

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



TESIS:

***“SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE MEXICALI Y
PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN”***

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
Francisco Javier Leal Torres**

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Alejandro Sánchez Atondo**

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

DICIEMBRE DE 2021

ESTRUCTURA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Problema	10
1.2 Objetivo.....	11
1.3 Hipótesis	11
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	12
2.1 La movilidad urbana y el transporte público	12
2.1.1 El transporte urbano y la movilidad sustentable	12
2.1.2 Planeación de sistemas de transporte público	19
2.2 Modelación de sistemas de transporte	31
2.2.1 Complejidad en el análisis de los sistemas de transporte	31
2.2.2 Toma de decisiones y el uso de modelos	35
2.2.3 Estructura del modelo tradicional de transporte	37
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES	50
3.1 Movilidad urbana en Mexicali	50
3.1.1 Valores referencia	51
3.2. Estado actual del sistema de transporte público de Mexicali	53
3.2.1 Concesiones	53
3.2.2 Rutas en operación.....	55
3.2.3 Cobertura	57
3.2.4 Sobrepiso y sinuosidad	57
3.2.5 Paraderos.....	58
3.2.6 Transporte de personal.....	59
3.3 Propuesta de reordenamiento	60
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	64
4.1 Caracterización de la población del área de estudio	64
4.2 Modelo de generación de viajes diarios en Mexicali	65
4.2.1 Producción de viajes diarios	65
4.2.2 Atracción de viajes diarios.....	67
4.3 Generación de viajes en transporte público en horario pico	67

4.3.1	Identificación de horario de máxima demanda	67
4.3.2	Producción de viajes en TP en HP	68
4.3.3	Atracción de viajes en TP en HP	69
4.4	Modelo de distribución de viajes	69
4.4.1	Distribución de longitudes de viaje.....	69
4.4.2	Método Kalibri para estimar función de utilidad de modelo gravitacional ..	69
4.4.3	Modelo gravitacional y obtención de matriz OD 100x100.....	70
4.5	Simulación del estado actual.....	70
4.5.1	Modelación de oferta actual.....	70
4.5.2	Asignación	71
4.5.3	Indicadores.....	72
4.6	Simulación de escenario propuesto	72
4.6.1	Propuesta de frecuencias.....	72
4.6.2	Modelación de oferta propuesta.....	72
4.6.3	Asignación	73
4.6.4	Indicadores.....	73
4.7	Comparación de escenarios.....	74
CAPÍTULO 5 RESULTADOS		76
5.1	Caracterización de la población del área de estudio	76
5.1.1	Zonificación en dos niveles y población desagregada	76
5.2	Modelo de generación de viajes diarios en Mexicali	78
5.2.1	Producción de viajes diarios	78
5.2.3	Atracción de viajes diarios.....	80
5.3	Generación de viajes en transporte público en horario pico	80
5.3.1	Identificación de horario de máxima demanda	80
5.3.2	Producción de viajes en TP durante el HP.....	81
5.4	Modelo de distribución de viajes	84
5.4.1	Distribución de longitudes de viajes	84
5.4.2	Método Kalibri para estimar la función de utilidad en el modelo gravitacional.....	85
5.4.3	Aplicación de modelo gravitacional (generación de matriz OD)	86
5.5	Simulación del estado actual.....	88
5.5.1	Modelación de la oferta actual.....	88

5.5.2 Asignación e indicadores del escenario actual.....	90
5.6 Simulación del escenario propuesto.....	92
5.6.1 Propuesta de frecuencias.....	94
5.6.2 Modelación de oferta propuesta.....	95
5.6.3 Asignación e indicadores del escenario propuesto	96
5.7 Comparación de escenarios.....	98
CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....	100
6.1. Conclusiones metodológicas.....	100
6.2. Conclusiones particulares	101
6.3 Aporte de la investigación.....	103
6.4 Propuestas de líneas de investigación futuras	104
CAPITULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Clasificación de investigaciones sobre STP.	24
Tabla 02. Exigencias de los grupos relacionados al TP.....	28
Tabla 03. Medio externo del TP.....	29
Tabla 04. Medio interno del TP.....	30
Tabla 05. Estructura general de una matriz de viajes O-D.....	44
Tabla 06. KVR en zonas metropolitanas de México, 2010.....	51
Tabla 07. Factor de Sinuosidad por rutas de transporte público de Mexicali.	54
Tabla 08. Rutas de transporte público operando 2020.....	55
Tabla 09. Parámetros de operación en rutas actuales	56
Tabla 10. Cobertura del sistema de transporte público colectivo operando.....	57
Tabla 11. Sobrepeso (SP) y Factor de Sinuosidad (FS) de rutas en operación.	57
Tabla 12. Cobertura de los paraderos STP.....	59
Tabla 13 Comparativa geométrica de escenarios	61
Tabla 14. Datos generales de rutas de propuesta SIT.	62
Tabla 15. Paraderos propuestos compartidos por rutas.....	63
Tabla 16. Paraderos propuestos por rutas.	63
Tabla 17. Modelo de la oferta vial.....	70
Tabla 18. Total, de Habitantes por localidad.....	77
Tabla 19. Total, de Habitantes por zonas.....	77
Tabla 20. Total, de viajes por zonas.	79

Tabla 21. Total, de viajes en horario de máxima demanda por zonas.	81
Tabla 22. Matriz de distancia entre zonas.	84
Tabla 23. Distribución de distancias de viajes.	85
Tabla 24. Indicadores del escenario base.....	91
Tabla 25. Características operacionales TP.....	91
Tabla 26. Comparativa geométrica de escenarios.	93
Tabla 27. Datos generales de rutas de la propuesta SIT.	93
Tabla 28. Frecuencias promedio propuestas del SIT.....	95
Tabla 29. Indicadores de la propuesta de reordenamiento SIT.	97
Tabla 30. Comparativa de Indicadores.	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Modelo General De Planeación Del Transporte Público	29
Figura 02. Proceso de diseño y planeación de un sistema de un sistema de transporte.	36
Figura 03. Estructura del modelo clásico de transporte de cuatro etapas.	38
Figura 04. Derroteros del sistema de transporte público de Mexicali	53
Figura 05. Cobertura de los paraderos STP	59
Figura 06. Rutas de la propuesta de optimización.	61
Figura 07 Metodología del análisis. Elaboración propia.	75
Figura 08. Proyección poblacional por localidades.	76
Figura 09. Usuarios por modo de transporte.	79
Figura 10. Horario de máxima demanda.....	81
Figura 11. Producción de viajes por zonas, estado actual.....	83
Figura 12. Atracción de viajes por zonas, estado actual.	83
Figura 13. Matriz O-D 100x100.....	86
Figura 14. Comparativa de distancia de viajes.....	87
Figura 15. Valores GEH.	88
Figura 16. Modelo de oferta del estado actual.	89
Figura 17. Paraderos del estado actual.....	89
Figura 18. Rutas en operación del estado actual.	90
Figura 19. Volúmenes de flujo del estado actual.....	92
Figura 20. Rutas del SIT.	94
Figura 21. Paraderos del SIT.....	96
Figura 22. Volumen de flujo del SIT.....	97

RESUMEN

Es ampliamente reconocido que el sistema de transporte público debe ser una de las principales prioridades de los responsables de la planeación de la movilidad urbana, ya que un aumento en el uso del mismo trae beneficios para todos los grupos de interés como son los usuarios, los prestadores de servicio, el gobierno y la sociedad en general que no es usuaria del sistema (Cervero & Kockelman, 1997; Suzuki, Cervero, & Luchi, 2014). Entre estos beneficios se encuentran la optimización de tiempos de traslado en distintas modalidades, reducción de emisiones contaminantes, mejoramiento de la imagen urbana, reducción de costos generalizados de viaje, entre otros.

En los últimos años en Mexicali, Baja California se ha presentado un significativo crecimiento urbano, poblacional y de la tasa vehicular de la ciudad, esta última posiciona a la capital del estado como uno de los centros urbanos con mayor índice de vehículos por habitante, alcanzando la segunda más alta de México, con 400 automóviles por cada mil habitantes. Además, presenta un índice de ocupación vehicular muy bajo. Por otro lado, el indicador de kilómetro-vehículo recorrido per cápita es el más elevado del país con 6,000 km por habitante (Medina Ramírez, 2012).

En la literatura se menciona que el sistema de transporte público de Mexicali atiende a menos del 12% de los viajes de la ciudad (IMIP & SIMUTRA, 2011), mientras que la ONU-HÁBITAT en 2015 mencionan en el Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México que el promedio a nivel nacional de los viajes realizados en esta modalidad es del 65%. Exhibiendo un problema serio para la movilidad urbana, ya que el poco uso del transporte colectivo y el uso excesivo del transporte privado se traducen en congestión, tiempos de traslados prolongados que conllevan al incremento de los gases de efecto invernadero que impactan negativamente en la salud de la población.

Ante la evidente deficiencia en la planeación convencional del transporte, enfocada en construir infraestructura para los automóviles particulares, se están haciendo esfuerzos para implementar una nueva estrategia enfocada en el transporte urbano (Kunieda & Gauthier, 2007). Tal es el caso de nuestra área de estudio que en 2019 la UABC realizó una propuesta para eficientizar el sistema de transporte público, a partir de la integración y operación de ejes troncales. Esta propuesta se llevó a cabo desde un enfoque geométrico, buscando optimizar la oferta mediante recorridos más eficientes para reducir costos operativos, y considerando una integración y operación conjunta de las distintas empresas transportistas. Como resultado se obtuvo una propuesta base conformada por 23 rutas, de las cuales 4 son troncales, 16 alimentadoras y 3 circuitos.

Ante esta propuesta de modificación de trazos y cambio a un sistema tronco-alimentado del sistema de transporte público, surgió incertidumbre por parte de los tomadores de decisiones en relación al impacto real que entrega la propuesta. Además, existen pocos datos para modelar detalladamente el fenómeno del transporte en Mexicali. Por lo tanto, esta investigación pretende validar la propuesta del Sistema Integrado de Transporte (SIT) de

Mexicali a partir de la simulación de su operación y la obtención de indicadores a través del análisis del sistema de transporte público de la ciudad de Mexicali.

