMCM utilizando como parámetro principal de comparación la velocidad media de viaje. Además de proveer un panorama general del tránsito en la Ciudad de México, se propondrán nuevas estrategias en el ámbito de la distribución urbana de mercancías.

Dentro de la parte práctica de la investigación, se realizaron tres experimentos con diferente objetivo cada uno de ellos, para su realización, se tomaron como base algunos principios de los ciclos de manejo. A continuación se describe cada uno de ellos:

- i) El primer experimento se diseñó con el objetivo de determinar si existía una variación considerable en el tránsito de la ZMCM dependiendo del día de la semana que se condujera, la hipótesis inicial es que no existe una variación grande entre los días de semana y que, en caso de existir ésta variación, no sería considerable, el sábado no se incluyó por tener un comportamiento diferente y el domingo existe una menor circulación de vehículos automotores y no existen mayores conflictos viales. Cabe destacar que los días de interés para la investigación, son los lunes, martes, miércoles, jueves y viernes debido a que el mayor porcentaje de las operaciones de transporte relacionadas a la DUM, se realizan estos días. El experimento se realizó durante dos semanas, en la primer semana se tomó una muestra de datos al día a la misma hora, en la segunda semana se realizó de la misma forma para tener mayor cantidad de información para la etapa de tratamiento estadístico.
- ii) El segundo experimento se diseñó con el objetivo de saber si existe alguna diferencia en el comportamiento del tránsito entre un día hábil normal y un día festivo. Se prevé, por las múltiples actividades que se dejan de realizar, que existirá una diferencia y ésta será significativa. Para el experimento se seleccionaron tres días festivos nacionales o tres días de asueto académico (seleccionado del calendario oficial de la SEP), así como tres días hábiles los cuales servirán como base de comparación.

- iii) El tercer experimento se diseñó con el objetivo de describir el comportamiento del tránsito vehicular a lo largo del día. Es bien conocido gracias al conocimiento empírico, que la velocidad media tiene variaciones dependiendo la hora del día y que ésta, suele presentar sus valores más bajos por la mañana y por las tardes-noches. Por lo tanto, de éste experimento se obtuvo una gráfica de valores de velocidad media a diferentes horas del día. Se realizó el experimento a lo largo de 3 semanas, se tomaron 35 muestras en diferentes días de la semana y a diferentes horarios, como en el experimento i no se encontró una diferencia considerable en el tránsito dependiendo del día, las muestras se tomarán en tres semanas de lunes a viernes.

Para la realización de los experimentos se trazaron dos rutas (una para el experimento I y II, y otra para el experimento III). La primera ruta es de mediana longitud y es representativa de un viaje dedicado exclusivamente a la distribución urbana de mercancía, además de que ésta tiene un punto final diferente al del inicio. La segunda ruta igualmente es de longitud media, se trazó procurando incluir todos los tipos de vialidad descritos en el capítulo 1, a diferencia de la primera ruta, ésta es un circuito, es decir, el punto de inicio es también el punto final.

Seguido a la obtención de los datos, se realizó un análisis estadístico de los experimentos i y ii mediante la herramienta llamada análisis de varianza (ANOVA), que es una herramienta muy utilizada para la comparación de medias. Dicho análisis se realizó para saber si existía diferencia alguna entre los valores de las velocidades en las diferentes muestras. Además, se verificaron 3 supuestos: igualdad de varianzas u homocedasticidad, normalidad e independencia (Gutiérrez, 2012).

Para el desarrollo de los experimentos se solicitó la colaboración de una empresa que pudiera solventar algunos gastos de combustible y proveer el vehículo necesario para la toma de datos.

### 3.2 Colaboración en el desarrollo de los experimentos

Las operaciones de transporte y entrega de mercancía asociadas a la DUM se realizan en vehículos de diferentes capacidades y condiciones, la capacidad puede ir desde una motocicleta que se encarga de repartir pequeños paquetes hasta camiones tipo “rabón” o tráileres, pasando por camionetas de mediana capacidad, es por ello que para garantizar una correcta recolección de datos, se debe seleccionar un vehículo que generalmente sea utilizado para dichas operaciones.

Dada la necesidad de disponer de un vehículo de carga, se procuró una empresa dispuesta a trabajar conjuntamente para la toma de datos, que pudiera proveer el vehículo requerido para dicho propósito. El vehículo debía ser representativo de la DUM en la ZMCM, sin llegar a ser de muy poca o de excesiva capacidad, es decir, alrededor de 3.5 toneladas, o de tamaño y capacidades similares. Entre las opciones destacaron un vehículo repartidor de cerveza con capacidad para 6 pallets, una vannette repartidora de pan y un vehículo de 3.5 toneladas, adaptado para la distribución de los productos de una panadería.

Se consiguió trabajar conjuntamente con una pequeña empresa dedicada a la elaboración de pan, pasteles y productos relacionados con este giro comercial. La empresa además de poseer un local comercial en sus instalaciones, tiene contratos con algunas cafeterías del oriente, centro y sur de la ZMCM, por lo que se encarga de distribuir sus productos con regularidad en estas zonas, para ello cuenta con varios vehículos, entre ellos uno de 3.5 toneladas adaptado especialmente para cumplir este propósito. Se tienen diferentes rutas de entrega, se realizan todos los días de la semana exceptuando los domingos.

Se ideó una estrategia ganar-ganar para ambas partes en la que se compartió conocimiento y tiempo entre ambas partes además de recursos materiales. Por una parte, la empresa se comprometía a prestar el vehículo con conductor en el tiempo que duraran los muestreos a cambio de un estudio de tiempos y movimientos en su proceso de distribución. Con este acuerdo ambas partes se vieron beneficiadas, trabajando de una manera bilateral.

### 3.3 Equipo y software utilizados

Para la realización del proyecto es necesario cierto equipo, entre ellos el vehículo donde serían realizados los muestreos y el gps para registrar la posición geográfica para, de este modo, determinar la velocidad a la cual se desplaza el vehículo.

#### 3.3.1 Vehículo utilizado

Como se describió anteriormente, el vehículo debía ser representativo de los utilizados para la distribución urbana de mercancía, es por ello que se eligió un vehículo de capacidad de carga “media”, propiedad de la empresa colaboradora, que generalmente es utilizado para distribuir a establecimientos que manejan una alta rotación de los productos de la compañía. La empresa también cuenta con vehículos pequeños, sin embargo, se consideró que utilizar un vehículo mediano podría entregar resultados más representativos.

El vehículo utilizado es de combustión interna y utiliza gasolina como único combustible, con capacidad de 3.5 toneladas de carga, en su caja cerrada cuenta con un sistema de refrigeración para mantener la cadena de frío del producto. El motor es un V8 con 350 caballos de fuerza, teniendo como rendimiento aproximado de combustible en ciudad de entre 8 y 6 km/l, que dependerá del uso del sistema de refrigeración, el peso de la carga, el inflado de los neumáticos, entre otros factores.

**FIGURA 17 “IMAGEN DEL TIPO DE VEHÍCULO UTILIZADO”**



*Fuente: Recurso electrónico ([www.ford.com](http://www.ford.com))*

### 3.3.2 Sistema de posicionamiento

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) es un sistema conformado por 24 satélites que fue diseñado y es mantenido por el gobierno de los Estados Unidos. El sistema de satélites se ubica estratégicamente y éstos giran alrededor de la tierra de forma perfectamente sincronizada y con su ubicación conocida, lo que permite conocer la localización de cualquier dispositivo GPS en tierra, mar o aire con gran nivel de precisión. El nivel de precisión dependerá de obstáculos o interferencias que pudieran existir en el rastreo, principalmente se ve afectado en las grandes ciudades por los edificios altos, red eléctrica, o en zonas con terrenos escarpados por la altura de las montañas, grietas, etc. El tiempo de respuesta para la localización de un dispositivo receptor puede variar, sin embargo, por muy rápido que éste sea, jamás se podrá tener en tiempo real.

Debido a este atraso, no sería muy recomendable utilizar una tecnología GPS simple. Existen otras tecnologías que utilizan el GPS como base y se ayudan de otras para tener una mayor precisión y/o velocidad de rastreo. Tal es el caso de la tecnología A-GPS o GPS asistido que se ha incorporado recientemente a teléfonos celulares inteligentes de gama media y alta. El A-GPS basa su funcionamiento en la tecnología GPS pero se auxilia de otras fuentes de información como las torres de señal de servicios móviles y de las redes inalámbricas disponibles (puntos wi-fi) para proveer una mejor localización, con mayor precisión y en menor tiempo que un equipo GPS básico.

Debido a estas ventajas y a la asequibilidad de la tecnología A-GPS disponible en los celulares se optó por utilizar un teléfono celular de gama alta que en conjunto con un software permitiera tomar las mediciones con buena precisión. La tecnología A-GPS consume muchos recursos incluyendo memoria RAM, datos y por tanto batería, lo que obliga a que tener fácil acceso a una fuente de energía.

Además de las ventajas anteriores, la tecnología a-gps utilizada en ciudades es muy útil debido a la existencia de un gran número de redes inalámbricas (puntos wi-fi) y de torres de telefonía, por lo que la precisión y el probable error se verá minimizado al utilizar el aparato celular de gama alta en conjunto con la tecnología A-GPS.

### 3.3.3 Software

Evaluadas las ventajas de utilizar la tecnología A-GPS que se encuentra disponible en la mayoría de los celulares utilizados actualmente, se decidió utilizar la misma en un teléfono móvil con sistema operativo IOS7, es considerado un sistema más robusto comparado con los otros del segmento y debido a la gran carga de datos, es recomendable utilizarlo para evitar fallas en la toma de datos.

Posterior a la selección de la plataforma en que funcionará la aplicación, se realizó una pequeña investigación acerca de las aplicaciones disponibles para la obtención de velocidad de tránsito. La aplicación debía ser compatible con la tecnología A-GPS, en todo momento debía tener la posición del vehículo actualizada y debía servir como velocímetro externo al del vehículo, además de cumplir todos estos requisitos debía permitir el acceso al usuario a la caja negra del GPS, guardando estos datos por cada viaje realizado. La tabla 5 muestra algunas de las principales características de las aplicaciones:

**TABLA 5 “COMPARACIÓN DE SOFTWARE”**

<b>Características</b>	<b>Speedometer Complete</b>	<b>Speedometer</b>	<b>Speed Tracker</b>
Velocímetro	Si	Si	Si
Interfaz	Sencilla	Complicada	Sencilla
Mapa integrado	No	No	No
Estimador consumo de combustible	No	No	Si
Memoria de viaje	No	Si	Si
Generación de archivos	No	Si (tiempo limite de 20 minutos por viaje)	Si (sin limite de tiempo por viaje)
Costo	No	Si	Si

Dadas las características de cada una de las aplicaciones se seleccionó la cual representa la mejor opción para el proyecto: “SpeedTracker”. Dicha aplicación es un velocímetro combinado con una computadora de viaje, que indica cuál es la velocidad a la que se está viajando, la calcula por medio de la posición geográfica y el tiempo

transcurrido entre puntos. Muestra la velocidad con un punto decimal de precisión en la pantalla. La aplicación también es capaz de generar datos cada segundo con la velocidad, posición geográfica (latitud, longitud y altitud), tiempo transcurrido desde el inicio del viaje que se tienen en ese instante. Los datos son guardados en diferentes formatos para su posterior exportación y procesamiento.

Speed Tracker es una aplicación muy confiable y no tiene errores que pudieran contaminar la toma de datos para los experimentos. Es bastante robusta y puede generar archivos de gran tamaño por si la ruta grabada es muy larga.

### **3.4 Experimento I**

El objetivo del experimento I es determinar si existen diferencias entre el tránsito vehicular que se presenta en los días de la semana tomando como base de interés cinco días: lunes, martes, miércoles, jueves y viernes. En este experimento se espera un comportamiento de tránsito similar en los cinco días, pudieran existir pequeñas variaciones pero no tendrían gran relevancia.

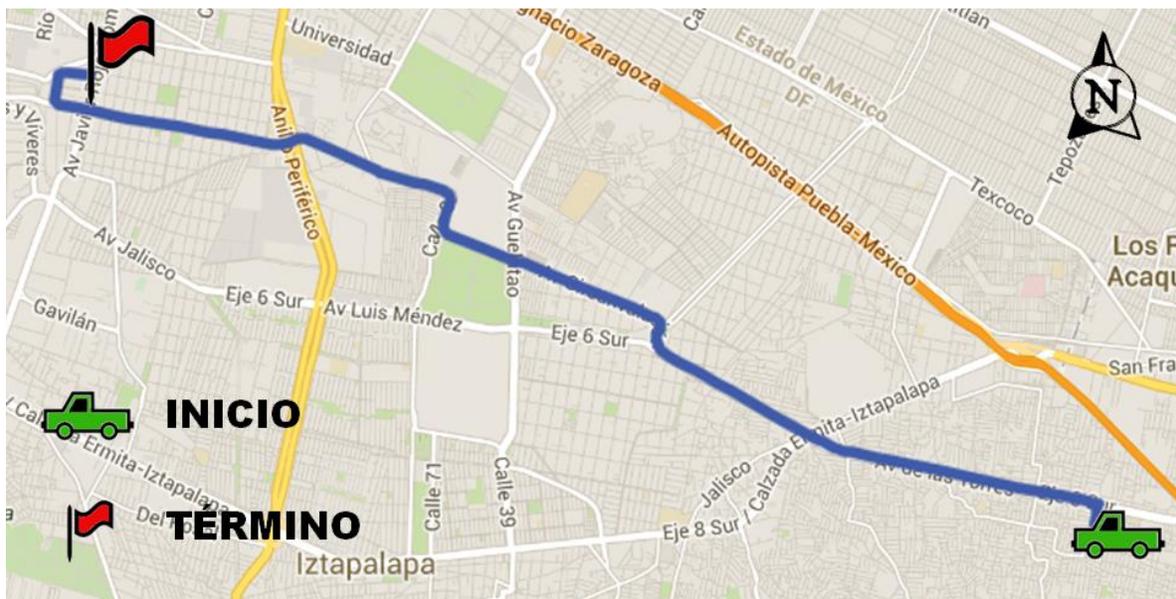
El experimento I es importante para la investigación porque además de conocer el comportamiento del tránsito vehicular a lo largo de una semana “normal”, es un requisito realizarlo para, tras obtener y analizar las muestras, diseñar correctamente el experimento III. Esto debido a que el último experimento se debe realizar en el día que se presente más tráfico, es decir, en el día en que la velocidad media sea la menor en caso de existir variaciones considerables entre los días, en caso contrario, en que todos los días presenten un comportamiento similar, el experimento III se podrá realizar en todos los días de la semana.

Generalmente los ciclos de manejo representativos tienen una duración menor a la media hora de viaje porque el perfil de velocidad sería muy grande si la duración fuera mayor, partiendo de este y otros preceptos se fijaron las restricciones que se debían cumplir para el trazado de la ruta en la que se realizarían los recorridos, las restricciones se muestran a continuación:

- Recorrido de duración no mayor a 40 minutos.
- Recorrido no mayor a 15 kilómetros.
- Abarcar la mayor cantidad de tipos de vialidad.
- Ser representativo de un viaje de DUM.

En colaboración con la empresa se logró adecuar una ruta que es cubierta con regularidad para hacer los recorridos con base en ella. La ruta incluye varios tipos de vialidad para hacerla representativa, el punto de inicio está marcado en las instalaciones de la empresa al oriente de la ZMCM y el punto final en las inmediaciones de la Central de abasto de la Ciudad de México ubicada en la delegación Iztapalapa. Con una longitud aproximada de 12 kilómetros, se estima un tiempo de recorrido de alrededor de 30 minutos. La ruta fue escogida porque cumple con todas las restricciones antes mencionadas y realiza un recorrido típico de la entrega de un producto, además de que es una de las zonas donde más viajes ocurren relacionados con DUM, lo que significa que la ruta mostrará resultados confiables.

**FIGURA 18 “RUTA A”**



Los recorridos se realizarán de cierta forma en cuanto a días a realizarse, horario elegido y número de muestras realizadas. Dichos recorridos también se limitan por los recursos disponibles, por lo que no se puede realizar un número indefinido de ellos. Para iniciar el diseño se seleccionó un horario en específico en el cual se realizarían todos los recorridos

y además, debía coincidir con la entrega de mercancía, en el caso de este cliente no es tan estricta, se limitaba a ser por la tarde, el objetivo de que todos los recorridos se realicen a la misma hora es mantener las condiciones y que la única variable sea el día. El número de recorridos no debía ser muy grande por el combustible utilizado en cada uno de ellos (los repartos no se realizan todos los días) pero se debían considerar los factores que pueden influir en la variación del tránsito. Finalmente los recorridos se realizarían de la siguiente forma:

- 20 recorridos
- 4 recorridos por día (lunes-viernes)
- Hora de recorrido fija (3 pm)
- Técnica “chase car”

Los datos del experimento se guardan automáticamente en la aplicación, la memoria del celular y en la nube al momento de realizar el recorrido, no es necesario importar inmediatamente a un computador. El orden ideal de hacer los recorridos se determinó de forma completamente aleatoria.

### **3.5 Experimento II**

El objetivo del experimento II es determinar si existe diferencia entre la velocidad media de tránsito en un día hábil “normal” y un día festivo “anormal”. Se espera que exista una variación considerable entre la velocidad media de un día “normal” y uno “anormal”.

La importancia del experimento II radica en que con los resultados, se confirmará la afectación de actividades cotidianas al tránsito vehicular, además de que se podrá conocer el valor de dicha afectación. Así también, se vuelven de interés los resultados de este experimento para el posterior diseño del experimento III, para realizarlo en días de naturaleza similar en cuánto a tránsito vehicular se refiere.

Como se destacó en el experimento anterior, los ciclos de manejo suelen ser de cierta forma en tiempo y distancia para asegurar su validez. Es por ello que las mismas restricciones que aplicaron en el experimento I, aplican también para este experimento, por ello y debido también a las limitaciones en cuanto a recursos disponibles, se optó por realizar el experimento II utilizando la misma ruta del experimento I. De este modo, se

podrán dejar de realizar algunos trayectos (días hábiles “normales”) y se realizarán los trayectos que serán representativos de los días festivos “anormales”.

Teniendo definida la ruta se debe determinar la forma en que serán realizados los recorridos en número y hora. Puesto que también se harán comparaciones entre grupos de días, es conveniente fijar una hora para realizar dichos recorridos, como anteriormente se fijaron las 15 horas, en este caso será lo mismo. Las muestras tomadas se deberán tomar a la misma hora y bajo las mismas condiciones, para que posteriormente se pueda analizar por medio de grupos (normal y anormal) los datos obtenidos. Los recorridos se realizarán de la siguiente manera:

- 6 recorridos (3 por grupo)
- 1 recorrido diario (lunes-miércoles)
- Hora de recorrido fija (3 pm)
- Técnica “chase car”

Posterior a la obtención de los datos de los recorridos se procederá a analizarlos en dos grupos: normales y anormales, se prevé que la diferencia de velocidad media será considerable.

### **3.6 Experimento III**

El experimento III tiene como objetivo principal describir el comportamiento del tránsito vehicular a lo largo del día en los diferentes tipos de vialidad (mencionados en el capítulo 1). En este experimento se seleccionaron tres semanas en las cuales se realizarán 35 recorridos para describir el comportamiento del tránsito vehicular con base en la velocidad media característica para ciertos momentos del día. Esto con el objetivo de determinar los mejores momentos de entrega y las vialidades más adecuadas para realizar el recorrido de entrega, además de, con base en los resultados obtenidos, proponer estrategias adecuadas al tránsito horario de la ZMCM.

En el experimento III se espera una clara variación horaria del tránsito en la ZMCM, sin embargo, dicha variación puede depender en gran medida del tipo de vialidad en cuestión, es por ello se deberán incluir varios tipos de vialidad. Se puede intuir que las horas con mayores conflictos viales serán por la mañana (entre 6 y 9 am), por la tarde

(entre 1 y 3 pm) y en la tarde-noche (entre 6 y 9 pm). Cabe destacar que por medio del conocimiento empírico se conocen estos horarios conflictivos, sin embargo, con este experimento se pretende conocer que tantas afectaciones viales se presentan en estos horarios y como se ve afectado cada tipo de vialidad en particular.

El experimento III es la base de esta investigación porque para proponer nuevas estrategias en la DUM es necesario conocer el comportamiento horario del tránsito, no es suficiente una velocidad media de circulación para poder hablar de problemas viales y sus soluciones. Además con los recorridos que se realizarán por todos los tipos de vialidad será posible determinar velocidades medias para todos ellos e incluso generar ciclos de manejo por tipo de vialidad para, en caso que se requiera, se pueda calcular con gran nivel de exactitud el tiempo estimado de traslado de un punto a otro basado en estadísticas generadas con anterioridad.

Las restricciones fijadas para los experimentos anteriores también aplican para el experimento III, sin embargo, para este experimento estarán dentro de los límites establecidos porque se deben incluir todos los tipos de vialidad lo que implica una mayor longitud del recorrido y, al realizarse a diferentes horas del día, una mayor variabilidad en tiempo de recorrido.

Como se mencionó anteriormente, la ruta debía incluir todos los tipos de vialidad que se mencionaron en capítulos anteriores. Fueron planteadas varias opciones de zonas para el trazado de la ruta y fueron considerados diferentes factores como:

- Zonas de obras
- Existencia de los tipos de vialidad
- Zonas con tránsito extremadamente variable

Tras una pequeña evaluación junto con personal de la empresa, se seleccionó un área al sur de la ZMCM que cumplía con todos los requisitos anteriormente descritos, de la cual, además de poder adaptar un recorrido que incluyera todos los tipos de vialidad se podía diseñar en una distancia a ser recorrida razonable. Contaría con recorridos en vialidades primarias de diferentes capacidades y características como son Periférico Sur, Avenida de los Insurgentes y Eje 10 Sur, asimismo, también recorrería vialidades secundarias dentro de varias colonias en el área.



Para el experimento III los recorridos se realizarán de forma más compleja y de manera completamente aleatorizada. Para la etapa muestreo se dispondrá de 3 semanas para realizar 35 recorridos. Los recorridos se realizarán de las 5 am a las 10 pm (con un total de muestreo de 17 horas) de lunes a viernes. Para el muestreo aleatorio se segmentaron las 17 horas entre el número de recorridos designado, quedando así, 0.5 horas que será el tiempo entre cada inicio de recorrido, es decir, idealmente, si en un solo día se tomaran todos los recorridos, un nuevo recorrido iniciaría cada media hora. Sin embargo, para asegurar la aleatoriedad se nombraron los recorridos haciendo que el número 1 fuera el de las 5 am, el 2 de las 5:30 am y así sucesivamente hasta el 35 de las 10 pm. Posteriormente se nombraron los 15 días disponibles para los recorridos y se hicieron por triplicado (45 para cubrir todos los recorridos), con ello se eligió un número de recorrido y un número de día/semana teniendo un calendario de recorridos por realizar donde, en la mayoría de los días, se tendrían 2 recorridos y en algunos 3 recorridos. En el anexo A se muestra el calendario de recorridos.

Al momento de la realización de recorridos, se debía contar con un apoyo escrito para la información recabada, para ello se diseñó un formato para poder coleccionar los principales datos y observaciones pertenecientes a ese recorrido. Ese formato debía contar con hora e inicio de término de cada tramo, observaciones del clima y anotaciones de incidentes de tránsito. Dicho formato se muestra en el anexo A.

## **CAPÍTULO 4 “ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y PROPUESTA DE ESTRATEGIAS”**

### **4.1 Análisis de información**

Posterior a la realización de los experimentos en campo, se recabó suficiente información para proceder con el tratamiento estadístico y así cumplir con los objetivos de cada experimento. Los primeros dos experimentos requirieron la verificación de supuestos y un posterior análisis por el método ANOVA. El tercer experimento solo requirió clasificación de información.

#### **4.1.1 Experimento I, tratamiento estadístico**

El objetivo del primer experimento es determinar si existen diferencias entre el tránsito vehicular que se presenta en los días de la semana tomando como base de interés cinco días: lunes, martes, miércoles, jueves y viernes. Para ello se reunió información de cada uno de los días mencionados, se realizaron 4 recorridos por día haciendo un total de 20. Estos fueron realizados aleatoriamente en la medida de los recursos disponibles.

Por medio de un análisis de varianza se pretende determinar si existe diferencia en el tráfico de estos 5 grupos (lunes-viernes) con ayuda de la variable de salida, que en este caso en particular, es la velocidad media de tránsito. Sin embargo, antes de realizar el ANOVA se debe verificar que se cumplan los tres supuestos: independencia, homocedasticidad y normalidad para así validar el resultado obtenido por medio del análisis de varianza.