Para lograr lo anterior se plantea una metodología general que consta de la implementación de 7 elementos particulares. El primero de ellos es la caracterización de la población del área de estudio, esto con el fin de obtener el segundo elemento particular que es definir el modelo de generación de viajes diarios para nuestra zona de estudio. El tercero es la generación de viajes en transporte público durante el horario de máxima demanda del sistema de actual, y así continuar con el modelo de distribución de viajes, siendo este el cuarto elemento particular. El quinto es llevar a cabo la simulación del estado actual y asignar la demanda previamente obtenida; Posterior a ello, se considera un sexto elemento particular donde se lleva a cabo la simulación del escenario propuesto. Finalmente, el séptimo elemento considera una comparación de los indicadores entre el escenario base y la propuesta de reordenamiento.

Finalmente se confirma la hipótesis planteada sobre una ciudad como la de Mexicali, con crecimiento constante, dispersa, y con una oferta del transporte público con muchas áreas de oportunidad, una reorganización completa del sistema realizada a partir de indicadores de la oferta, y orientada a un enfoque integral y coordinado entrega beneficios considerables a pesar de no contar con datos específicos de la demanda. Además, que esta propuesta de reordenamiento del SIT Mexicali, evaluada a través de técnica de simulación de transporte público, entrega beneficios a operadores y usuarios en términos de costos operativos, pues reduce al menos un 20% los tiempos de traslados, y por lo menos duplica el número de trasbordos, con ello se logra reducir los costos de los viajes.

ABSTRACT

It is widely recognized that the public transport system should be one of the main priorities of those responsible for planning urban mobility, since an increase in the use of it brings benefits for all stakeholders such as users, service providers, the government and society in general that is not a user of the system (Cervero & Kockelman, 1997; Suzuki, Cervero, & Luchi, 2014). Among these benefits are the optimization of travel times in different modes, reduction of polluting emissions, improvement of the urban image, reduction of generalized travel costs, among others.

In recent years in Mexicali, Baja California there has been a significant urban, population growth and the city's vehicular rate, the latter positions the state capital as one of the urban centers with the highest rate of vehicles per inhabitant, reaching the second highest in Mexico, with 400 cars for every thousand inhabitants. In addition, it has a very low vehicle occupancy index. On the other hand, the indicator of kilometer-vehicle traveled per capita is the highest in the country with 6,000 km per inhabitant (Medina Ramírez, 2012).

The literature mentions that Mexicali's public transportation system serves less than 12% of the city's trips (IMIP & SIMUTRA, 2011), while UN-HABITAT in 2015 mentioned in the National Report on Urban Mobility in Mexico that the national average of trips made in this modality is 65%. Exhibiting a serious problem for urban mobility, since the low use of collective transport and the excessive use of private transport result in congestion, long travel times that lead to an increase in greenhouse gases that negatively impact the health of the population.

Given the evident deficiency in conventional transportation planning, focused on building infrastructure for private automobiles, efforts are being made to implement a new strategy focused on urban transportation (Kunieda & Gauthier, 2007). Such is the case of our study area that in 2019 the UABC made a proposal to make the public transportation system more efficient, based on the integration and operation of trunk axes. This proposal was carried out from a geometric approach, seeking to optimize the supply through more efficient routes to reduce operating costs, and considering a joint integration and operation of the different transportation companies. As a result, a base proposal was obtained consisting of 23 routes, of which 4 are trunk routes, 16 feeder routes and 3 circuits.

Given this proposal to modify the routes and change to a trunk-feeder system of the public transportation system, uncertainty arose on the part of decision-makers regarding the real impact of the proposal. In addition, little data exists to model in detail the transportation phenomenon in Mexicali. Therefore, this research aims to validate the proposed Integrated Transportation System (ITS) of Mexicali by simulating its operation and obtaining indicators through the analysis of the public transportation system of the city of Mexicali.

In order to achieve the above, a general methodology consisting of the implementation of 7 particular elements is proposed. The first of these is the characterization of the population of the study area, in order to obtain the second particular element, which is to define the daily trip generation model for our study area. The third is the generation of trips in public transport during the peak demand hours of the current system, and thus continue with the trip distribution

model, this being the fourth particular element. The fifth is to carry out the simulation of the current state and assign the previously obtained demand; after that, a sixth particular element is considered where the simulation of the proposed scenario is carried out. Finally, the seventh element considers a comparison of the indicators between the base scenario and the proposed rearrangement.

Finally, it confirms the hypothesis that in a city like Mexicali, with constant growth, dispersed, and with a public transportation supply with many areas of opportunity, a complete reorganization of the system based on supply indicators, and oriented to an integral and coordinated approach, delivers considerable benefits despite the lack of specific demand data. Furthermore, this proposal to reorganize the SIT Mexicali, evaluated through a public transportation simulation technique, provides benefits to operators and users in terms of operating costs, since it reduces travel times by at least 20%, and at least doubles the number of transfers, thus reducing travel costs.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

En Mexicali, Baja California en los últimos años se ha presentado un significativo crecimiento urbano, poblacional y de la tasa vehicular de la ciudad, esta última posiciona a la capital del estado como uno de los centros urbanos con mayor índice de vehículos por habitante, alcanzando la segunda más alta de México, con 400 automóviles por cada mil habitantes. Además, presenta un índice de ocupación vehicular muy bajo. Mientras que el indicador de kilómetro-vehículo recorrido per cápita es el más elevado del país con 6,000 km por habitante (Medina Ramírez, 2012).

En la literatura se menciona que el sistema de transporte público de Mexicali atiende a menos del 12% de los viajes de la ciudad (IMIP & SIMUTRA, 2011), mientras que la ONU-HÁBITAT en 2015 mencionan en el Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México que el promedio a nivel nacional de los viajes realizados en esta modalidad es del 65%. Exhibiendo un problema serio para la movilidad urbana, ya que el poco uso del transporte colectivo y el uso excesivo del transporte privado se traducen en congestión, tiempos de traslados prolongados que conllevan al incremento de los gases de efecto invernadero que impactan negativamente en la salud de la población.

El estado actual de sistema de transporte público se caracteriza por desplazamientos prolongados, disminución de la demanda que, además, ha resultado en una red con un nivel de sobre piso cercano al 80%, y una sinuosidad promedio de 1.77 (UABC, 2019) al estar diseñado como un sistema de competencia entre los operadores, en el que se busca llevar al usuario sin transbordar. Esto a su vez exhibe diversas áreas de oportunidad en materia de eficiencia operativa, ampliación de cobertura y accesibilidad que entregue beneficios de servicio al usuario.

Para ello es necesario hacer un análisis de las rutas en operación, reordenar las que no cumplan sus objetivos y proponer las rutas faltantes que satisfaga las necesidades de la población.

En este sentido en 2019 la UABC realiza una propuesta para mejorar la eficiencia del sistema, realizada a partir de una modificación de trazos para reducir costos operativos y cambiar a un sistema tronco-alimentado, sin embargo, aún no es implementada ya que existe incertidumbre por parte de los operadores de TP.

Por lo que se considera importante generar investigaciones que aporten soluciones y brinden información detallada que sea útil para los tomadores de decisiones en este tema.

1.2 Objetivo

Validar las propuestas del Sistema Integrado de Transporte (SIT) de Mexicali a partir de la simulación de su operación y la obtención de indicadores a través del análisis del sistema de transporte público de la ciudad de Mexicali.

1.3 Hipótesis

En una ciudad como la de Mexicali, con crecimiento constante, dispersa, y con una oferta del transporte público con muchas áreas de oportunidad, una reorganización completa del sistema, realizada a partir de indicadores de la oferta y orientada a un enfoque integral y coordinado entrega beneficios considerables a pesar de no contar con datos específicos de la demanda. Por ello la propuesta de reordenamiento del SIT Mexicali, evaluada a través de técnica de simulación de transporte público, entrega beneficios a operadores y usuarios en términos de costos operativos, tiempos de traslados y costos de viajes.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La movilidad urbana y el transporte público

2.1.1 El transporte urbano y la movilidad sustentable

Se considera transporte urbano a todo aquel desplazamiento realizado dentro de la demarcación urbana, por ello, se entiende que este concepto está estrechamente ligado con el desarrollo de las ciudades y regiones, así como con la calidad de vida de sus habitantes (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México [ITDP], 2012) sin embargo, en la literatura existen diferentes definiciones para este concepto.

Por su parte Iracheta, (2011) comenta que en la actualidad la movilidad diaria es prioridad para la producción y la productividad humana, además menciona que es necesaria para la seguridad física y emocional de las personas, además que impacta en el desarrollo de la mayoría de las funciones humanas. En este sentido Anguita (2013) establece que una relación positiva entre la sociedad, el sistema de movilidad urbana y las dinámicas de viajes, generan desarrollo del sitio y a su vez demandan procesos de planeación cada vez más complejos que cumplan con las necesidades de cada uno de los sectores sociales.

Por otro lado, una de las definiciones más integrales y aceptada es la expuesta por el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF, 2011), que define a la movilidad urbana como el conjunto de desplazamientos de personas y bienes, con base en los deseos y necesidades de acceso al espacio urbano, a través de diversos medios de transporte. Así, el concepto de movilidad considera los factores o motivantes de los desplazamientos.

Incluso Handy (2002), define a la movilidad urbana como la habilidad de trasladarse de un lugar a otro independientemente del modo en que el que se lleve a cabo, incluye el desplazarse caminando, andar en bicicleta, vehículo, transporte público y cualquier otro modo que permita el desplazamiento. Sin duda, la palabra clave en esta definición es “habilidad”, ya que esto da pie a entender la movilidad como un derecho a desplazarse mediante un sistema de transporte, el cual en su diseño y operación debe tomar en cuenta las características socioeconómicas y demográficas de la población, así como las formas de producción, organización espacial y la estructura del transporte existente.

Por otro lado, la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) menciona que, en la conceptualización de la movilidad urbana, es necesario considerar que su dinámica conlleva el uso de sistemas de transporte con el consecuente consumo de espacio, tiempo, recursos y energía (CONUEE, 2018) y, por lo tanto, tiene impactos negativos desde el punto de vista económico, social y ambiental. Este escenario ha dado pie a que otros autores agreguen nuevas variables en la definición del concepto de movilidad urbana, tal es el caso de Ballén Duque (2007), quien incorpora al medio ambiente, el espacio público y la infraestructura, o Jans (2009) quien menciona las redes de conexión locales.

Por lo tanto, el transporte es un elemento importante para el desarrollo urbano y una parte vital de la sociedad, y economía moderna, este debe proporcionar al individuo el acceso a los servicios básicos, como la salud, alimentación, educación, empleo y actividades recreativas (Branza & Cristea, 2013).