Es posible realizar las pruebas de verificación de los tres supuestos por medio de software estadístico, se utilizó el software “Statistical Package for Social Sciences o SPSS”.

El supuesto de normalidad se verificó mediante la prueba Shapiro-Wilk, obteniendo como resultado la aceptación de la hipótesis nula que dice que los datos presentan una distribución normal. En el Anexo B se muestra a detalle la verificación del supuesto.

El supuesto de homocedasticidad se verificó mediante la prueba de Levene. Se aceptó la hipótesis nula y se confirmó que las varianzas son iguales. En el Anexo B se muestra a detalle la verificación del supuesto.

El supuesto de independencia, que es considerado el más importante de los tres, se verificó utilizando el método Durbin-Watson, se obtuvo un valor de 1.971, que es muy cercano a 2, por lo tanto se concluye que los datos son completamente independientes. En el anexo B se muestra a detalle la verificación del supuesto.

Tras la verificación de los 3 supuestos: independencia, normalidad e igualdad de varianzas y viendo que las pruebas resultaron favorables se debe conseguir el objetivo del experimento I.

La tabla 7 muestra los datos obtenidos tras la realización de los recorridos, cabe mencionar que cada uno de esos datos de velocidad media provienen de aproximadamente 700 datos de velocidad que fue registrada segundo a segundo en los recorridos.

**TABLA 7 “DATOS DEL EXPERIMENTO I”**

LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES
27.4178	29.2889	28.3372	27.9830	24.1913
28.8405	28.4974	23.3777	25.6435	21.5109
24.0511	26.2057	25.7568	22.6843	21.0401
21.7714	24.7212	26.5122	23.5750	27.4508
Datos de velocidad expresados en km/h				

A estos datos les fue realizado el ANOVA de un factor, que en este caso es el de los días de la semana, pues se trata de determinar si existe diferencia en la velocidad media de tránsito entre cada día.

**TABLA 8 “ANOVA DEL EXPERIMENTO I”**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Prueba F	Significancia
Inter-grupos	28,542	4	7.135	1.076	0.403
Intra-grupos	99,462	15	6.631		
Total	128,004	19			

La tabla 8 muestra los resultados de la aplicación del ANOVA a los datos del experimento I. En la última columna se observa el valor de significancia de 0.403 que es mayor que el p-value de 0.05, esto quiere decir que se encuentra en la región de aceptación a un alfa del 5%, por tanto, la hipótesis nula se acepta y se dice que no existe diferencia significativa en las medias de los 5 diferentes grupos, es decir, la velocidad media no varía dependiendo del día hábil.

#### **4.1.2 Experimento II, tratamiento estadístico**

Para este experimento se tomaron 3 muestras para cada tipo de día, “normal” y “anormal”, haciendo un total de 6.

Antes de realizar el ANOVA se verificaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia para dar validez a los resultados finales del método.

El supuesto de normalidad se verificó con la prueba de Shapiro-Wilk, los datos resultaron ser normales al encontrarse el valor dentro de zona de aceptación a un nivel de significancia del 5%.

El supuesto de homocedasticidad se verificó por medio de la prueba de Levene, la hipótesis nula se aceptó porque el estadístico se encontró dentro de la región de aceptación con un nivel de significancia del 5%, por tanto, se dice que las varianzas son iguales.

El supuesto de independencia se verificó con la prueba Durbin-Watson, los datos resultaron ser independientes debido a que el valor del estadístico fue de 1.916, muy cercano de 2, valor que se obtiene cuando las muestras son completamente independientes.

Tras la verificación de los 3 supuestos, cuyo desarrollo a detalle se puede observar en el anexo C, se debe realizar la comparación de medias para saber si existe diferencia entre ellos

Se cuenta con 6 datos divididos en dos grupos “normal” y “anormal”, 3 datos de velocidad media en cada grupo. Estos datos son la media de las mediciones de velocidad colectadas durante los recorridos realizados. En la tabla 9 se muestran los datos del experimento II.

**TABLA 9 “DATOS DEL EXPERIMENTO II”**

Día Hábil "Normal"	Día de asueto "Anormal"
22.9112	28.8770
25.4634	27.8121
23.1290	27.7668
Velocidad expresada en km/h	

Para comparar las medias de los dos diferentes grupos del experimento II es necesario realizar un ANOVA de un factor. Este análisis de varianza es particular porque solo comparará dos grupos lo cual lo transforma en una prueba t para muestras independientes. Primero se realizará el análisis de varianza y después la prueba t para corroborar que arrojan el mismo resultado.

En la tabla 10 se muestra el resultado de la aplicación del ANOVA a los datos del experimento II. Se rechaza la hipótesis nula debido a que el valor del estadístico se encuentra fuera de la región de aceptación, por lo tanto, se afirma que existe diferencia significativa entre las medias de los 2 grupos.

**TABLA 10 “ANOVA DEL EXPERIMENTO II”**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Prueba F	Significancia
Inter-grupos	27.960	1	27.960	23.334	0.008
Intra-grupos	4.793	4	1.198		
Total	32.753	5			

Para comprobar que se obtiene el mismo resultado con una prueba t para muestras independientes, se realizó la prueba en el software obteniendo los resultados mostrados en la tabla 11.

**TABLA 11 “PRUEBA T DEL EXPERIMENTO II”**

		t	gl	Significancia (bilateral)	Diferencia de medias	Error típico de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
							Inferior	Superior
Velocidad Media	Se han asumido varianzas iguales	-4.831	4	.008	-4.3174	0.893778	-6.7989	-1.8358

Tras la aplicación del ANOVA y la prueba t de Student para muestras independientes cuyos resultados fueron los mismos, se concluye que si existe diferencia entre los grupos y que por lo tanto sus velocidades medias difieren, significando para la investigación que existe una diferencia en la velocidad media de tránsito en días hábiles y días de asueto.

#### 4.1.3 Experimento III, procesamiento de información

Con el experimento I se demostró con el que el tránsito tiene un comportamiento similar de lunes a viernes, además de que, con el experimento II se corroboró que los días anormales presentan un comportamiento diferente, donde el valor de la velocidad media se incrementa, por lo tanto no se incluyeron días “anormales” en el muestreo y este se realizó de lunes a viernes.

En la etapa de toma de datos se realizaron recorridos que incluían todos los tipos de vialidad, sin embargo, para su análisis se debe separar la información, quedando así un perfil de velocidades medias para cada tipo de vialidad.

Vialidad primaria “acceso controlado” (Periférico)

El tramo del recorrido correspondiente a esta vialidad fue de aproximadamente 4 kilómetros. Se realizaron las réplicas programadas, sin embargo, en ocasiones existían sucesos imprevistos a lo largo del recorrido que pudieron afectar la medición, en estos casos, se terminaban los recorridos pero se anotaba en las observaciones la descripción del suceso, la mayoría relacionados con accidentes de tránsito.

Después de la selección de datos de los recorridos correspondientes a la vialidad primaria se realizó una tabla para registrar las velocidades medias, esta es la tabla 12.

**TABLA 12 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: ACCESO CONTROLADO”**

Hora	Velocidad (km/h)	Hora	Velocidad (km/h)
05:10	51.3472091	14:04	24.5438493
05:32	46.0875101	14:18	23.8634682
06:07	35.7769230	14:58	17.8566929
06:46	24.9271028	15:36	24.8567670
07:05	19.8375291	16:16	37.9803149
07:40	12.5837504	16:28	35.8563902
08:00	12.9756302	16:53	36.8496702
08:25	14.5678294	17:31	30.0006753
09:12	18.4396830	17:58	25.8546039
09:38	25.9854829	18:31	17.2660447
10:05	13.9456834	19:06	18.4867928

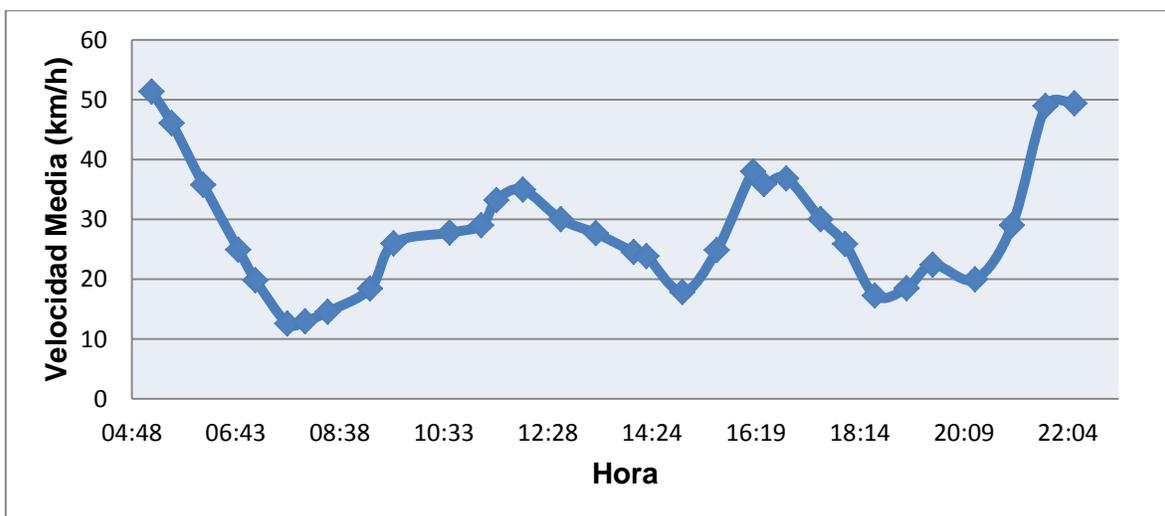
10:40	27.7652582
11:15	28.9846024
11:32	33.2108695
12:01	34.9476108
12:43	30.0087654
12:59	10.9846538
13:22	27.6573454

19:35	22.4039604
20:02	9.6758331
20:22	19.9846927
21:03	29.0345372
21:40	48.9293478
22:12	49.3879912

En la tabla 12 se muestran las velocidades media a las horas indicadas en el “tramo1” correspondiente a una vialidad primaria de acceso controlado. Además, en color rojo se indica la mínima velocidad encontrada y en color verde se resalta la máxima.

Para visualizar mejor los resultados, en el gráfico siguiente (figura 20) se muestran las velocidades medias. En la gráfica se omitieron 3 valores: 10:05, 12:59 y 20:02. Los dos primeros no son confiables porque en el trayecto ocurrieron accidentes y el tercero porque se presentó lluvia durante el trayecto (esto quedó registrado en el apartado de observaciones del formato de toma de datos).

**FIGURA 20 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD DE ACCESO CONTROLADO”**



En la gráfica de velocidades media para vialidad de acceso controlado se observa una mínima a las 07:40 de 12 kilómetros por hora y la máxima de 51 kilómetros por hora se

presenta a las 05:10. Esto representa una variabilidad muy grande, además existen 3 denominadas horas pico, la primera de ellas es por la mañana entre las 06:00 y las 09:00, la segunda entre las 2 y 3 de la tarde y la tercera entre 6 y 9 de la noche. Claramente hay un mayor número de vehículos desplazándose en estas horas. Mientras que después de las 10 de la noche y hasta antes de las 5 de la mañana se puede desplazar sin mayores contratiempos.

Vialidad primaria “Arteria principal” (Av. Insurgentes)

El tramo que corresponde a “arteria principal” en el recorrido tiene una longitud de aproximadamente 4.5 kilómetros. En este recorrido también se realizaron las réplicas programadas en el calendario, sin embargo también hubo datos que fueron excluidos por sucesos detectados en el trayecto.

Se aislaron los datos correspondientes a este tramo, posteriormente se obtuvo la velocidad media de cada una de las réplicas y se colocaron en la tabla 13.

**TABLA 13 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: ARTERIA PRINCIPAL”**

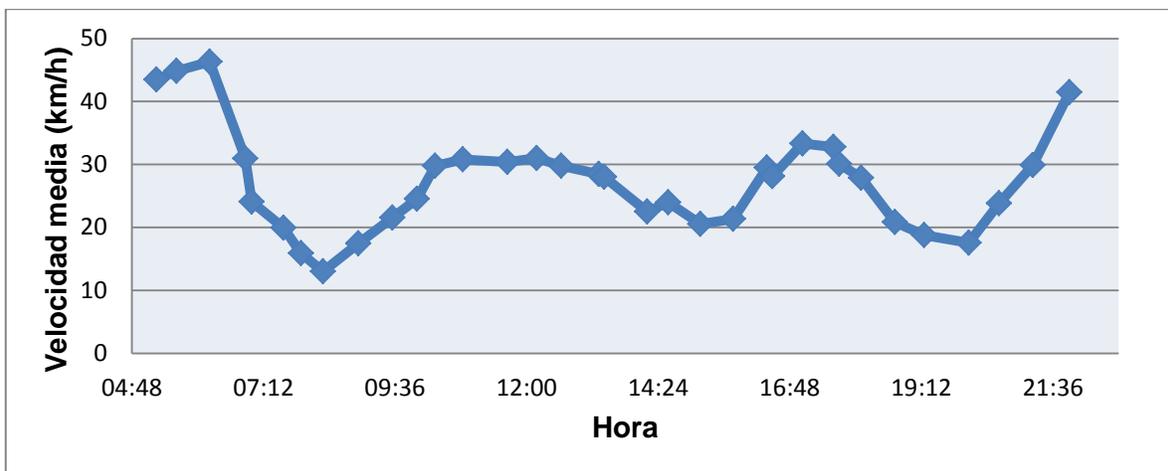
Hora	Velocidad (km/h)	Hora	Velocidad (km/h)
05:15	43.4983574	14:12	22.51472868
05:37	44.8452961	14:35	23.9535733
06:13	46.2877193	15:10	20.5239111
06:52	30.9451048	15:46	21.3499203
06:59	24.075	16:23	29.48196721
07:34	19.948581	16:29	28.1020312
07:53	15.8574939	17:02	33.3309126
08:17	13.0043583	17:36	32.76547682
08:56	17.4302984	17:42	30.1003683
09:33	21.5628748	18:06	27.8745324
10:00	24.5435264	18:43	20.85775862
10:20	29.7917365	19:15	18.7834922
10:50	30.7766129	19:45	7.8485031

11:39	30.38389831
12:11	31.0021657
12:38	29.7634581
13:19	28.4756871
13:25	28.0005349

20:04	17.5509326
20:37	23.8192487
21:14	29.8723782
21:54	41.47264151

En la tabla se observan algunas celdas sombreadas. La sombra en color verde corresponde a la velocidad más alta de 46 kilómetros por hora a las 06:13. La sombra en color rojo corresponde a la más baja de 13 kilómetros por hora a las 08:17. La sombra en color gris corresponde a un dato con observación de lluvia y accidente automovilístico, esto inutilizó el dato, por lo que quedó excluido de la gráfica mostrada en la figura 21.

**FIGURA 21 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: ARTERIA PRINCIPAL”**



La gráfica va desde un poco antes de las 5 am donde la velocidad es superior a los 40 kilómetros por hora, hasta después de las 10 pm donde la velocidad también supera los 40 kilómetros por hora, es muy probable que esta velocidad continúe constante o incluso se incremente en horas de la madrugada. La gráfica tiene un comportamiento muy similar a la de vialidad de acceso controlado, también presenta 3 horarios pico: entre 6 y 9 de la mañana, entre 2 y 3 de la tarde y entre 6 y 9 de la noche. Las velocidades máximas y

mínimas también son similares. Esto es normal porque son de características muy similares en cuanto a capacidades y señalamientos viales.

Vialidad primaria “Eje vial” (Eje 10 sur)

Este tramo está comprendido entre avenida de los Insurgentes y la calle de Papalotl sobre eje 10 sur, tiene una longitud de aproximadamente 3.5 kilómetros. Aquí se realizaron las réplicas programadas, registrándose solo un contratiempo debido a lluvia.

Los datos correspondientes de los recorridos fueron separados de los demás, de cada uno de ellos se obtuvo un promedio, este se convirtió en la velocidad media de tránsito característica de esa hora, obteniendo finalmente una tabla con 35 valores de velocidad entre las 5 de la mañana y las 10 de la noche. Uno de ellos fue desechado debido a que representaba un evento extraordinario. En la tabla 14 se muestran los resultados.

**TABLA 14 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: EJE VIAL”**

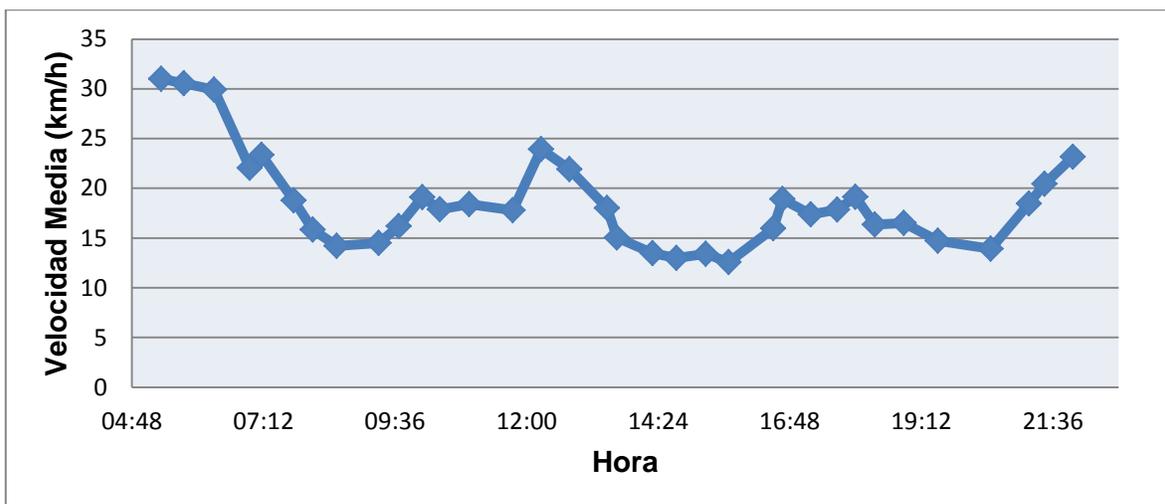
Hora	Velocidad (km/h)	Hora	Velocidad (km/h)
05:20	31.0003828	14:18	13.4830189
05:45	30.5588237	14:44	12.9995732
06:18	29.9013986	15:16	13.4021837
06:57	22.0567742	15:41	12.5722892
07:10	23.3612001	16:30	15.9820483
07:45	18.7803283	16:40	18.9234871
08:06	15.8274233	17:11	17.3682731
08:32	14.2228593	17:40	17.8473282
09:18	14.4982831	18:00	19.1440678
09:40	16.2039537	18:21	16.3459201
10:06	19.1007436	18:53	16.5088462
10:25	17.8945022	19:30	14.7346819
10:57	18.4030303	19:55	9.0028748
11:45	17.7913934	20:28	13.9347282

12:16	23.9441928
12:47	21.902384
13:28	18.0234802
13:39	15.023984

21:10	18.4528889
21:27	20.4375828
21:58	23.1765625

De la tabla se desprenden los valores de velocidad mínimo y máximo, el mínimo es de 12.5 km/h mientras que el máximo es de 31 km/h. La máxima está sombreada en color verde y se presentó alrededor de las 05:20, la mínima se encuentra sombreada en color rojo y se presentó alrededor de las 15:41. En este tramo también se presentó una velocidad fuera de lo común debido a una intensa lluvia registrada al momento de realizar el recorrido por lo que este dato no fue considerado para tener un mejor panorama del comportamiento, la gráfica se muestra en la figura 22.

**FIGURA 22 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: EJE VIAL”**



En la figura 22 se observa el comportamiento de la velocidad media a lo largo del día en un eje vial, aún considerado vialidad primaria. Como es de suponerse entre las 10 de la noche y las 5 de la mañana, no se presentan mayores problemas de circulación, mostrando velocidades que superan ligeramente los 30 km/h. También se ven reflejadas las tres horas pico identificadas con anterioridad en las otras vialidades, entre 6 y 9 de la mañana, entre 1 y 3 de la tarde y por la noche entre 6 y 9. En el caso de esta vialidad, las

horas pico no son tan marcadas debido a que la velocidad máxima alcanzada es menor que en otros tipos de vialidad por lo que la recuperación entre horas pico no se logra como en el caso de vialidades de acceso controlado o arterias principales. La mayor recuperación se presenta alrededor del mediodía.

Vialidad secundaria (varias calles)

En el tramo correspondiente a la vialidad secundaria se recorrieron varias calles con diferentes características cada una de ellas, tratando de abarcar gran variedad de ellas: un solo sentido, ambos sentidos, anchas, estrechas, con camellón, con topes, con pavimento deteriorado, etc. la longitud de esta parte del trayecto es de aproximadamente 3.5 kilómetros y no se registraron sucesos que afectaran la medición.

Tras separar los datos de los demás tramos, se obtuvieron las velocidades medias de las horas respectivas y se registraron en la tabla 15.

**TABLA 15 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: SECUNDARIA”**

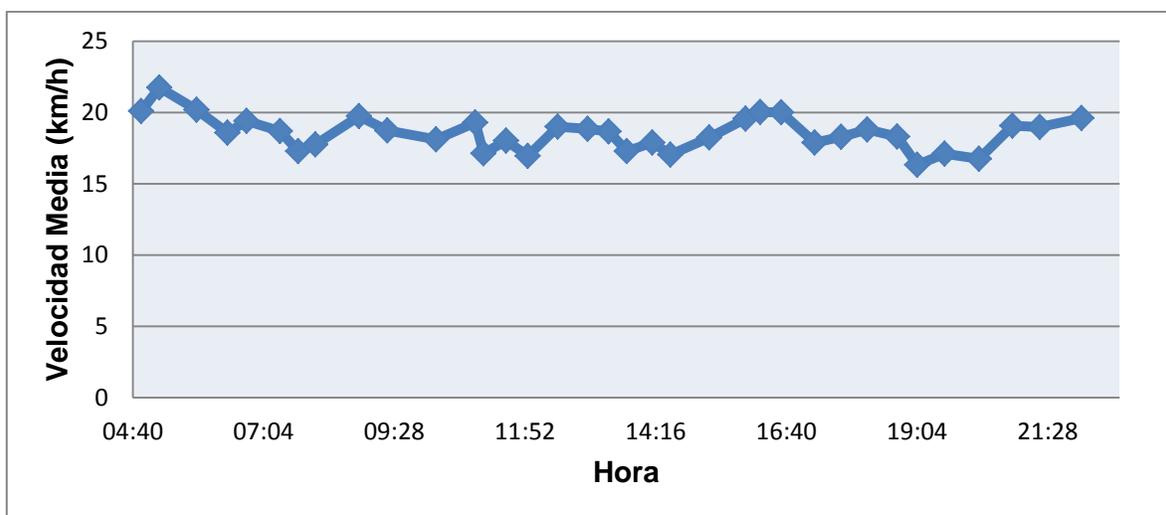
Hora	Velocidad (km/h)	Hora	Velocidad (km/h)
04:50	20.0928461	13:45	17.2702251
05:10	21.7346188	14:13	17.8790575
05:51	20.1903274	14:33	17.0330935
06:25	18.5649746	15:16	18.2303022
06:46	19.397291	15:56	19.5541237
07:23	18.6898711	16:12	20.0343522
07:43	17.2864783	16:35	19.9992853
08:02	17.7492843	17:12	17.8874659
08:50	19.7346492	17:41	18.2741529
09:21	18.734982	18:10	18.7933503
10:15	18.1093847	18:43	18.3121073
10:58	19.2793644	19:05	16.3103070
11:07	17.1264916	19:35	17.0916771

11:32	18.0198324
11:56	16.9448275
12:29	19.0003785
13:02	18.837492
13:25	18.6691032

20:13	16.7529482
20:50	19.0692375
21:20	18.9693717
22:06	19.5978723

En la tabla 15 están sombreadas dos filas, la fila en color verde representa la velocidad media máxima de 21.7 km/h a las 5:10 de la mañana, la fila color rojo representa la velocidad media más baja, registrada a las 7 de la noche. En la tabla se observa poca variabilidad en el valor de la velocidad media a lo largo del día, sin embargo, para tener un mejor panorama del comportamiento, la figura 23 muestra la gráfica de las velocidades.

**FIGURA 23 “VELOCIDADES MEDIAS, VIALIDAD: SECUNDARIA”**



La figura 23 muestra el comportamiento de la velocidad media a lo largo del día, la variabilidad no es tan grande como en otros tipos de vialidad y la mínima y la máxima son muy diferentes. En la gráfica también se aprecia que la velocidad media no sigue ningún patrón y no hay horarios en los que se reduzca drásticamente como en otros tipos de vialidad, por lo que se puede decir que la velocidad media tiene un comportamiento casi constante a lo largo del día.