Cascetta, (2009) menciona que los sistemas de transporte consisten en elementos físicos y organizacionales, los cuales interactúan entre sí para producir oportunidades de transporte, además de la demanda generada que aprovecha esas oportunidades para viajar de un lugar a otro. Por ello es necesario que en el estudio de los sistemas y el diseño de las redes de transporte deban comprender la interacción de la oferta y la demanda. La red de transporte puede considerarse como el suministro, proporcionado para un determinado objetivo, y el público que viaja como la demanda, que decide si viajar y, qué rutas utilizar (Szeto and Lo 2004).

Las definiciones anteriores dejan ver que la movilidad es un término mucho más amplio que el transporte y el tránsito, los cuales son comúnmente utilizados erróneamente como sinónimos del primero. El concepto de transporte se relaciona con el sistema de medios mecánicos y reglas operativas para trasladar personas o mercancías, mientras tanto, el tránsito se refiere, sobre todo, a la circulación de vehículos en las vialidades, principalmente motorizados. Por otro lado, la movilidad es un concepto que abarca cuestiones más complejas como sociales y económicas, e incluye, por un lado, el hecho de que las personas (o mercancías) hacen uso de un sistema de transporte para llegar al destino donde realizan actividades, y, por otro lado, que el tránsito es el resultado de la interacción entre las necesidades y deseos de movilidad y las características del transporte que se utiliza. En este sentido Arrue, (2009) menciona que el concepto de movilidad es amplio y complejo pues este introduce una serie de variables que van más allá de los desplazamientos. A diferencia del transporte, la movilidad aborda no solo infraestructura y vehículos, sino que incorpora condiciones sociales, políticas, económicas y culturales de quienes se movilizan.

Durante muchos años se consideraba un distintivo del progreso el uso del vehículo particular para desplazarse de un lugar a otro, sin embargo, en la actualidad se entiende que el uso excesivo del mismo genera impactos negativos en cuestiones sociales, ambientales y económicas. El hecho de que la planeación tradicional se haya enfocado de esta forma, llevó con el paso de los años a diversos problemas como congestión, viajes largos y costosos, contaminación ambiental y visual, etcétera (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Derivado de esto en algunas ciudades de países en desarrollo cuentan con altas tasas de motorización que se traducen en sistemas de movilidad ineficientes, con altos índices de contaminación, congestión vial, y tiempos de traslados prolongados, impactando de manera negativa en el medio ambiente, en la productividad económica y en la calidad de vida de la población. Es decir, sistemas de movilidad que no están alineados con ninguna de las tres dimensiones de la sustentabilidad: económica, social y ambiental (ONU- HÁBITAT, 2013). En este sentido, Arrue, (2009) menciona que el concepto de movilidad es amplio y complejo, por ello, muchas ciudades se enfrentan a desafíos sin precedentes en sus sistemas de movilidad, especialmente en los países en desarrollo.

Derivado de lo anterior surge el concepto de “movilidad sustentable”, el cual fue presentado por primera vez en el Libro Verde de la Comisión Europea de 1992 sobre el impacto del transporte en el medio ambiente (EC, 1992), que siguió al informe “Nuestro futuro común” (Informe Brundtland), y su discusión sobre el desafío global del desarrollo sustentable (Brundtland et al., 1987). El Libro Verde reconoció que, aunque el transporte había aportado enormes beneficios a la economía mundial y había abierto el comercio mundial y los viajes, había costos sustanciales, particularmente en términos de impactos ambientales, costos sociales (por ejemplo, de accidentes) y dependencia de recursos no renovables (es decir, petróleo). El Libro Verde concluyó que, en ese momento, el estado actual del sistema de transporte a nivel global era no sustentable (EC, 1992).

El concepto de sustentabilidad o sostenibilidad es prácticamente acuñado en la década de los 80; sin embargo, desde 1972 se hacía referencia a un “desarrollo durable o sostenible”. Al principio, estaba relacionado con criterios de evaluación cuantitativos, pero a mediados de los 80 se incorporan mediciones de orden cualitativo contextualizadas por grupos de valores éticos y humanos (Jiménez- Jiménez, et al, 2014). Hasta 1987 se precisa la definición de desarrollo sostenible –la cual es utilizada en la actualidad por la mayoría de las organizaciones en el mundo–, como: “Un desarrollo que permite a las generaciones presentes satisfacer sus necesidades sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las propias”, (ONU, 1987).

Una movilidad urbana sustentable debe considerar, dentro de su planeación aspectos económicos, ambientales y sociales. Al añadirse al concepto de “movilidad” el calificativo de “sustentable”, se aspira a un sistema que logra satisfacer las necesidades actuales de movilidad en las ciudades sin comprometer la posibilidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades y, por lo tanto, la planeación de una movilidad urbana sustentable debe tener en cuenta no sólo aspectos económicos, sino también ambientales y sociales (Otero, 2015).

A pesar de las recomendaciones expuestas por el libro verde, después de 30 años, existen ciudades donde los esfuerzos han sido nulos o insuficientes, pues este cambio de enfoque requiere de inversiones económicas, acuerdos entre autoridades y desarrollo de información. Por ello los diversos problemas y externalidades como congestión, viajes largos y costosos, contaminación ambiental y visual, accidentes o déficit financiero, continúan agravándose.

Actualmente el transporte es un gran consumidor de energía y recursos materiales, ya que aproximadamente el 32% del consumo de energía mundial se utiliza para este fin, principalmente a partir de recursos renovables (Holden et al., 2020). También es uno de los principales factores que contribuyen a la contaminación local, regional y mundial; se estima que en el año 2016 el transporte fue la fuente del 24% de las emisiones globales de CO₂. Por otro lado, aproximadamente 1.35 millones de personas en todo el mundo mueren en accidentes de tránsito, con un costo de aproximadamente el 3% del Producto Interno Bruto en la mayoría de los países (Sager et al., 2011). Así mismo, el acceso a los servicios de movilidad ha sido desigual, provocado fenómenos de exclusión social (Ghorbanzadeh et al., 2018).

Una de las razones por las que estos problemas continúan agravándose en la mayoría de las ciudades, es porque en los procesos de planeación y toma de decisiones prevalece un enfoque reactivo orientado al aumento de la capacidad de la infraestructura. Lo anterior, más que solucionar los problemas, provoca ciudades dispersas y fomenta el uso del vehículo particular, y, por lo tanto, termina por generar más congestión y mayores externalidades negativas (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México [ITDP], 2012b).

La movilidad urbana sustentable demanda entonces un proceso de planeación integral, que restablezca el equilibrio entre todos los medios de desplazamiento (automóvil, transporte público, caminata, bicicleta), proteja el medio ambiente, y se articule a la planeación del desarrollo urbano y ordenamiento territorial (Avellaneda & Dextre, 2014). Así, aquellas ciudades que busquen avanzar hacia escenarios de movilidad urbana sustentables, deben enfocar sus esfuerzos a que la población tenga facilidades de accesibilidad a los bienes y servicios de la localidad, de modo que les permita tener una vida digna y sistemas de transporte que satisfagan sus necesidades. Para ello es necesario contar con una relación cercana entre el desarrollo urbano de la localidad y la movilidad, ya que se requieren ciudades compactas, con uso de suelos mixtos, sistemas de transporte público y modos de transporte alternos que permitan a las personas satisfacer sus necesidades en distancias cortas.

El ITDP establece ocho principios orientadores en la búsqueda de una MUS (ITDP, 2012b):

1. Caminar. Desarrollar barrios y comunidades que promuevan la caminata, acortando los cruces de vialidades, enfatizando la seguridad y conveniencia del peatón, creando espacio público y promoviendo actividades en plantas bajas, a nivel de calle.
2. Pedalear. Priorizar redes de ciclo vías, diseñando calles que acentúen la seguridad y conveniencia de los ciclistas, ofreciendo estacionamiento seguro para bicicletas públicas y privadas.
3. Conectar. Crear patrones densos de calles y andadores que sean muy accesibles para peatones, ciclistas y tránsito vehicular; crear calles sin autos, callejones y caminos verdes para promover viajes no motorizados.
4. Transportar. Promover transporte público de alta calidad que asegure un servicio frecuente, rápido y directo, además de localizar estaciones de tránsito, viviendas, trabajo y servicios a distancias caminables entre ellas.
5. Mezclar. Planificar para usos de suelo mixtos, con un óptimo balance entre vivienda, comercio, parques, espacios abiertos accesibles y servicios.
6. Compactar. Crear regiones compactas con viajes pendulares cortos, reducir la expansión urbana focalizando el desarrollo en las áreas adyacentes y vecinas al desarrollo existente, así como localizar viviendas y centros de trabajo a distancias cortas.
7. Densificar. Hacer coincidir la densidad poblacional con la capacidad del sistema de tránsito.
8. Cambiar. Incrementar la movilidad reduciendo el estacionamiento y regulando el uso de las vialidades; limitar el estacionamiento para desalentar el uso del automóvil en horas pico; implantar cuotas por uso del automóvil por horas del día y destinos.

En los principios antes mencionados se exhibe que la MUS tiene un enfoque integral, en donde busca la armonía entre todos los modos de transporte, para ello es necesaria la participación de diversos actores en donde lleven a cabo esfuerzos en conjunto para cambiar el enfoque de planeación actual y le reste prioridad al uso del automóvil particular.

2.1.1.1 La movilidad urbana sustentable en el contexto internacional

En la actualidad en el contexto internacional existe un interés creciente por parte de los gobiernos y activistas a hacer esfuerzos que busquen una MUS, desde el ámbito académico estos se pueden abordar desde dos direcciones distintas. La primera es llevar a cabo los estudios a través de indicadores (medio ambiente, económico y social), y la segunda es a través de técnicas de modelación del transporte en donde se evalúen escenarios propuestos orientados a una MUS (Okraszewska et al., 2018).

Por otro lado, en la práctica el estado actual sobre la MUS es contrastante en diversas partes del mundo, y es en la Unión Europea es donde los esfuerzos por vincular el desarrollo urbano y la movilidad han sido los más exitosos. Esto se debe en gran medida a que, desde hace ya más de dos décadas, cuentan con un marco regulatorio estratégico que ha hecho que la mayoría de los países de Europa, tengan la movilidad urbana sustentable entre sus prioridades (IDAE, 2006).