## 4.2 Propuestas

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México es una de las metrópolis que más se ha visto afectada por el crecimiento poblacional, que implica un aumento desmedido en el número de automotores circulando diariamente en sus calles y que deriva en la saturación de vialidades, velocidad de tránsito baja y otras complicaciones viales. Esto no solo afecta a los habitantes, también el mundo empresarial ve repercusiones relacionadas con el ámbito de la distribución urbana de mercancías.

Al ser una ciudad tan grande se tiene un gran nivel de desconocimiento del comportamiento del tránsito vehicular, de las obras a largo plazo, de las afectaciones que producen ciertos eventos fortuitos y sobre todo de rutas alternas que reducirían el tiempo de traslado entre un punto y otro. En la presente investigación se desarrolló una forma de obtener datos precisos del comportamiento vehicular en diferentes avenidas y calles de la ZMCM, los experimentos arrojaron datos que posteriormente sirvieron para tener un panorama general de dicho comportamiento a lo largo del día.

En la ZMCM se tienen identificados 3 momentos del día en los que el tráfico se intensifica, reduciendo en gran medida la velocidad media de tránsito: el primero de ellos es por la mañana entre las 06:00 y las 09:00, el segundo por la tarde entre las 13:30 y las 16:00 y el último por la noche entre las 18:00 y las 21:00. Según la información obtenida, estos 3 horarios pico se presentan con diferente intensidad y duración pero todos están relacionados a la entrada/salida de personas a sus centros de trabajo y estudios.

En el experimento II se confirmó la relación que existe entre los días no laborales y el aumento de la velocidad media de tránsito, se estimó este aumento en un porcentaje cercano al 15%. En el experimento I se observó que si las mediciones son tomadas a la misma hora, en la misma ruta y bajo igualdad de condiciones se puede asegurar que la velocidad media es constante, sin importar el día en que se tome la medición (lunes-viernes).

Además de estas aseveraciones, con el experimento III se obtuvieron velocidades medias según el tipo de vialidad que era recorrido, vialidades primarias: de acceso controlado, principal y eje vial y vialidades secundarias. En las vialidades de acceso controlado y principal se presenta un comportamiento similar, con máximas y mínimas muy similares, además de que las velocidades a lo largo del día son parecidas, con máximas superiores

a los 40 km/h y mínimas que superan ligeramente los 12 km/h. En los ejes viales se presenta un comportamiento diferente al de las vialidades anteriores, la velocidad media mínima es similar, sin embargo, la máxima es un poco menor debido aparentemente al número de señalizaciones viales y a la capacidad de dichas avenidas. La velocidad en los ejes viales también se ve afectada en los mismos horarios, aparentemente en medida similar. Un escenario completamente diferente es el que se presenta en la vialidad secundaria, no se relaciona en lo absoluto con los diferentes tipos de vialidad primaria, su comportamiento no tiene una relación visible con el horario puesto que tiene pequeñas variaciones aparentemente causadas por razones diferentes a la hora en cuestión. La vialidad secundaria tiene velocidades medias máximas que rondan los 20 km/h y mínimas que rondan los 16 km/h.

Esta investigación propone algunas estrategias para coadyuvar el desenvolvimiento de este campo con ayuda de la tecnología y tomando como base lo desarrollado en el presente trabajo.

#### **4.2.1 Cuadrícula de tránsito de la ZMCM**

La propuesta de una cuadrícula de tránsito de la ZMCM tiene como principal objetivo la creación de una base de datos de velocidades medias para la mayor cantidad de vialidades como sea posible en diferentes horas del día.

Para llevar a cabo la cuadrícula de tránsito es necesaria la colección de una gran cantidad de datos derivada de un sinnúmero de recorridos, como esta información tendrá el fin de mejorar el área logística, en particular la logística de última milla o DUM de las empresas sería conveniente involucrar a la mayor cantidad de ellas, sin importar su giro comercial y/o tamaño, así, de este modo se generarían datos en cada ruta cubierta por las empresas, abarcando un área mayor.

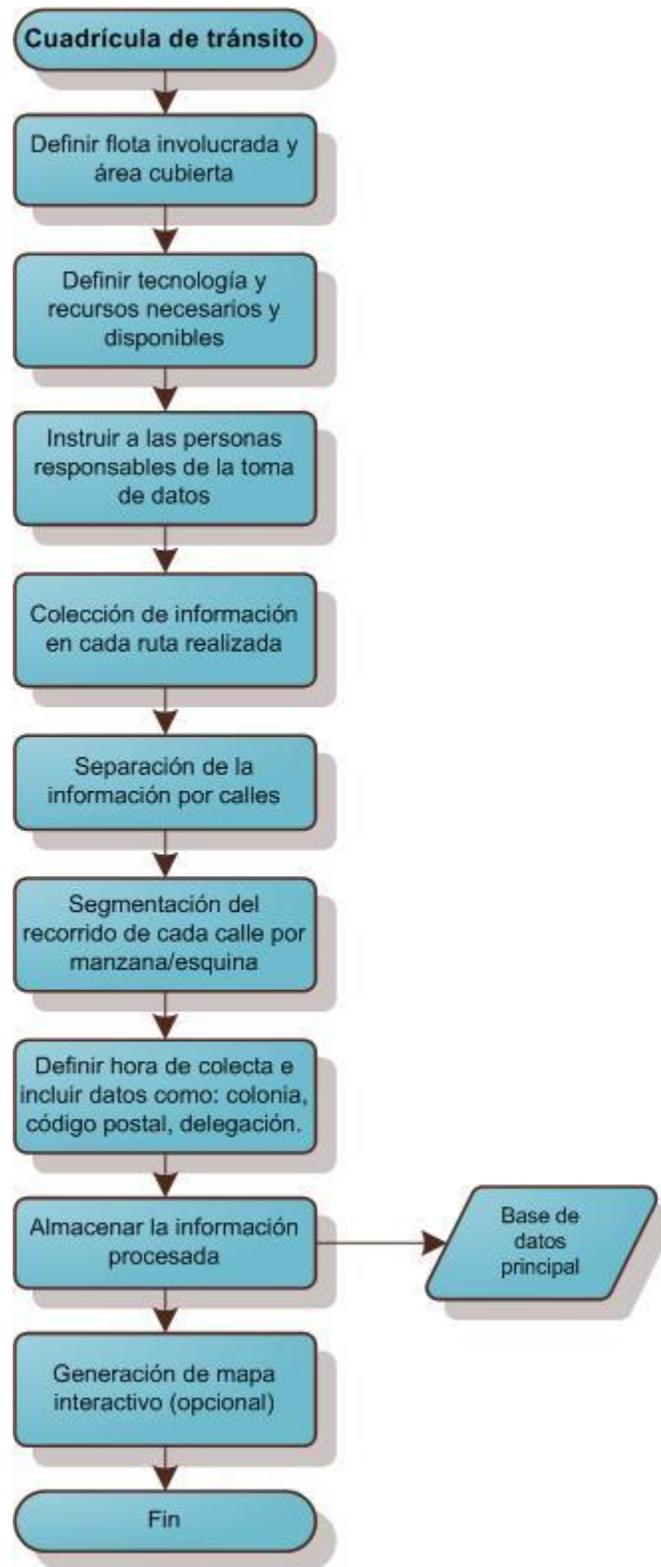
Los ciclos de manejo juegan un papel muy importante para completar la información obtenida previamente en el campo. Como es improbable cubrir la totalidad de las calles especialmente si la colaboración en la cuadrícula es baja, es posible cubrir la información faltante mediante ciclos de manejo representativos de cada tipo de vialidad. En ocasiones el comportamiento del tránsito entre vialidades del mismo tipo podría ser diferente, es por

ello que para cubrir información faltante sería recomendable utilizar un ciclo de manejo cuyas características se acerquen más a la vialidad en cuestión.

Los recursos tecnológicos también juegan un papel muy importante en la colección de datos. En la actualidad muchas empresas invierten un fuerte capital en el monitoreo de sus unidades, dicho monitoreo se ofrece para conocer la ubicación geográfica en cualquier momento, así como para conocer el consumo de combustible, el estado de la unidad en general y de la carga. Esta podría ser una gran oportunidad para la adquisición de datos en campo, al incorporar una etapa de almacenamiento para su posterior procesamiento.

En la figura 24 se muestra el macroproceso de generación de una cuadrícula de tránsito, claramente dependerá del enfoque y los recursos de la empresa que quiera desarrollar esta útil herramienta. En la tercer y cuarta etapa, dependerá de la tecnología involucrada, debido a que esto se puede automatizar de tal forma que no se involucraría a los operadores del transporte, se puede adquirir, junto con los aditamentos tecnológicos a utilizar, una aplicación encargada de realizar la toma de datos de manera automática. En la quinta y sexta etapa se incluye una clasificación de la información por calles y posteriormente por manzanas o esquinas, esto con el único fin de hacerla más accesible en un futuro, lo que realmente se haría con estas dos etapas es dividirla en su mínima unidad, una cuadra de una calle, cabe destacar que no solo se guardaría la velocidad media, se guardaría el perfil de velocidades a lo largo de esa unidad mínima. Así cuando se requiera estimar el tiempo de traslado entre un punto y otro, solo se tendría que recurrir a la suma de unidades mínimas. La hora es fundamental para la cuadrícula de tránsito, pues será la principal variable de agrupación, sin embargo, sería recomendable adicionar otras posibles fuentes de filtrado de información, como pueden ser colonia, código postal, tipo de vialidad, etc.

FIGURA 24 “PROCESO DE GENERACIÓN DE UNA CUADRÍCULA DE TRÁNSITO”



La última etapa indica la generación de un mapa interactivo, esta etapa podría representar un sinnúmero de posibilidades de desarrollo. Para su desenvolvimiento sería necesario trabajar con coordenadas GPS debido a que todo el software especializado utiliza dichas coordenadas para su funcionamiento, además de que se obtiene una mayor precisión.

#### **4.2.2 Diseño de rutas incorporando el criterio de velocidad de tránsito**

En el capítulo dos se abordaron métodos que sirven para el diseño y optimización de rutas. Ellos están basados principalmente en la distancia, los puntos de entrega y los volúmenes de carga, sin embargo, no incluyen factores de gran relevancia como puede ser la velocidad de tránsito en las vialidades a ser transitadas, la cual varía respecto a la hora del día como quedó establecido anteriormente. Es por ello que se considera una gran oportunidad de mejora la inclusión de este aspecto en el proceso de diseño de rutas. La figura 25 muestra el proceso de diseño de rutas de una empresa de distribución de bebidas.

El objetivo de incorporar el criterio de velocidad de tránsito en el proceso de diseño de rutas se resume en contribuir en la optimización para lograr un mayor ahorro de recursos y una mejora en el nivel del servicio al cliente.

Mucho se ha mencionado de las herramientas actuales, sin duda alguna, los métodos para optimización de rutas representan grandes ahorros y el software para optimización de rutas con base en puntos de entrega y en distancias trabaja perfectamente, sin embargo, la consideración de la velocidad media de tránsito dentro de la etapa de validación de rutas es necesaria porque es una variable que influye bastante en la circulación diaria. Siendo considerada esta variable se conseguiría un mayor ahorro de recursos y mejorar el nivel de servicio al cliente. Incluso cuando no se cuenta con el software de optimización de rutas (pequeñas empresas), representaría ahorros al tomar como segundo parámetro más importante la velocidad media de tránsito solo después de la distancia en el diseño de rutas.

**FIGURA 25 “PROCESO DE DISEÑO DE RUTAS INCLUYENDO LA VELOCIDAD MEDIA COMO FACTOR DE DECISIÓN”**



En el macroproceso presentado en la figura 25 no se describen a detalle las actividades involucradas, sin embargo, da una clara idea de las actividades realizadas en el verdadero proceso de ruteo para una empresa de bebidas de gran tamaño. Aquí fácilmente se podría añadir otra actividad relacionada con la velocidad media de tránsito, paralela a la etapa de verificación, en esta etapa se realizaría un análisis de las vialidades por las cuales transitaría el vehículo y de sus respectivas velocidades, proponiendo mejores alternativas en caso de que la ruta prevista entre un punto y otro involucre una vialidad con velocidad muy baja. Incluso, en caso de detectarse una velocidad extremadamente baja para llegar de un punto a otro, se podría trazar nuevamente la ruta con ciertas restricciones.