Como se mencionó anteriormente, en 1992 el “Libro Verde sobre el impacto del transporte en el medio ambiente” sentó las bases para empezar a trabajar en la búsqueda de escenarios de movilidad sustentables (EC, 1992). Así mismo, el “Libro Verde de la Energía: Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético” (EC, 2001), indica que debe potenciarse el uso racional del vehículo particular en los centros urbanos y los transportes urbanos limpios, ya que el desigual reparto entre modos de transporte aumenta la congestión y repercute negativamente en el medio ambiente y la calidad de vida. Por otro lado, el “Libro Blanco del Transporte: La política de transportes cara al 2010: la hora de la verdad” (EC, 2002a), contiene medidas encaminadas al objetivo de la movilidad sustentable en Europa y fomenta la integración de todos los modos de transporte buscando un equilibrio.

Destaca también el “VI Programa de Acción en materia de Medio Ambiente” (EC, 2002b), que incluye una estrategia temática sobre el medio ambiente urbano y establece el transporte urbano sustentable como uno de los asuntos prioritarios. Propone, entre otras medidas, que todas las ciudades de más de 100,000 habitantes deberán implantar y revisar de forma regular un Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS), y que todos los proyectos nuevos de infraestructuras de transporte urbano se evalúen con criterios de sostenibilidad.

A raíz de esto, es que actualmente en Europa todas las zonas urbanas con una concentración significativa de personas cuentan con un PIMUS, y aunque en algunas se han logrado más beneficios que otras, en la mayoría de las ciudades de la Unión Europea existe una cultura de movilidad urbana sustentable y se prioriza el uso de los sistemas de transporte público y los modos no motorizados.

Sin embargo, los Planes de Movilidad Urbana Sustentable son una idea nueva o inexistente en otras partes fuera de la Unión Europea, donde se sigue planeando con el enfoque

tradicional que tiene como punto de partida el transporte y no una movilidad integral para el usuario (Kunieda & Gauthier, 2007), por lo que es común observar problemas de congestión, así como altos costos y tiempos de viaje. Por lo tanto, la movilidad urbana sustentable es un desafío significativo en las ciudades de estos países que están experimentando acelerados procesos de urbanización (Ahmad & Puppim, 2016). Si bien en algunas de estas áreas urbanas el problema está relacionado con sistemas de Transporte Público saturados e incapaces de satisfacer la demanda (Salon, 2019; Ittyerah, 2004), hay otras ciudades donde se presentan altas tasas de motorización y una dependencia del vehículo particular, ocasionando problemas económicos, sociales y ambientales (Ghorbanzadeh et al., 2018).

En la mayor parte de territorio africano, predomina una mala coordinación entre las instituciones relacionadas con el transporte urbano. Esto ha generado problemas al momento de desarrollar planes, estudios, proyectos y políticas de movilidad urbana de manera unificada e integral. Cabe mencionar que existen demasiadas instituciones involucrados en este ámbito, provocando una coordinación aún mayor. Además, se suma una escasez generalizada de financiamiento y una centralización predominante en el sector. Mientras tanto, en Asia occidental, las estructuras institucionales y de gobernanza para el transporte urbano son tan diversas como los diferentes sistemas de gobierno que existen. No obstante, parece emerger en la región un modelo descentralizado como resultado de los cambios relacionados con la rápida urbanización. Muchos países ricos en petróleo han desarrollado sistemas de transporte urbano similares a los de los países desarrollados (ONU- HÁBITAT, 2013).

En América Latina y el Caribe, los marcos institucionales y de gobernanza en los ámbitos del uso del suelo urbano y del transporte están fuertemente influidos por los países desarrollados (en particular, por América del Norte). Las nuevas iniciativas institucionales en esta región se relacionan con los esfuerzos para formalizar y mejorar los servicios de transporte público a través de la introducción de nuevos sistemas BRT y de ampliaciones de la red de metro (ONU- HÁBITAT, 2013).

Existen casos especiales como la ciudad de Curitiba, en Brasil, en donde se aprecian los beneficios de contar, desde hace más de 30 años, con una visión de movilidad integrada al desarrollo urbano y, sobre todo, de darle continuidad a la misma. Así mismo, existen algunos casos de ciudades latinoamericanas como Santiago, en Chile, o Bogotá, en Colombia, que, en las últimas décadas, han reorganizado sus servicios de transporte público, que presentaban bajos estándares de calidad, para establecer sistemas integrados de transporte. Si bien, en su momento estos reordenamientos no fueron concebidos bajo el “novedoso” enfoque de movilidad urbana sustentable, los objetivos que le dieron justificación a estos procesos de reordenamiento, así como los impactos generados, están alineados con los principios de la MUS. El reordenamiento del transporte público en estas ciudades latinoamericanas ha implicado cambios significativos en la regulación y funcionamiento de sus sistemas de transporte. Cada ciudad ha enfrentado diferentes desafíos y los resultados de las reformas no han sido uniformes (Fuller, 2017).

2.1.1.2 La movilidad urbana sustentable en el contexto nacional

Al igual que en el contexto internacional, en México también existe un interés creciente por el tema de la MUS, tal es el caso que desde el 2008, el Fondo Nacional de Infraestructura y

el Programa de Apoyo Federal al Transporte Masivo promueven la elaboración de la gran mayoría de los documentos de planeación sobre movilidad existentes en México (ITDP, 2012b). Cabe mencionar que esto se vio influido por parte del Banco Nacional de obras y servicios Públicos (BANOBRAS), ya que este organismo solicita a las ciudades el contar con un Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS) para tener la posibilidad de acceder a la partida de inversión pública federal destinada a desarrollar infraestructura de transporte y, fundamentalmente, proyectos BRT (Bus Rapid Transit), sin embargo, este sistema no siempre es la mejor alternativa para todas las zonas urbanas del país.

Por otro lado, en 2014, el Gobierno Federal presentó la Estrategia Nacional de Movilidad Urbana Sustentable (SEDATU, 2014), donde promueven dos objetivos. Por un lado, generar un cambio de tendencia en el financiamiento federal en materia de movilidad urbana sustentable para garantizar inversiones eficientes y efectivas. Por otro lado, incentivar la gestión y diseño de políticas públicas locales que impulsen el cambio modal a medios sustentables, eficientes y seguros, como el transporte no motorizado y el transporte público.

En el año 2016 la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano consideró a la movilidad como un componente imprescindible de la planeación urbana (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2016). A pesar de esto al año 2018 solamente la mitad de las entidades del país contaban con un marco normativo que contempla las disposiciones de la movilidad urbana sustentable y más del 60 % resulta obsoleto ante la necesidad de desplazamiento de los ciudadanos y, por ende, del diseño de una movilidad desde una perspectiva sustentable. Así mismo, sólo 14 entidades integran la jerarquía de movilidad, solo el 34 % promueve un Desarrollo Orientado al Transporte, el 53 % tiene políticas para la gestión de la demanda del automóvil, y el 41% contempla la accesibilidad de las personas (Estrada, 2018).

A nivel nacional, la ciudad de León, Guanajuato es sin duda la que ha logrado un avance considerable hacia escenarios de movilidad urbana sustentable. León fue la primera ciudad mexicana en crear un Sistema Integrado de Transporte a través de líneas BRT y rutas alimentadoras, el cual inició operaciones en el año 2003. Actualmente el sistema cuenta con 10 líneas troncales y atiende más del 80% de los viajes generados en el municipio (Lah et al. 2019).

Después de León, otras 12 ciudades han desarrollado sistemas BRT en el país, sin embargo, la mayoría (excepto en la Ciudad d México) están compuesto por 3 o menos líneas y han tenido poco impacto en las dinámicas de movilidad. Para para lograr que las personas cambien sus modos de transporte hacia alternativas más sustentables, es necesario llevar a cabo un análisis de los diferentes aspectos de la movilidad y el sistema de transporte de la ciudad, y las mejoras al sistema diseñarse considerando las variables que más pueden incidir en la decisión de los usuarios para dejar el vehículo particular (Li et al., 2019; Loyola et al., 2019). Lamentablemente, en los países en desarrollo la recopilación de datos de movilidad para este tipo de análisis no suele llevarse a cabo de manera continua, y generalmente solamente existe información actualizada en las grandes zonas metropolitanas como las mencionadas anteriormente (Bogotá, Santiago, etc.), mientras que en el resto de ciudades la información y los estudios sobre movilidad son escasos y no son una prioridad (Cardona et al., 2017).

Lo anterior exhibe que en México se está buscando avanzar hacia escenarios de movilidad sustentable impulsando la elaboración de PIMUS, no obstante, la generación de estos instrumentos no debe estar motivada por el simple hecho de cumplir con las disposiciones federales e implementar sistemas BRT que no necesariamente son viables. Más bien, el diseño de estos PIMUS debe de estar respaldado por un análisis detallado de las características de la movilidad y de la evaluación de las alternativas que permitan el cambio modal del vehículo particular a alternativas más sustentables, como sistemas de transporte público en sus diferentes tipologías, y no necesariamente sistemas BRT.

Sin embargo, para lograr que las personas cambien sus modos de transporte hacia alternativas más sustentables, es necesario llevar a cabo un análisis de los diferentes aspectos de la movilidad y el sistema de transporte de la ciudad, para lograrlo es necesario contar con un sistema de transporte público eficiente que atraiga cada vez más usuarios y dejen de lado opciones menos sustentables para sus desplazamientos como el vehículo particular.

Esto último ya que un aumento en el uso de los sistema de transporte público masivo de una localidad trae beneficios para todos los grupos de interés como son los usuarios, los prestadores de servicio, el gobierno y la sociedad en general que no es usuaria del sistema (Cervero & Kockelman, 1997; Suzuki, et al 2014). Entre estos beneficios se encuentran la optimización de tiempos de traslado en distintas modalidades, reducción de emisiones contaminantes, mejoramiento de la imagen urbana, reducción de costos generalizados de viaje, entre otros.

2.1.2 Planeación de sistemas de transporte público

El transporte público es un medio de transporte de uso general, el cual busca satisfacer las necesidades de movilidad de la población donde este habita (Jiménez et al, 2014) y es clave para garantizar la capacidad de las personas para acceder a las oportunidades que ofrece la ciudad (Hernández, 2017)

Es importante recalcar que el servicio de transporte público no es demandado por sí mismo, sino como un servicio derivado para realizar otras actividades como trabajar, estudiar, atención de la salud, realizar compras etc., (Henry, 1998), y a diferencia de otros medios de transporte como el automóvil, este es de los que menos peso monetario recarga sobre los usuarios (Hernández, 2017). Es así que la función de los sistemas de transporte público son las de carácter social, económico y político, influenciado directamente por la localización, tamaño y características de los asentamientos humanos y de las actividades productivas, además sirven para fomentar las inter-relaciones entre las diferentes características de los usuarios, sus viajes, motivos y distribución física (Jiménez et al, 2014).

Por lo tanto, el transporte público se ha convertido en la columna vertebral de una movilidad urbana eficiente, y un suministro adecuado del mismo ayuda a que las ciudades sean más dinámicas y competitivas (UITP, 2013). Incluso (Muñoz et. al 2014a), establecen que el grado de utilización del transporte público (atracción de usuarios) en el ámbito de las grandes ciudades es representativo del nivel de comportamiento sostenible en la movilidad y por lo tanto resulta indispensable para valorar el estado del sistema. Así, contar con sistemas de transporte público eficientes debe ser una de las prioridades de los responsables de la planeación

de la movilidad urbana, y deben formularse estrategias que fomenten su uso (Leo Morillón, & Silva, 2017).

Existen diferencias significativas entre la planeación del transporte en países desarrollados y países menos desarrollados. Las diferencias pueden ser del rubro económico debido a que un menor ingreso por parte de los usuarios, reduce la tasa de propiedad vehicular y aumenta la demanda de transporte público. El bajo ingreso ocasiona también falta de capacidad para el pago de tarifas y baja remuneración para los operadores del servicio. (Iles, 2005). Aunado a esto, en los países en desarrollo son poco frecuentes los estudios sobre movilidad, y generalmente se llevan a cabo en las grandes áreas metropolitanas, por lo que en las ciudades pequeñas y medianas no hay datos que permitan llevar a cabo análisis detallados (Sánchez-Atondo et al, 2020)

Es así que, en muchas ciudades en el mundo, la planeación del transporte público de pasajeros cada vez toma más importancia debido al notable incremento demográfico y económico que se da en muchas regiones, y la construcción de infraestructura que de paso a sistemas integrados de transporte parece ser una tendencia en muchas ciudades (Conrado et al, 2016).

La integración de un sistema de transporte puede definirse como un enfoque global a través del cual los diferentes elementos que lo componen trabajan de forma conjunta para producir efectos acumulados positivos en el menor plazo posible, con el fin de ofrecer servicios de transporte más eficientes y fáciles de utilizar por los usuarios. Estos sistemas pueden llegar a tener modos de transporte como: buses articulados, trenes, vías peatonales, bicicletas, lo que involucra inversiones de dinero que muchas ciudades pueden no poseer. Por otra parte, la integración del transporte pueden ser soluciones de corto y mediano plazo que den respuesta a condiciones actuales (*ibidem*).

2.1.2.1 Migración a Sistemas de transporte público tronco-alimentados en Latinoamérica

El crecimiento de la población y de la mancha urbana en muchas ciudades latinoamericanas, asociado a una acelerada motorización, con un uso excesivo de los automóviles particulares, especialmente en horas pico, combinado con un transporte público ineficiente, de mala calidad, desarticulado, desorganizado y mezclado en el tráfico en la mayoría de las ciudades, está generando un problema de movilidad urbana insostenible. La solución al problema de transporte urbano, exige la implantación de políticas integrales que fomenten una movilidad urbana sustentable, que contemplen medidas para racionalizar el uso ineficiente del automóvil privado y ofrezcan como alternativa un transporte público rápido, eficiente, cómodo y accesible mediante un sistema integrado tronco-alimentador, basado en proyectos de infraestructura de transporte masivo en corredores troncales con una visión estratégica de largo plazo, como en los numerosos casos de éxito a nivel internacional (Rehovot, 2009).

Así, en muchas ciudades latinoamericanas se ha optado por sistemas de transporte públicos de tipo troncal, la mayoría de las veces haciendo uso de sistemas BRT o en su defecto Líneas Troncales con prioridad.

En la zona metropolitana del valle de México la ejecución de BRT's ha permitido que del 15% al 17% de sus usuarios hayan dejado su automóvil en casa y el esquema de Transporte Público Colectivo (TPC) ha logrado sustituir microbuses y vagonetas altamente contaminantes con una vida de más de 20 años en promedio por unidades nuevas y de tecnologías más limpias (Alvarado, 2018).

Sin duda, el caso de éxito más citado en la literatura, y que ha sido ejemplo para muchos otros, es la ciudad de Curitiba, en Brasil, por ser la primera en implementar el concepto de Bus Rapid Transit (BRT). La Red Integrada de Transporte (RIT) empezó a operar en 1974 con los primeros BRT y para 1980 ya contaba con 72 km en 5 vías segregadas (Lindau et al., 2010) a lo largo de cinco ejes principales. En este mismo tiempo el resto del transporte colectivo fue reorganizado para conectar las líneas BRT con rutas alimentadoras (Figueroa, 2005), y la regulación de usos del suelo se adaptó en base a la oferta de transporte, diseñándose los ejes de expansión urbana a partir del trazado de los corredores BRT (Lindau et al., 2010), fomentando desarrollos del suelo de alta densidad y usos mixtos.

Así, estos ejes estructurales han guiado el proceso de crecimiento urbano de Curitiba por décadas y convergen en el centro de la ciudad (Rodríguez y vergel, 2013). Así, las políticas de movilidad adoptadas por Curitiba han servido de modelo para otras ciudades latinoamericanas, en aspectos tales como la implementación de corredores para buses físicamente segregados, integración física y tarifaria entre las distintas modalidades de transporte colectivo, y establecimiento de categorías especializadas de servicios de transporte.

En la década de 1990 en Santiago, Chile, se inician esfuerzos por mejorar los sistemas de transporte urbano, sin embargo, las distintas acciones implementadas fueron insuficientes para revertir los problemas. No fue hasta el año 2002 que el Gobierno Central intervino con una reorganización de las rutas de transporte y la implementación del sistema TranSantiago, cuando realmente se comenzaron a experimentar mejores condiciones de movilidad en la ciudad (Díaz et al., 2004). La implementación de este sistema provocó la salida de antiguos transportistas, la incorporación de poco más de 6000 autobuses, nuevos recorridos, un aumento considerable en la cantidad de paraderos, la instalación de puestos de recarga de tarjetas electrónicas y la operación de servicios exprés desde la periferia al centro (Muñoz et al., 2014).

En la ciudad de Bogotá se apostó por invertir en infraestructura para el transporte masivo de pasajeros, reordenando las rutas que operaban. Los antecedentes de este reordenamiento se remontan a fines de la década de 1990, cuando se introdujo el sistema BRT TransMilenio. Dicho sistema se expandió rápidamente: hoy cuenta con 12 líneas que recorren 112 km, y es considerado como una de las redes BRT más completas del mundo (Pardo, 2009).

En un inicio el sistema no atendía toda la demanda de la ciudad, por lo que el resto del transporte público continuaba brindando un servicio deficiente. Además, operaba una flota sobredimensionada de autobuses y microbuses viejos, altos en emisiones contaminantes, que infringían las normas de tránsito y contribuían a una alta congestión vehicular, por lo que el gobierno presentó un Plan Maestro de Movilidad de Bogotá en el año 2006, con el cual eliminaría estas deficiencias e impulsaría la creación del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), el cual implicó reordenar y fusionar las rutas de transporte deficientes (Bonells & Durán, 2012)

Ahora los corredores segregados de la red TransMilenio son el componente troncal del SITP, en tanto que el servicio de buses convencionales se ha reordenado en rutas urbanas, complementarias y especiales (estas últimas para áreas periféricas o de baja demanda), que sirven como alimentadoras del TransMilenio y que serán operados por diversos consorcios de empresas (Aspilla & Rey, 2012). A lo largo de este proceso de cambio, se tuvieron que realizar varias adaptaciones, como ajustes en el diseño de rutas, tomando en cuenta itinerarios existentes, aumentando cobertura, y considerando una integración tarifaria y transbordo gratuito (Rodríguez & Sánchez, 2015). Así mismo se entregaron mayores subsidios a los concesionarios para financiar la renovación de la flota y el cambio de matriz energética, de modo que los buses no dependan de combustibles fósiles (Bonells & Durán, 2012).

Experiencias similares a Santiago se ha presentado en otras ciudades como Lima, Medellín o Sao Paulo. La diferencia significativa entre el caso de Curitiba y otros procesos de reorganización del transporte emprendidos en ciudades latinoamericanas radica en que, mientras que Curitiba planificó el desarrollo de sus servicios de transporte público antes de que se presentara un problema de movilidad no sustentable, otras urbes han debido reordenar servicios de transporte que habían evolucionado, en gran medida, sin intervención estatal (Figuroa, 2005). Esta diferencia condicionó las dinámicas de intervención y regulación pública, y aunque no cuentan con un sistema de movilidad urbana como el de Curitiba, el cual bien puede ser considerando como sustentable, el reordenamiento de sus sistemas de transporte público significó un cambio en sus procesos de planeación, pasando del enfoque en el transporte al desarrollo orientado a la movilidad, permitiendo así la atracción de usuarios y por lo tanto, fomentando la movilidad urbana sustentable en estas ciudades.

Es importante recalcar que, en los casos mencionados de Santiago y Bogotá, pasaron bastantes años desde que se iniciaron los esfuerzos por modificar las dinámicas de movilidad, hasta que realmente se vieron resultados positivos. Por otro lado, es importante hacer notar que, en estos cambios en los procesos de planeación, principalmente enfocados en el reordenamiento de sistemas de transporte público, las autoridades tuvieron que tomar medidas que pueden ser consideradas como “drásticas”, y seguramente en ese momento hubo actores en desacuerdo que se vieron afectados, por lo que se tuvieron que llevar a cabo procesos de negociación.

2.1.2.2 Implicaciones de la planeación de un sistema de transporte público

La planeación de un sistema de transporte público implica determinar un plan de recorridos, frecuencias, horarios, asignación de personal y flota, en lo posible óptimas. Las dos primeras etapas son ejecutadas por las entidades reguladoras del transporte, es decir, el Estado o ayuntamiento, mientras que las tres últimas son generalmente llevadas a cabo por los operadores de los servicios, es decir, las empresas que ofrecen el servicio de transporte (Ceder y Wilson, 1986).