En caso de que el servicio al cliente sea de suma importancia se podría estimar con gran precisión la hora de entrega con ayuda de la cuadrícula de tránsito y en caso de ser necesario se tomarían las medidas necesarias para llegar en tiempo y forma. Esto aplica principalmente cuando existe una diferenciación de clientes y se necesita un trato especial con los más importantes o porque simplemente se es requerida la entrega a cierta hora por el mismo. Además al saber con gran precisión la velocidad de tránsito y por tanto

estimar el tiempo de traslado entre un punto y otro, se podrá tener un gran control sobre el vehículo en cuestión pues deberá coincidir la ubicación del monitoreo en tiempo real con la estimada basada en velocidades de la cuadrícula de tránsito.

La incorporación de la velocidad media no solo sería útil para el trazado de rutas o para el mejoramiento del nivel del servicio al cliente, también existen algunas actividades en las que se podría tomar en cuenta para su mejoramiento, incluso algunas empresas ya realizan alguna de las acciones.

La primera acción involucra la salida anticipada o retrasada de rutas para evitar tránsito excesivo en el trayecto. Existen empresas que cuentan con un centro de distribución para toda la ZMCM y no tienen pequeños centros de carga para ayudarse en la distribución por lo que deben atravesar zonas de tránsito intenso para llegar a su zona de distribución por lo que convendría anticipar o retrasar la ruta.

La segunda acción algunas empresas ya la realizan debido al tránsito excesivo al que se enfrentaban o a la hora tan temprana que tienen que iniciar las entregas. Ella consiste en el envío del vehículo cargado con mercancía a un sitio estratégico en la noche donde permanecerá unas horas y posteriormente comenzará la entrega de mercancía en la ruta que tenga marcada.

#### **4.2.3 Localización de centros de carga de pedidos con base en la cuadrícula de tránsito**

En la ZMCM existen variaciones horarias de la intensidad del tráfico, por lo general, estas condiciones se cumplen, sin embargo existen zonas especialmente problemáticas en cuanto a conflictos viales se refiere. En estas zonas existe una concentración de tráfico, por tanto, la velocidad media no presenta una variación que dependa de la hora del día, el tráfico siempre tiene una mala condición y la velocidad media tiene valores muy bajos a lo largo de todo el día.

Al existir en estas zonas un desplazamiento muy lento entre puntos de entrega, el número de repartos se ve mermado, esto quiere decir que la productividad es baja. Además se ve reflejado en los costos de la compañía debido a que el transporte en estas zonas sobrepasa el promedio de gastos previstos. Un vehículo dedicado a la DUM es un costo

muy alto si la mayor parte del tiempo se encuentra enfrascado en conflictos viales, en especial si entre los productos que distribuye se encuentra uno o varios de alta rotación.

Con ayuda de la cuadrícula de tránsito se podrían identificar claramente aquellas zonas que representan “obstáculos” en la ruta y así identificar la mejor opción para la colocación de un centro de carga de pedidos.

La ubicación de un centro de carga de pedidos o, como también es llamado, una microplataforma logística urbana implica grandes ventajas para las empresas que tienen productos de alta rotación, debido a que se encuentran muy cerca del mercado y se pueden realizar varios resurtidos al día. Además, al ser zonas de tamaño reducido se puede implementar un medio de distribución alternativo que podría ser sustentable. El ahorro en transporte y demás implicaciones sería considerable, aparte, el nivel de servicio al cliente se vería incrementado considerablemente al poder cumplir en tiempo y forma con los pedidos siempre.

No solo para grandes empresas con productos de alta rotación es importante el establecimiento de una microplataforma logística urbana, cuya ubicación sea determinada gracias a la cuadrícula de tránsito. También lo es para aquellas empresas que solo cuentan con un centro de distribución y que para realizar la distribución en ciertas zonas deben realizar viajes de gran distancia y con larga duración debido al tráfico particular de la ZMCM.

El diagrama mostrado en la figura 26 ilustra el proceso de localización de un centro de carga de pedidos o mPLU. Dicho proceso se basa en un análisis que debe ser realizado a la cuadrícula de tránsito, en el, se deben observar posibles zonas conflictivas donde la velocidad media sea muy baja en varias vialidades contiguas. Después de identificar las zonas se debe determinar la demanda de dichas zonas para asegurar que sea alta y así garantizar el beneficio de la mPLU y el ahorro derivado de su implementación. Para el análisis de viabilidad existen diversos factores que se pudieren tomar en cuenta, entre ellos podría ser la facilidad de adopción de un sistema de transporte alternativo para el reparto en la zona, el número de clientes en la zona o un costo estimado de la inversión.

**FIGURA 26 “PROCESO DE LOCALIZACIÓN DE UNA MPLU CON BASE EN LA CUADRÍCULA DE TRÁNSITO”**



El proceso de la figura 26 aplica para empresas con productos de alta rotación en las zonas conflictivas, sin embargo, como se mencionó anteriormente también puede ser de utilidad para aquellas que tienen demanda en zonas de difícil acceso y solo un centro de distribución alejado. A diferencia del proceso de la figura, donde después de encontrar las zonas conflictivas se realiza una determinación de la demanda en esas mismas zonas, para el caso de las empresas que se encuentran en esta nueva situación, ahora, tras encontrar las zonas, la determinación de la demanda se realizaría en zonas contrarias y

alejadas del centro de distribución, esto con el fin de determinar la conveniencia de instalar una mPLU para así evitar incurrir en los gastos derivados de que las rutas enfrenten el tránsito de las zonas conflictivas.

## CAPÍTULO 5 “CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO”

### 5.1 Conclusiones

A lo largo de la realización de este trabajo de investigación se fueron alcanzando los objetivos plasmados al comienzo a través del desarrollo de los experimentos.

Primeramente se identificaron los horarios más problemáticos para el tránsito en la ZMCM. Son tres los lapsos en los que la velocidad media se ve seriamente afectada, el primero de ellos es por la mañana de 6-9 am, el segundo por la tarde de 1-3 pm y el tercero por la noche de 6-9 pm. Dichos horarios se han ido extendiendo y se espera continúe la tendencia al pasar de los años.

Posteriormente se consiguió dar un panorama general del comportamiento del tránsito vehicular en la ZMCM. Se utilizó la agrupación de vialidades provista por el GDF para realizar muestreo de la velocidad media por tipo de vialidad. Todos los tipos tienen un comportamiento diferente a lo largo del día:

- Las vialidades primarias principales y de acceso controlado tienen un comportamiento de velocidades medias similar, la máxima ronda los 50 km/h y la mínima los 12 km/h, varía dependiendo la hora del día.
- Las vialidades primarias del tipo eje vial tienen velocidad media de tránsito mínima de alrededor de 12 km/h y máxima de alrededor de 32 km/h, varía dependiendo la hora del día.
- Las vialidades secundarias tienen un comportamiento muy distinto a las anteriores, la variación que presenta la velocidad media oscila entre los 16 km/h (mínima) y los 22 (km/h) máxima y no depende de la hora del día.

Asimismo, se identificaron posibles áreas donde la integración de nuevas estrategias podría representar una mejora en la DUM, entre ellas destacan el proceso de ruteo y la localización de nuevas instalaciones relacionadas con el almacenamiento (centros de carga de pedidos).

De la investigación realizada se puede concluir que la velocidad media de tránsito tiene un comportamiento que varía con respecto de la hora del día y que este comportamiento se puede considerar constante con respecto de otros días, es decir, el tránsito de un día

hábil será similar al tránsito de cualquier otro día hábil. Sin embargo, existen eventos fortuitos que podrían influir en la reducción de la velocidad media como la lluvia, los accidentes de tránsito, marchas y plantones, entre otros.

El desarrollo de una cuadrícula de tránsito de la ZMCM que muestre las velocidades medias que existen en ciertas horas del día generaría basto conocimiento del tráfico vehicular y de sus particularidades, derivando en grandes ahorros en el área logística de las empresas al poder optimizar rutas de una mejor manera, identificar zonas conflictivas o incluso diseñar e implementar nuevas estrategias.

Las modificaciones que se realizaron a los procesos de diseño de rutas y de ubicación de instalaciones elevarán la productividad en reparto de mercancías y el nivel de servicio al cliente, además de que contribuirán en la disminución de costos de transporte y almacenamiento.

Cabe destacar que, si bien los resultados relacionados con la velocidad media de tránsito son particulares de la ZMCM, las propuestas son aplicables para cualquier ciudad que presenta problemas de circulación vehicular.

## **5.2 Trabajo futuro**

La presente investigación abre camino a su continuación o la propuesta de nuevas pesquisas, es un tema amplio con mucho futuro, principalmente en combinación con los avances tecnológicos de hoy en día. A continuación se describen algunas líneas para continuar con el tema de investigación:

- Continuar con los estudios de la influencia que diversos factores como la lluvia, el transporte público, el estado de las vialidades, el ambulante, etc. ejercen sobre la velocidad media de tránsito en la ZMCM.
- Continuar con el estudio de las características y particularidades del tránsito vehicular en la ZMCM, mediante el análisis estadístico de información generados y/o recuperados para la formación de la cuadrícula de tránsito.

- Desarrollar la cuadrícula de tránsito recabando y analizando mayor cantidad de rutas, trayectos y horarios mediante la integración de un equipo formado por empresas interesadas.
- Desarrollo de una aplicación para teléfonos móviles inteligentes que se encargue de guardar el perfil de velocidad en los viajes realizados, además de diseñar un software para realizar el procesamiento de la información colectada de manera más eficaz. De esta forma la creación de la cuadrícula de tránsito se realizaría de manera más sencilla.

## REFERENCIAS

- AGUILAR, Adrián G. *Procesos metropolitanos y grandes ciudades: dinámicas recientes en México y otros países*. Miguel Ángel Porrúa. México. 2004. 530 páginas.
- ANDRÉ, Michel. *Real world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: the ARTEMIS European driving cycles*. Report INRETS-LTE 0411. Junio, 2004.
- ANDRÉ, Michel. *Real world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part B: driving cycles according to vehicle power*. Report INRETS-LTE 0412. Junio, 2006.
- ANTÚN, Juan P. *Distribución urbana de mercancías: estrategias con centros logísticos*. IDB Technical note; 167. Febrero, 2013.
- ARANGO, Martín D., GIL, Hermenegildo y ZAPATA, Julián A. *Logística esbelta aplicada al transporte en el sector minero*. Boletín de ciencias de la tierra. (25):121-126. Diciembre-Junio (2008-2009).
- BALLOU, Ronald H. *Logística: administración de la cadena de suministro*. 5ª edición. Pearson Prentice Hall: México. 2005. 816 páginas.
- CHÁVEZ, Jorge H. y TORRES-RABELLO, Rodolfo. *Supply Chain Management*. 2ª edición. Santiago, Chile. Ril editores. 2012. 360 páginas.
- COMISIÓN AMBIENTAL METROPOLITANA. *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*. 3ª edición. México. 2003. 386 páginas.
- CRUZ, María Soledad. *Crecimiento Urbano y poblamiento en la ZMCM. El perfil del nuevo milenio*. El Cotidiano. 17(103): 43-53. Septiembre-Octubre, 2000.
- DELGADO-NEIRA, Oscar F. *Driving cycles properties and their influence on fuel consumption and emissions*. Tesis (Doctor of Philosophy). West Virginia, USA. West Virginia University. 2012. 176 páginas.
- DEMIRBAS, Ayhan. *Biodiesel, a realistic fuel alternative for diesel engines*. London, UK. Ed. Springer. 2008.
- ENGUNTZA, Guadalupe. *Diagnóstico de la movilidad de los habitantes de la ZMCM vinculado al crecimiento de la vivienda metropolitana*. Tesis (licenciada en Urbanismo). México. Universidad Nacional Autónoma de México. 2011. 98 páginas.
- FÄRNLUND, Jonny y ENGSTRÖM, Christian. *The representativeness of driving cycles in real world traffic*. Rototest AB. 2001. 74 páginas.
- FERNÁNDEZ, Iván. *Modelización de la distribución urbana de mercancías*. Tesis (minor thesis). Univesitat Politècnica de Catalunya. Abril, 2008. 117 páginas.

GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. *Gaceta oficial del Distrito Federal*. Décima séptima época, número 366. México. 30 de junio de 2008.

GONZÁLEZ, Miguel. *Propuesta de conversión de un vehículo eléctrico de pasajeros a vehículo híbrido*. Tesis (ingeniero mecánico). México. Universidad Nacional Autónoma de México. Junio, 2005. 85 páginas.

GONZÁLEZ, Raquel y ROBUSTÉ, Francesc. *Un nuevo concepto de plataforma logística urbana*. En: Congreso de Ingeniería del Transporte (5°, 2002, Santander). pp. 643-650.

GONZÁLEZ, R. y GALVÁN, A. *Desarrollo de ciclos de manejo característicos de la ciudad de México*. En: Congreso Anual de la SOMIM (9°, 2003, Veracruz, México). 2003. pp. 535-544.

GUTIÉRREZ, Humberto y DE LA VARA, Román. *Análisis y diseño de experimentos*. 3ª edición. México. Mc Graw Hill. 2012. 489 páginas.

HERNÁNDEZ, Juan M. y VEGA, Amado M. *Desarrollo e implantación de un software ERP (Enterprise Resource Planning) para la empresa Remaches Reynoso S.A. de C.V.* Tesis (Ingeniero industrial). México. Universidad Nacional Autónoma de México. 2009. 57 páginas.

HERNÁNDEZ, Rodolfo. *Desafíos y estrategias logísticas en la distribución física de mercancías en el centro histórico de la ciudad de México*. Tesis (maestro en ingeniería). México. Universidad Nacional Autónoma de México. Enero, 2002. 234 páginas.

HICKS, Charles R. y TURNER, Kenneth V. *Fundamental concepts in the design of experiments*. 5ª edición. USA. Oxford University Press. 1999. 565 páginas.

INSTITUTO DE INFORMACIÓN TERRITORIAL, GOBIERNO DEL ESTADO DE JALISCO. *El Ruido del Transporte Público en el área metropolitana de Guadalajara*. Nota técnica: 017/2013. Jalisco, México. 2013.

INSTITUTO MEXICANO PARA LA COMPETITIVIDAD. *Movilidad competitiva en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: diagnóstico y soluciones factibles*. Resumen ejecutivo. México. Enero, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA. *XII Censo general de población y vivienda, 2000: perfil sociodemográfico del área metropolitana de la ciudad de México*. México. 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA. *Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002*. México. 2005. 452 páginas.

INSTITUTO NACIONAL DE GEOGRAFÍA Y ESTADÍSTICA. *Anuario de estadísticas por entidad federativa 2010*. México. 2010. 594 páginas.

- LARRODÉ, Emilio. *Automóviles eléctricos*. Zaragoza, España. 1997. 475 páginas.
- LIN, Jie y NIEMEIER, D. A. *Regional driving characteristics, regional driving cycles*. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 8(5):361-381. Septiembre, 2003.
- MONTGOMERY, Douglas C. *Diseño y análisis de experimentos*. 2ª edición. Limusa Wiley. 2013. 700 páginas.
- MONTOYA, Guisselle. *Apuntes de ingeniería de tránsito*. Perú. Universidad Nacional de ingeniería. Noviembre, 2005.
- PAU I COS, Jordi y DE NAVASCUÉS Y GASCA, Ricardo. *Manual de logística integral*. Madrid, España. Ediciones Díaz de Santos. 1998. 846 páginas.
- PÉREZ, Javier. *Ciudad Neza*. National Geographic. 29(3): 56-75. Septiembre, 2011.
- RAMÍREZ, José L. *Propuesta de un ciclo de manejo representativo de la ZMCM, para homologar vehículos ligeros*. Tesis (maestro en ingeniería). México. Universidad Nacional Autónoma de México. 1997. 157 páginas.
- RAMÍREZ, Roberto. *La dispersión económica de la zona central de la Ciudad de México a su área metropolitana y sus efectos en la estructura económica del suelo urbano de la ZMCM: aplicación de un modelo matemático para el periodo de 1994 a 2004*. Tesis (maestro en economía). México. Universidad Nacional Autónoma de México. 2008. 146 páginas.
- RINCÓN, Rodrigo A. *Modelado de tráfico urbano con diferentes densidades de flujo*. Tesis (doctor en ingeniería). México. Universidad Nacional Autónoma de México. Noviembre, 2001.
- RIOJAS, Alicia C. *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas*. Monografía (licenciada de investigación operativa). Lima, Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2005.
- ROBUSTÉ, Francesc y GALVÁN, Dante. *e-Logistics*. Barcelona, Univesitat Politècnica de Catalunya. Edicions UPC. 2005. 214 páginas.
- SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. *Informe climatológico ambiental del valle de México 2005*. México. 2005.
- SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010*. México. 2012.
- SIGUA, Ricardo G. *Development of driving cycle for Metro Manila*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2(6):1995-2002. Otoño, 1997.
- TAMSANYA, Nutramon, CHUNGAIBULPATANA, Supachart y LIMMEECHOKCHAI, S. *Development of a driving cycle for the measurement of fuel consumption and exhaust*

*emissions of automobiles in Bangkok during peak periods*. International Journey of Automotive Technology. 10(2):251-264. Marzo, 2009.

TAMSANYA, Nutramon y CHUNGPAIBULPATANA, Supachart. *Influence of driving cycles on exhaust emissions and fuel consumption of gasoline passenger car in Bangkok*. Journal of Environmental Sciences. 21(2009):604–611.

XU, Guochang. *GPS: Theory, algorithms and applications*. 2ª edición. Springer. 2007. 340 páginas.

### **Referencias electrónicas**

*Metrobús, fichas técnicas*. (s.f.). Recuperado el 26 de septiembre de 2013 de <http://www.metrobus.df.gob.mx/fichas.html>.

## ANEXO A “TABLAS PARA LA REALIZACIÓN DE RECORRIDOS”

### Calendario de recorridos

Recorrido	SEMANA 1					SEMANA 2					SEMANA 3				
	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi
1			X												
2												X			
3							X								
4			X												
5		X													
6										X					
7															X
8											X				
9								X							
10	X														
11						X									
12												X			
13				X											
14					X										
15											X				
16						X									
17		X													
18														X	
19									X						
20	X														
21													X		
22										X					
23								X							
24			X												
25									X						
26						X									
27					X										
28										X					
29							X								
30				X											
31														X	
32							X								
33															X
34												X			
35								X							

### Formato de toma de datos

FORMATO DE RECORRIDO					
#R		FR		HIR	
Tr		HITr		TITrA	
CC		HTTr		TTTrA	
Tr		HITr		TITrA	
CC		HTTr		TTTrA	
Tr		HITr		TITrA	
CC		HTTr		TTTrA	
Tr		HITr		TITrA	
CC		HTTr		TTTrA	
Tr		HITr		TITrA	
CC		HTTr		TTTrA	
HT		TT			

#R	Número de recorrido
FR	Fecha de recorrido
HIR	Hora de inicio del recorrido
Tr	Tramo recorrido
HITr	Hora de inicio del tramo
TITrA	Tiempo de inicio del tramo en aplicación
CC	Clima y observaciones
HTTr	Hora de término del tramo
TTTrA	Tiempo de término del tramo en aplicación
HT	Hora término del recorrido
TT	Tiempo total de recorrido en aplicación

## ANEXO B “VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS, EXPERIMENTO I”

### Supuesto de normalidad

El supuesto de normalidad se puede verificar con la prueba Kolmogorov-Smirnov o con la prueba Shapiro-Wilk, las dos se encuentran disponibles en el software SPSS, sin embargo, debido a que el número de muestras es menor a 30, se recomienda utilizar Shapiro-Wilk. En ambas pruebas la hipótesis nula es que los datos se distribuyen de manera normal mientras que la hipótesis alternativa es que los datos no siguen una distribución normal. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos mediante el software.

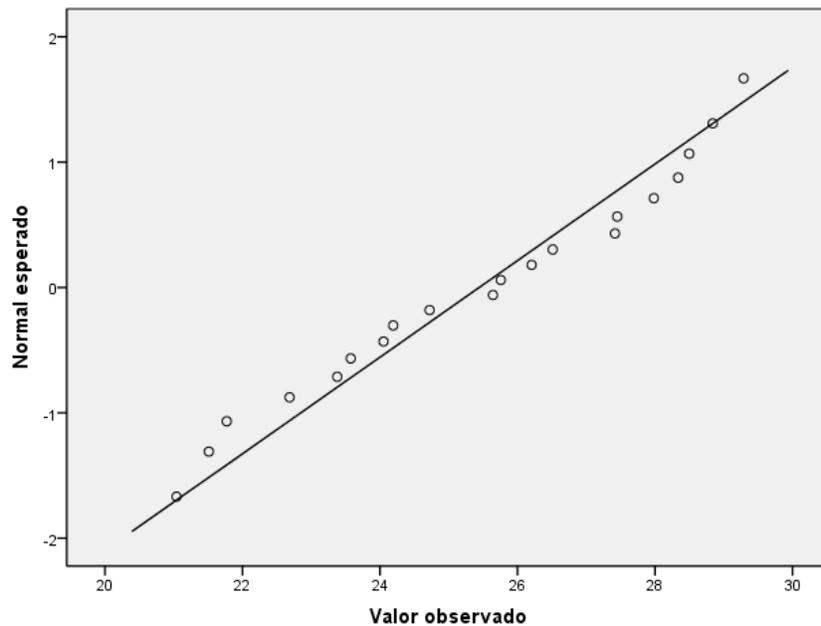
### “Prueba de normalidad, experimento I”

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Significancia	Estadístico	gl	Significancia
Velocidad Media	0.127	20	0.200*	<b>0.950</b>	<b>20</b>	<b>0.363</b>

En la tabla anterior se muestran los resultados después de aplicar las pruebas de normalidad de Kolmogorov y de Shapiro, como se mencionó antes, debido a que  $n < 30$  se toman en cuenta los resultados de Shapiro. Esta prueba es fácil de interpretar porque en el software no se necesita investigar los valores de contraste de la tabla de Shapiro-Wilk, es suficiente con contrastar el valor de la última columna (Significancia) con el p-value que en este caso es de 0.05. Si el p-value es mayor que el valor de la última columna se aceptará la hipótesis nula, en caso de que el p-value sea menor que el valor significancia se rechazará la hipótesis nula.

Además de estas dos últimas pruebas, existen pruebas gráficas como la gráfica de normalidad que también se puede realizar en el software. La siguiente figura muestra el gráfico de normalidad para los datos de este experimento.

### “Gráfico normal de Velocidad Media, experimento I”



En la figura anterior se puede apreciar que los datos se distribuyen de forma constante a lo largo de la gráfica y también se observa que no presenta grandes separaciones de los puntos a la línea.

#### Supuesto de homocedasticidad

El siguiente supuesto, homocedasticidad o de igualdad de varianzas se puede verificar por medio del software utilizado, se encuentra disponible la prueba de Levene, que tiene el propósito de verificar si las varianzas pueden ser consideradas iguales. La prueba de Levene maneja la hipótesis nula de que las varianzas de los grupos son iguales mientras que la hipótesis alternativa dice que al menos una presenta diferencia de las demás. En la siguiente tabla se muestran los resultados del test de Levene aplicado a la información del experimento I.

### “Prueba de homocedasticidad, experimento I”

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Significancia
Basándose en la media	0.726	4	15	0.588
Basándose en la mediana.	0.627	4	15	0.651
Velocidad Basándose en la mediana y con gl corregido	0.627	4	12.475	0.652
Media Basándose en la media recortada	0.724	4	15	0.589

En la tabla anterior se muestran los resultados de la aplicación de la prueba de Levene a la información del experimento I agrupada por días. El test de Levene se basa en las desviaciones respecto a un estadístico de centralidad (media, mediana, etc). Debido a esto, el software no solo realiza el test usando la media como base, sino también otros como se puede apreciar en la figura.

La forma de interpretar estos resultados es igual que en la prueba de normalidad, se toma el valor “significancia” de la última columna (en este caso el valor obtenido basado en la media) y se compara con el p-value que es de 0.05. En caso de que el valor “significancia” sea mayor que el p-value se aceptará la hipótesis nula y se podrá decir que las varianzas son iguales, en caso contrario, se rechazará la hipótesis nula y será aceptada la hipótesis alternativa en la que las varianzas de los grupos tienen valores diferentes. Con la información de la tabla, se acepta la hipótesis nula, las varianzas de los grupos son iguales.

#### Supuesto de independencia

El tercer supuesto, el de independencia, es quizá el más importante porque si no se cumpliera, reflejaría una mala colección de los datos del experimento o un error en la aleatorización. Existen algunos métodos para la comprobación de este supuesto, entre ellos destaca la gráfica de los residuos la cual se debe observar con atención para detectar posibles patrones y la prueba analítica de Durbin-Watson.

Para probar el tercer supuesto en el experimento, se utilizó el método Durbin- Watson disponible también en el software utilizado. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos tras la aplicación de la prueba.