La optimización de un sistema de TP plantea objetivos del tipo: maximizar la calidad del servicio (minimizar tiempos de viaje y espera) y maximizar el beneficio de las empresas transportistas. La solución global al problema depende de la solución de cada una de las etapas del proceso; es razonable pensar que las soluciones factibles de las tres últimas etapas del proceso están condicionadas por las soluciones obtenidas en las dos primeras (Ceder y Wilson,

1986), y en efecto, el diseño del trazado tiene una fuerte componente sobre el tiempo de recorrido, las frecuencias y la seguridad de poder llegar a tiempo al destino deseado.

Los problemas de la asignación de flota y personal han sido muy estudiados con resultados publicados (Wren & kwan 1999); se modelan como problemas clásicos de optimización combinatoria, programación lineal entera, y en muchos casos, se resuelven en forma exacta. Por otro lado, el problema del diseño y optimización de rutas y frecuencias es complejo (Ceder y Israeli, 1998), por lo que se han desarrollado distintos algoritmos con este fin, y a pesar de que cada uno tiene sus particularidades, todos tienen una similitud, y es que parten de una solución inicial (conjunto de rutas – en muchos casos la situación actual), que se mejora iterativamente (Baaj y Mahmassani, 1995).

En este sentido, el óptimo diseño en cada una de las etapas en la planeación de un sistema de transporte público se ha analizado tomando en cuenta distintas consideraciones. Desaulniers y Hickman (2007) presentan una investigación donde abordan métodos matemáticos para cada uno de los pasos de la planeación. Fan y Machemehl (2004) y Zhao y Gan (2003) presentaron revisiones sobre los principales problemas de diseño que presenta una red de tránsito, y Chua (1984) examina los enfoques limitados al diseño de red y la configuración de frecuencias del transporte público británico. Sobresale el trabajo de Guihaire y Hao (2008), quienes llevaron a cabo una revisión de literatura considerando las distintas etapas implicadas en la planeación del transporte público, por ello clasificaron, definieron, e identificaron seis elementos de análisis principales:

- Diseño
- Diseño y configuración de frecuencias
- Establecimiento de horarios
- Configuración de frecuencias
- Programación
- Diseño y programación

En este sentido clasificaron las investigaciones de acuerdo a tres problemas básicos de la red de tránsito: diseño (TNDP), en donde es necesario considerar el medio externo del sistema según lo expuesto por Manheim (1979) y Cárdenas (2015), configuración de frecuencias (TNFSP), y establecimiento de horarios (TNTP), donde es necesario tomar en cuenta el medio interno del sistema y las características de la población perteneciente al medio externo. Luego se puede mencionar dos problemas combinados: diseño y configuración de frecuencias ($TNDFSP = TNDP + TNFSP$) y programación ($TNSP = TSNFSP + TNTP$). Finalmente, todo el problema de diseño y programación (TNDSP) se define como la combinación de los tres problemas básicos.

A partir de lo anterior, y considerando que en los países en desarrollo existen particularidades que deben tomarse en cuenta, tal es el caso de la disponibilidad de información (Sánchez-Atondo et al., 2020), se presenta un concentrado de revisión de literatura similar al de Guihaire y Hao (2008), pero considerando únicamente cinco elementos de análisis y solamente

casos de estudio de ciudades de países en desarrollo. Así mismo, fue complementado con investigaciones recientes que no fueron consideradas en un inicio (Ver Tabla 01).

El primer elemento a analizar es el tipo de problema que se aborda en la investigación. Posteriormente se enumeran los objetivos y las restricciones que se obtuvieron durante su ejecución, ya que estos difieren según la meta del estudio y elección de los autores. Además, se hace mención de la aplicación de esta y por último a manera de resumen se menciona algún elemento específico de la investigación.

Cabe mencionar que la metodología empleada para resolver las diversas problemáticas planteadas por los autores, le corresponde específicamente a la zona de estudio en donde esta se llevó a cabo. Si bien muestra posibles soluciones para problemas similares, se tienen que tomar en cuenta las particularidades de la nueva zona de estudio.

Tabla 01. Clasificación de investigaciones sobre STP.

Autor	Año	Problema	Objetivos	Restricciones	Aplicaciones	Especificaciones
Carrese	2002	TNDFSP	Tiempo de espera de los usuarios, costos del operador	Satisfacción de la demanda, longitud de las rutas, número de transferencias y longitud total del viaje	-	Urbano
Bielli	2002	TNDFSP	Tiempo promedio de viaje, tamaño de la flota,	Solo posibles líneas predefinidas	Ej. Parma	Análisis multi criterios
Fusco	2002	TNDFSP	Costo total del sistema	Nivel de servicio, demanda satisfecha, líneas configuración, frecuencia	Teórico	Ciudades de tamaño medianas
Ceder	2003	TNDFSP	Costos para operadores y usuarios, tamaño de la flota	Longitud de ruta, desviación del camino más corto	-	-
Ngamchai	2003	TNDFSP	Tamaño de la flota y tiempo de espera	Servicio de cobertura	Punto de referencia	Operadores específicos del problema
Tom	2003	TNDFSP	Costos del operador, tiempo total de viaje de los pasajeros.	-	-	-
Borndorfer	2005	TNDFSP	Tiempo de viaje del pasajero, costos de operación	-	Ej. Potsdam	Modelo basado en la ruta
Conrado	2016	TNDP (Diseño)	Evaluar las rutas de transporte público y proponer mejoras, utilizando software Arcgis	Análisis de red ya establecida	Ciudad de Medellín	Uso urbano, mediante software Arcgis
Chakraborty	2002	TNDP	Tiempo en el vehículo, número de pasajeros directos	Red de carreteras	Punto de referencia	-
Murray	2003	TNDP	Número de paradas de autobús	Cobertura y accesos	Ej. Brisbane	Ubicación de paradas de autobús urbano
Zhao	2003	TNDP	Número de traslados, rutas directas, servicio.	Líneas históricas, número de rutas, rutas. directas	Software : OpNet	Urbano
Yu	2005	TNDP	Número de transferencias, flujo máximo de pasajeros	Longitud de línea, direccionamiento de ruta	-	Urbano
Barra	2007	TNDP	-	Demanda de pasajeros, Presupuesto, nivel de servicio	Punto de referencia	Solo para pequeñas demandas
Mauttone	2007	TNDP	Análisis para optimización multi objetivo de diseño y frecuencias	-Para rutas ya establecidas	Ciudad de Rivera, Uruguay	Aplicación de algoritmo basado en la meta heurística
Bachelet	2005	TNDFSP	Tiempo de espera de los usuarios, costos operativos	Longitud total de rutas	Teórico	Urbano
Chowdhury	2001	TNDFSP	Coordinación de transferencia (tiempo de espera), tamaño de flota	Tamaño total de la flota, capacidad	-	Inter modalidad
Gao	2003	TNDFSP	Disuasión, costo, rendimiento del sist.	Equilibrio	-	Programación de dos niveles

Ceder	2001	TNSP	Número de llegadas simultáneas	Límites de avance	-	Llegadas simultáneas
Eranki	2004	TNSP	Número de llegadas simultáneas	Tiempo de espera para pasajeros	Punto de referencia	Estudios de seguimiento
Chakroborty	1995	TNTP	Determinar tiempo total de espera de pasajeros	Tamaño de la flota, avance máximo	Ejemplos simple	Se analizan diversos casos
De Palma	2001	TNTP	Costo total de demora de horario de los pasajeros	Tiempo de transferencia, horarios de embarque deseados	Teórico	Línea de tránsito único
Castelli	2004	TNTP	Transferencia de pasajeros en espera	Número de recorridos por línea, red de tránsito		Principalmente dedicado a los viajeros
Fleurent	2004	TNTP	Sincronización de viajes, recorridos históricos	Pasajeros esperando	Software	-
Jansen	2005	TNTP	Tiempo de transferencia total	Rutas y frecuencias establecidas	Ej. Copenhague	Intermodal
Paredes, A.	2018	TNTP	Determinar nivel de satisfacción de los usuarios de TP	Aplicación de encuestas directas	Ej. CDMX, México	Enfoque de satisfacción agregada
Carbajal	2013	TNTP	Reducir tiempos de espera en usuarios	-	Ej. Lima, Perú	Empleando Rockwell 13.9

Fuente: Elaboración a partir de Guihaire & Hao. (2008).

Respecto a la Tabla 01 se puede concluir lo siguiente:

Diseño y configuración de frecuencias (TNDFSP)

Uno de los principales objetivos de las rutas de los STP, es brindar un servicio pronto y de confort para el usuario, por tanto, es necesario establecer horarios de salida-llegada que reduzcan el tiempo de espera. Además de beneficiar al usuario, el operador también resultará beneficiado, ya que el establecimiento de horarios adecuados, podrá reducir el tamaño de la flota y una mayor captación de usuarios por el mismo costo. Por su parte Bielli (2002), presenta algoritmos basados en indicadores de rendimiento, con la finalidad de eficientizar la red, acotar el tamaño de la flota y por último reducir los tiempos de traslados. Fusco (2002), propone una metodología en la cual busca el costo de ejecución mínimo del sistema, al optimizar las rutas que componen a este y entregarle las frecuencias indicadas. Similar al Ngamchai y Lovell (2003) donde proponen metodologías análogas, en cuanto al objetivo que buscan ambas técnicas. Por su parte Ceder (2003), establece una serie de pasos para el establecimiento de frecuencias y horarios de salida de acuerdo a las restricciones propias de la red, en donde contempla variaciones en el número de usuarios y pretende darle servicio a la red, con el número mínimo vueltas por parte de los operadores.

Diseño (TNDP)

Uno de los elementos más importantes de los sistemas de transporte público es la infraestructura y posiblemente el que menos cambia con las mejoras que este sufre. Por lo tanto, es necesario optimizar este elemento en función de los usuarios de la infraestructura y no de los vehículos que se desplazan por ellas, evaluando la gestión sobre la demanda en todo momento. Tal como lo sugieren Chakroborty y Dwivedi (2002) donde evalúan criterios del comportamiento de la demanda, tales como: tiempo en el vehículo, porcentaje de pasajeros en viajes directos y no directos, así como el porcentaje de demanda insatisfecha. Si los resultados no son los esperados, las rutas o fracciones de ellas sufren modificaciones hasta obtener los resultados que se esperan.