**“Prueba de independencia, experimento I”**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación	Durbin-Watson
1	0.344	0.118	0.069	2.50412381	1.971

La tabla anterior muestra los resultados obtenidos después de la aplicación de la prueba de independencia. Los resultados se interpretan de forma diferente a los de las pruebas realizadas anteriormente para la comprobación de los otros supuestos. En este caso, no existe un p-value de comparación, se deja a criterio del experimentador, sin embargo, existen valores de referencia. Se dice que datos completamente independientes arrojarán un valor de 2, datos que presentan una autocorrelación positiva arrojaran valores mayores a 2 y datos que presentan una autocorrelación negativa arrojaran valores menores a 2.

Tras la aplicación de la prueba a los datos del experimento I, se obtuvo un valor de 1.971 el cual es muy cercano a 2, lo que indica que los datos son independientes. Es muy común que para valores entre 1.5 y 2.5 se diga que los datos son independientes, porque se encuentran en un rango aceptable.

## ANEXO C “VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS, EXPERIMENTO II”

### Supuesto de normalidad

Para verificar que los datos se distribuyen de forma normal se utilizarán las pruebas disponibles en el software SPSS: Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos tras la aplicación de estas pruebas de normalidad.

“Prueba de normalidad, experimento II”

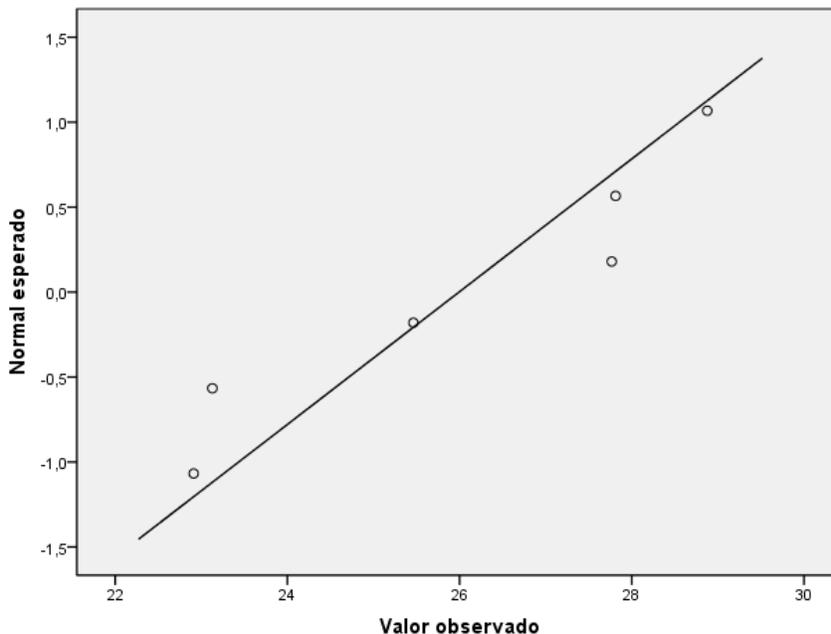
	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Significancia	Estadístico	gl	Significancia
Velocidad Media	0.256	6	0.200	0.875	6	0.247

En la tabla anterior se puede observar que a los 6 datos se les fueron aplicadas las dos pruebas, sin embargo, como se tiene que  $n < 30$  se tomarán en cuenta los resultados de Shapiro-Wilk, que está diseñada para valores de  $n$  menores a 30 (en algunos casos, se toma  $n < 50$ ).

En la prueba de Shapiro-Wilk se obtuvo un valor significancia de 0.247 que al ser comparado con el p-value resulta ser mayor, por lo que, siguiendo con lo establecido anteriormente se puede aceptar la hipótesis nula y se dice que los datos siguen una distribución normal.

Para corroborar y tener una idea visual de la distribución que siguen los datos es recomendable realizar una prueba gráfica, en la siguiente figura se muestra la gráfica de probabilidad para los datos del experimento II.

### “Gráfico normal de Velocidad Media, experimento II”



#### Supuesto de homocedasticidad

El supuesto de igualdad de varianzas se verificará por medio de la prueba de Levene. La hipótesis nula de esta prueba es que las varianzas de los grupos son iguales contra una hipótesis alternativa que maneja que al menos una es diferente. En este caso, como solo se tienen dos grupos las hipótesis quedarían de la siguiente forma:

$$H_0 : \sigma_N = \sigma_A$$

$$H_A : \sigma_N \neq \sigma_A$$

#### “Prueba de homocedasticidad, experimento II”

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Significancia
Velocidad Media	Basándose en la media	3.928	1	4	0.119

En la tabla anterior se muestran los resultados obtenidos después de la aplicación de la prueba de homogeneidad de varianzas. Se obtuvo un valor significancia de 0.119 que resulta ser mayor al p-value de 0.05 por lo que la hipótesis nula que indica que las varianzas son iguales se acepta.

Supuesto de independencia

Para verificar que los datos del experimento II son independientes se realizó la prueba Durbin-Watson en el software SPSS. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos.

**“Prueba de independencia, experimento II”**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación	Durbin-Watson
1	0.478	0.228	0.035	2.51397842	1.916

En la tabla se observa un valor de 1.916 el cual es muy cercano a 2, por lo que se concluye que los datos son independientes.

## ANEXO D “LA ZMCM Y LA ZMVM”

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) está conformada por 57 municipios: 16 delegaciones del Distrito Federal, 41 municipios del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo. En la siguiente tabla se muestran los municipios pertenecientes a la ZMCM.

### “Delegaciones y municipios de la ZMCM”

Distrito Federal	
<i>Delegación</i>	<i>Delegación</i>
Álvaro Obregón	Iztapalapa
Azcapotzalco	La Magdalena Contreras
Benito Juárez	Miguel Hidalgo
Coyoacán	Milpa Alta
Cuajimalpa de Morelos	Tláhuac
Cuauhtémoc	Tlalpan
Gustavo A. Madero	Venustiano Carranza
Iztacalco	Xochimilco

Estado de México	
<i>Municipio</i>	<i>Municipio</i>
Acolman	Nextlalpan
Atenco	Nezahualcóyotl
Atizapán de Zaragoza	Nicolás Romero
Chalco	Papalotla
Chiautla	San Martín de las Pirámides
Chicoloapan	Tecámac
Chiconcuac	Temamatla
Chimalhuacán	Teoloyucan
Coacalco de Berriozábal	Teotihuacán
Cocotitlán	Tepetlaoxtoc
Coyotepec	Tepotzotlán
Cuautitlán	Texcoco
Cuautitlán Izcalli	Tezoyuca
Ecatepec de Morelos	Tlalmanalco
Huehuetoca	Tlalnepantla de Baz
Huixquilucan	Tonanitla
Ixtapaluca	Tultepec

Jaltenco	Tultitlán
La Paz	Valle de Chalco Solidaridad
Melchor Ocampo	Zumpango
Naucalpan de Juárez	

<b>Hidalgo</b>
<i>Municipio</i>
Tizayuca

El crecimiento poblacional en la ZMCM ha sido muy grande en las últimas décadas, hoy en día esa tendencia continúa, la expansión se sigue presentando en municipios aledaños. Es por ello que (Aguilar, 2004) maneja el concepto de Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), una zona que incluye 18 municipios más del Estado de México que la ZMCM. El concepto de la ZMVM se utiliza principalmente para planeación y prospecciones futuras para anticipar una mejor gobernabilidad. En la siguiente tabla se muestran los 18 municipios que se añaden a la lista.

<b>Estado de México</b>	
<i>Municipio</i>	<i>Municipio</i>
Amecameca	Juchitepec
Apaxco	Nopaltepec
Atlautla	Otumba
Axapusco	Ozumba
Ayapango	Temascalapa
Ecatzingo	Tenango del Aire
Hueypoxtla	Tepetlixpa
Isidro Fabela	Tequixquiac
Jilotzingo	Villa del Carbón

Finalmente, la ZMVM se conforma por las 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios del Estado de México y 1 un municipio del estado de Hidalgo. La siguiente figura muestra el mapa de las delegaciones y municipios de las 3 entidades federativas que conforman la ZMVM.

“ZMVM”



## ANEXO E “ANOVA Y PRUEBAS PARA LA VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS”

### Supuesto de normalidad

Una prueba analítica es la prueba Shapiro-Wilk, se utiliza para muestras menores de 50 datos. La hipótesis nula dice que los datos se distribuyen de manera normal. Funciona con un estadístico de prueba el cual posteriormente se compara en una tabla dada por los autores de la prueba, si el estadístico de prueba es mayor que el valor proporcionado en tablas se rechazará la hipótesis nula de normalidad. La prueba se puede resumir en 4 pasos:

- 1) Ordenar los datos de mayor a menor ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ )
- 2) Obtener de la tabla los coeficientes  $a$  ( $a_1, \dots, a_k$ ; donde  $k=n/2$ )
- 3) Calcular la varianza muestral ( $S^2$ ) y determinar el valor del estadístico  $W$ :

$$W = \frac{1}{(n-1)S^2} \left[ \sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_i) \right]^2$$

- 4) Si el estadístico de prueba es mayor que el valor crítico de tablas al valor de alfa seleccionado, se rechaza la normalidad de los datos

### Supuesto de homocedasticidad

Otro supuesto que se debe validar para aceptar el ANOVA es el de la igualdad de varianza u homocedasticidad, para ello también existen diferentes métodos, algunos de ellos gráficos y otros analíticos como la prueba de Bartlett que se describe a continuación. La hipótesis nula de estas pruebas es que todas las varianzas serán iguales, por tanto la hipótesis alternativa es que al menos una de ellas será diferente.

Al igual que otras pruebas estadísticas se incluye el cálculo de un estadístico de prueba, en este caso el estadístico tiene una distribución aproximada a la distribución ji-cuadrada con  $a-1$  grados de libertad. En la prueba de Bartlett el estadístico de prueba que es utilizado, se calcula con base en la siguiente fórmula:

$$X_0^2 = 2.3026 \frac{q}{c}$$

Donde las variables  $q$  y  $c$  se calculan de la siguiente forma:

$$q = (N - a) \log_{10} S_p^2 - \sum_{i=1}^a (n_i - 1) \log_{10} S_i^2$$
$$c = 1 + \frac{1}{3(a-1)} \left( \sum_{i=1}^a (n_i - 1)^{-1} - (N - a)^{-1} \right)$$

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^a (n_i - 1) S_i^2}{N - a}$$

Donde a es el número de muestras aleatorias y

$S_i^2$  es la varianza muestral de la población.

La hipótesis nula de igualdad de varianzas se rechazará cuando se cumpla lo siguiente:

$$X_0^2 = X_{\alpha, a-1}^2$$

Cabe destacar que si existe una diferencia muy grande entre varianzas muestrales el valor de q será muy grande, y disminuirá su valor al ser iguales las varianzas

### Supuesto de independencia

El supuesto de independencia es quizá el más importante de todos porque si no se cumple podría significar que no se aplicó correctamente el principio de aleatorización o incluso una planeación y/o ejecución del experimento mal realizada. También puede mostrar una adaptación al experimento o la aparición de nuevos factores que influyeron en la variable de respuesta o de salida.

Así como para probar los supuestos anteriores, para probar el supuesto de independencia también existen pruebas gráficas. Una de ellas consiste en graficar los residuos o los  $\epsilon_{ij}$ , respecto al tiempo, es decir, graficar respecto al orden en que se realizaron las corridas. Una de las pruebas analíticas es la de Durbin-Watson, que en pocas palabras, detecta autocorrelación entre los residuos.

Al igual que las pruebas realizadas anteriormente, la prueba de Durbin-Watson tiene como hipótesis nula que la correlación es igual a cero, y como hipótesis alternativa, que es mayor que cero. Aquí no se hace diferencia por tratamientos, sin embargo, se trabaja con los residuos ordenados como fueron tomadas las mediciones. Esta prueba también utiliza un estadístico de contraste, d, a continuación se muestra la fórmula para su cálculo:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}$$

Donde  $e_i$  son los residuos ordenados en el tiempo.

Una vez obtenido el valor de d se compara con valores obtenidos de tablas  $d_L$  y  $d_U$ , estos se obtienen con el número de residuos n, con el nivel de significación alfa y el número de variables p. Si  $d > d_U$  se acepta la hipótesis de que la correlación es igual a cero y por tanto son independientes. Si  $d < d_L$  se rechaza la hipótesis nula y finalmente si  $d_L \leq d \leq d_U$  no hay una decisión.