Conrado (2016) propone un método en el cual es posible integrar múltiples objetivos tales como usuarios potenciales, velocidades de operación, tiempo de recorrido, distancias, etc. Esta integración permite la comparación de rutas en función de la eficiencia de estas, así como la puesta en marcha de posibles modificaciones a la red. En el caso de Murray (2003) Se centra principalmente en paraderos y las posibles reubicaciones con la finalidad de minimizar la cantidad de paradas obligatorias del operador.

Diseño y programación (TNDSP)

El diseño y la programación de los sistemas de transporte público son de gran importancia para el operador, ya que estos dos elementos definen la operatividad y eficiencia de cada una de las rutas. Por parte del usuario define la accesibilidad, tiempos de traslado y el confort que estos requieren para el uso de este sistema. Bachelet (2005) desarrolla una metodología combinada para la creación de rutas con horarios establecidos en la cual fusiona un método matemático con el cual obtiene resultados casi inmejorables y por otro lado aplica la simulación para la evaluación rápida de estos resultados.

Configuración de frecuencias (TNFSP)

La determinación de frecuencias es de gran interés para los operadores y de gran impacto para los usuarios. Chowdhury y Chien (2001) propone un método para determinar las frecuencias en redes intermodales y optimizar dichos sistemas. Por su parte Gao (2003) propuso una metodología en la cual el objetivo principal es reducir los tiempos de espera y los costos que las modificaciones de las frecuencias pudieran provocar. Dicha metodología fue creada para ayudar a los tomadores de decisiones a ajustar la red de tránsito existente y optimizarla en diversos parámetros.

Programación (TNSP)

Con el fin de aumentar la eficiencia en el número de llegadas simultáneas a un mismo punto de transferencia entre autobuses de diferentes rutas y así contribuir al confort de los usuarios Ceder (2001) propone un algoritmo heurístico en donde resuelve dicha problemática. Similar a Eranki (2004) en donde propone un método que supone en cada punto de transferencia debe de existir un tiempo de espera máximo y uno mínimo para los usuarios. De este modo define los ciclos y reduce los tiempos de espera del usuario en función a estos parámetros.

Horarios (TNTP)

Chakroborty (1995) se centró en la determinación de horarios de salida con la finalidad de minimizar los tiempos de espera de los usuarios. Tomando en cuenta el tamaño de la flota, tiempos de parada y el de transferencia en los nodos. También enfocados en la reducción de tiempos de espera Castelli (2004) propone un modelo en donde este se centra principalmente en el número de ciclos de los autobuses. Estos no dependen de los límites de frecuencia máxima o mínima sino de la calidad del servicio. Dicha calidad se evalúa mediante la sumatoria de los tiempos de espera el usuario. Cabe

mencionar que este método no es recomendable cuando sea necesaria optimizar el sistema.

Como se mencionó con anterioridad, las metodologías propuestas por los autores son específicas, sin embargo, exhiben un panorama general donde se muestran las principales problemáticas que aquejan a los sistemas de transporte público de ciudades en países en desarrollo. En este sentido y de acuerdo con lo expuesto por el Banco de desarrollo de América Latina (CAF, 2018) se puede establecer que los desafíos más importantes de la planeación del transporte público en América Latina actualmente son:

- El aumento de la demanda de transporte y de las distancias prolongadas de los viajes (resultado del fuerte y descontrolado crecimiento de las ciudades).
- La tendencia creciente del transporte individual (facilitado por la motorización de los hogares)
- Las dificultades para el transporte público de cubrir de forma eficiente la demanda de movilidad. La integración del sistema de transporte masivo a diversos niveles (institucional, operacional, tarifario y físico) es un factor esencial para responder eficaz y eficientemente a las necesidades de movilidad y asegurar el desarrollo sostenible en las ciudades latinoamericanas.

Por otro lado, después de analizar lo expuesto se puede mencionar lo siguiente:

- Todas las investigaciones atienden un problema específico, el cual forma parte del proceso general expuesto por Cascetta (2009).
- La falta de información en países en desarrollo es un elemento a considerar, ya que generalmente impacta en un costo mayor para la realización de la investigación.
- La base de todas, independiente del problema, y del contexto, donde se lleve a cabo la investigación es la simulación.
- Cuando existe acceso a la información deficiente o nula, como es el caso de los países en desarrollo, primero se debe llevar a cabo la simulación de las rutas, y para esto, es necesario proponer frecuencias base para cada una de ellas.

2.1.2.3 Medio externo e interno del transporte público

En el análisis y planeación de un sistema de transporte público, es necesario reconocer la existencia de tres grupos de participantes, cada uno con requerimientos particulares y que en ocasiones se contraponen: usuarios, prestatarios y comunidad (Molinero y Sánchez, 1997). Los requerimientos generales de cada uno de los grupos se muestran en la Tabla 02, donde se exhibe la necesidad de los usuarios a contar con niveles de servicio aceptables y traslados eficientes. Por parte de los prestadores de servicio, se menciona que requieren principalmente de la atracción de usuarios mediante diversas estrategias, de tal manera que les permita aumentar sus márgenes de utilidad. Finalmente, la comunidad demanda, además de servicios de buena calidad, que los impactos de los sistemas de transporte sean los mínimos posibles;

eficientes en términos energéticos y económicos, respetuosos con el medio ambiente y la sociedad.

Tabla 02. Exigencias de los grupos relacionados al TP.

Usuario (consumidor)	Prestatario (proveedor)	Comunidad (evaluador)
Disponibilidad Puntualidad Tiempo de recorrido Comodidad Conveniencia Seguridad Costo al usuario	Cobertura del sistema Confiabilidad Velocidad Capacidad Flexibilidad Seguridad Costos Atracción de usuarios Efectos complementarios	Calidad del servicio Costos del sistema Objetivos sociales Impactos al medio ambiente Consumo de energía Impactos a largo plazo

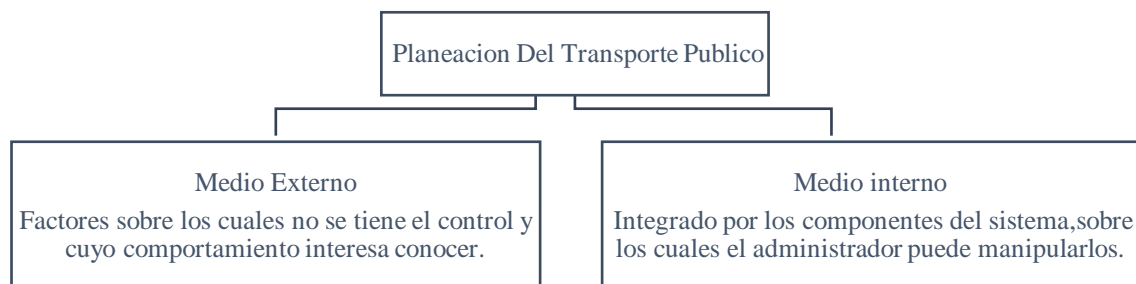
Fuente: Molinero & Sánchez (1997).

Si bien es necesario cotejar información detallada de este tipo durante la planeación del transporte público, analizando lo anterior se expone la complejidad que existe entre las relaciones de cada uno de los tres grupos participantes. Por este motivo es que muchas de las decisiones que se han tomado sin considerar las interacciones antes descritas, han tenido repercusiones negativas en el sistema, provocando diferencias entre estos grupos y esto a su vez provoquen deficiencias en el sistema de transporte público.

Aunado a esto, y como se mencionó anteriormente, es importante recalcar que la demanda de transporte en cualquiera de sus modos, es derivada, es decir, no existe por el simple deseo de transportarse, y más bien, se hace uso del sistema para realizar diversas actividades como trabajar, estudiar, atención de la salud, realizar compras, etcétera (Henry, 1998). Por lo tanto, las características de la demanda están definidas en función de diversos componentes sociales y económicos del territorio donde el sistema se encuentra, y así mismo, el propio sistema puede incidir en estos componentes. Es pertinente entonces establecer, que en lo que respecta a los sistemas de transporte público, existe un medio interno y un medio externo, y ambos deben analizarse adecuadamente para poder tomar decisiones adecuadas que ayuden a que el sistema sea más eficiente y, por lo tanto, aporte a la MUS.

De acuerdo con Simon (2006) y Sussman (2000) exponen que un sistema de transporte público está definido por las condiciones de su medio externo y las características de su medio interno. El medio interno está constituido por los componentes del sistema y debe satisfacer a los requerimientos que el planificador les plantee, siempre encaminado a resolver problemas actuales o evitar complicaciones futuras en el sistema. Por otro lado, el conjunto de factores que constituyen su medio externo son todos aquellos ajenos al planificador y que tienen que contemplarse a la hora de plantear cambios al sistema. Se propone entonces que el modelo de planeación de un sistema de transporte se divida en dos apartados; El medio externo relevante al sistema de transporte y el medio interno integrado por sus componentes y sus interrelaciones, (Ver figura 01).

Figura 01. Modelo General De Planeación Del Transporte Público



Fuente: Elaboración a partir de Manheim (1979) y Cárdenas, E (2015.)

Los factores del medio externo que se consideran relevantes serán aquellos que influyan en las características de los componentes del sistema de transporte. Un criterio para su identificación y posterior análisis es a partir del objetivo del sistema de transporte. Cárdenas, E. (2015). Partiendo de la premisa que el objetivo principal de los sistemas de transporte es trasladar personas y bienes de un punto a otro mediante de un modo y un medio surge la necesidad de analizar la infraestructura a utilizar, sin dejar de lado los elementos que dictaran la demanda de servicio tales como las actividades económicas de la zona de estudio.

Tabla 03. Medio externo del TP

Medio Externo	Zona de estudio	Existen dos niveles de identificación; La Macro localización que es la ubicación de la zona de estudio en una región de mayores dimensiones que la contiene. Y la Micro localización que se refiere al interior de la zona en cuanto a unidades político administrativas que la integran.	Actividades Económicas	Requerimientos Del Sistema
	Medio físico	Refiere a la identificación de las condiciones climáticas, recursos naturales, condiciones atmosféricas, suelo, flora y fauna, además de actividades primarias.		
	Características de la población	Es necesario atender a variables como su tamaño y distribución, tasas de crecimiento, estructura etaria y por género, esquema de valores, grado de escolaridad, niveles de ingreso, ocupaciones principales.		
		Las Actividades Socioeconómicas de la zona son el resultado, entre otros factores, de la relación entre las condiciones físicas, los usos del suelo y las características de la población.	Los requerimientos de transporte debidos al tamaño y distribución de la población, las características del uso del suelo y el conjunto de actividades socioeconómicas, se expresarán en términos de capacidad, costo, accesibilidad, oportunidad, seguridad, certeza, rapidez, entre otros atributos.	

Fuente: Elaboración a partir de Manheim (1979) y Cárdenas, E (2015).

En la Tabla No. 03 se exhiben los factores que componen el medio externo. Si analizamos de izquierda a derecha observaremos que se clasificaron en tres elementos iniciales, y dichos elementos al entrelazarlos generan actividades socio económicas de la zona de estudio, que estos a si vez resultan en requerimientos del sistema, indispensables para tomarse en cuenta en actividades de planeación u optimización del mismo.

El medio interno o componentes del sistema de transporte se integra básicamente por tres elementos que interactúan entre sí y que son: La Infraestructura, el parque vehicular y el

servicio, todos ellos mediados por el marco normativo y la administración pública encargada de su planeación, supervisión y control. Cárdenas, E. (2015). A continuación, se presenta la Tabla 04 donde se exhiben la relación entre los factores que componen el medio interno del sistema de transporte para determinar las condiciones de servicio.

Tabla 04. Medio interno del TP

Medio Interno	Marco Regulatorio	Los sistemas de transporte operan en la mayor parte del mundo bajo criterios y normas establecidos por los gobiernos municipales, estatales y nacionales. Por tal motivo deberán atender las exigencias plasmadas en las mismas.	Parque Vehicular	El tipo de vehículos de que se dispone para atender los servicios de transporte se caracterizará por aspectos como su capacidad, dimensiones, costos de operación. Y se evaluarán en términos de confort, eficiencia y sustentabilidad	Condiciones Del Sistema de Transporte	Las condiciones de cada uno de los componentes, y de las interacciones entre ellos, determinarán las condiciones del servicio de transporte y el nivel en que satisface los requerimientos externos y cumple con los atributos deseables.
			Servicio	De acuerdo a las características de la demanda, marco regulatorio y de la infraestructura, habrá diferentes respuestas en la organización del servicio. Las cuáles serán definidas en función de estas y a través del operador.		
			Infraestructura	Para las Vialidades urbanas y carreteras además de las terminales se deben identificar las condiciones que las pueden hacer más o menos apropiadas a las necesidades de los usuarios y a los atributos deseables del sistema		

Fuente: Elaboración a partir de Manheim (1979) y Cárdenas, E (2015).

Si analizamos de izquierda a derecha observamos que el marco regulatorio es aplicable para cada uno de los tres elementos contiguos, estos son generalmente dictados por las autoridades municipales de transporte, por ello juegan un papel muy importante en la planeación del transporte, ya que pueden orillar a los operadores a generar competencia sana, brindando mejores servicios a los usuarios. Estos a su vez determinan las condiciones del

sistema donde se presta el servicio, pieza clave para un servicio de calidad y de acuerdo a las necesidades de la población.

2.2 Modelación de sistemas de transporte

2.2.1 Complejidad en el análisis de los sistemas de transporte

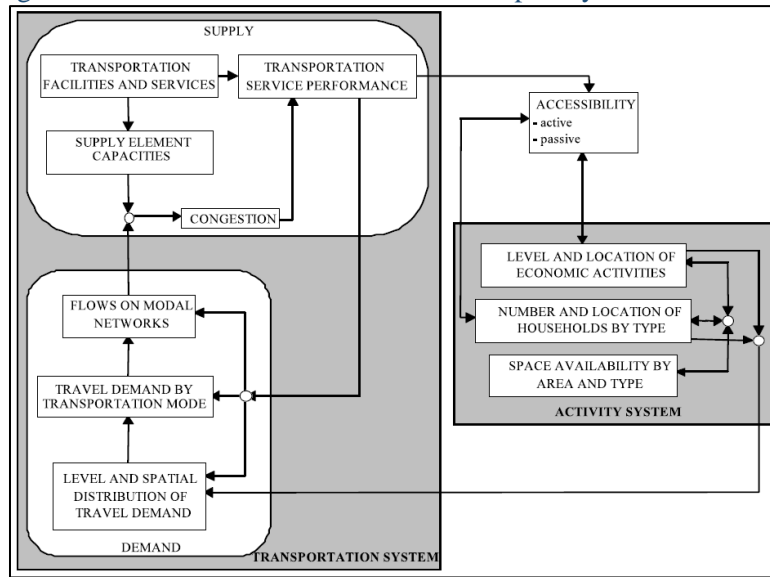
De acuerdo a los componentes del medio interno y externo mostrados en el apartado anterior, para poder llevar a cabo el análisis eficiente de un sistema de transporte, es necesario entender las posibles relaciones que existen entre estos componentes, ya que estos influyen de manera recíproca entre sí (Simon, 2006 & Sussman, 2000). Por otro lado, para analizar el sistema de transporte de una zona determinada, además de caracterizar su oferta y demanda, es necesario considerar que estas interactúan intensamente con el sistema de actividades de la misma. Este último representa el conjunto de comportamientos y relaciones individuales, sociales y económicas en el territorio, ya que el fenómeno del transporte tiene lugar en el espacio, generalmente el área de estudio se divide en unidades geográficas llamadas zonas, que permiten caracterizar el sistema de actividades.

Es evidente que la cantidad de variables que componen este sistema de actividades son muy numerosas y más lo son sus interacciones. En este sentido, Cascetta. (2009) en “Transportation Systems Analysis” indica que el sistema de actividades se puede caracterizar en tres subsistemas:

- Los hogares en cada zona, categorizados por su nivel de ingreso, tamaño, posesión de automóvil, etcétera.
- Las actividades económicas localizadas en cada zona, considerando tipo, cantidad de empleados, etcétera.
- El uso de suelo, de acuerdo al espacio techado destinado en cada zona para diferentes usos como industrial, comercial, educación, salud, etcétera.

En su misma obra, Cascetta. (2009) en “Transportation systems analysis” menciona la relación entre el sistema de transporte y el sistema de actividades, así como las características generales de cada uno que deben de ser consideradas en el análisis de sistemas de transporte, como se muestra en la Figura 02.

Figura 02. Relación entre el sistema de transporte y el sistema de actividades



Fuente: Cascetta (2009), "Transportation Systems Analysis"

Además, la propia oferta y demanda de transporte tienen particularidades que hacen que el fenómeno del transporte sea altamente complejo.

2.2.1.1 La demanda de transporte

La demanda de transporte es una demanda derivada, es decir, es un elemento utilizado para satisfacer las necesidades de la población y de este modo las personas realicen alguna actividad en un destino específico, entre las actividades más comunes están los desplazamientos con fines de trabajo, educación, salud, consumo, entre otros, (Jiménez et al 2014).

Así mismo, la demanda de transporte es altamente cualitativa y diferenciada; existe una diversidad de demandas que se diferencian por hora, día, motivo de viajes, etcétera. Un servicio de transporte sin los atributos que permitan satisfacer esta demanda diferenciada puede ser totalmente inútil. Otra característica de la demanda, es que esta tiene lugar en el espacio, por lo que se debe de dividir el área de estudio en zonas y codificarlas. La articulación espacial de la demanda frecuentemente provoca problemas de falta de coordinación del sistema, la cual puede influir de forma relevante en el nivel de servicio que brinda la oferta. Finalmente, la demanda es dinámica, ya que una buena parte de esta se concentra en unas pocas horas del día y en zonas específicas, donde se presentan congestionamientos en horarios pico. Puede ser que un sistema funcione adecuadamente bajo demanda promedio, pero colapse durante horarios punta.

Así, un análisis integral de la demanda de transporte debe considerar que las personas toman decisiones de movilidad a largo plazo (tener una licencia de conducir, tener un automóvil, etc.) y a corto plazo (viajar o no viajar, tiempo, destino, modo, ruta, etc.), y utilizan

la red y servicios de transporte para realizar diferentes actividades (trabajo, estudio, compras, etc.) en diferentes ubicaciones.

Estas elecciones resultan en flujos de demanda de viajes, es decir, los viajes que realizan las personas entre las diferentes zonas de la ciudad, para diferentes propósitos, en diferentes períodos del día, mediante los diferentes modos de transporte disponibles. De manera similar, las actividades económicas requieren del traslado de bienes y mercancías, del lugar de donde son producidas a donde serán consumidas.

2.2.1.2 La oferta de transporte

La oferta de transporte se compone de la infraestructura física (caminos, estacionamientos, vías férreas, etc.), las unidades móviles (vehículos, autobuses, taxis, trenes, etc.), los servicios (rutas de transporte, itinerarios, etc.), las regulaciones (velocidades de circulación, restricciones de estacionamiento, señalamientos en intersecciones, etc.) y costos (precio de boleto, peajes, costo de estacionamiento, etc.) que combinados, posibilitan el movimiento de personas y mercancías, (Bull, 2003). Así, una característica distintiva de la oferta de transporte es que es un servicio y no un bien o mercancía; por lo tanto, no se puede almacenar para ser utilizada cuando exista una demanda mayor. Un servicio de transporte tiene que ser consumido cuándo y dónde se produce, si no, pierde su beneficio (Ortúzar, J. & Willumsen, L., 2011). Por esta razón es muy importante estimar la demanda con la mayor precisión posible para así ahorrar recursos ajustando la oferta de servicios de transporte a ella.

Por otro lado, frecuentemente se da el caso de que la infraestructura y/o los vehículos de transporte no son propiedad ni son operados por la misma empresa o grupo de empresas. La separación entre el gestor de infraestructura y el gestor del servicio final de transporte genera una serie de interacciones suficientemente complejas entre entidades o Administraciones Públicas (estatales, regionales y/o locales), empresas de construcción, empresarios, operadores de transporte, viajeros, transportistas y público en general (Sánchez-Atondo *et al.*, 2020).

Otro aspecto importante es que la infraestructura de transporte es “unitaria”, es decir, no se puede concebir media carretera, una tercera parte de un aeropuerto, etcétera. En ocasiones es posible proveer gradualmente una infraestructura para ajustarla a una creciente demanda, por ejemplo, iniciar con un pequeño camino, posteriormente aumentar su capacidad ampliándola a una vialidad de dos carriles y con el paso del tiempo, terminar con una autopista de altas especificaciones. De esta forma se pueden evitar inversiones tempranas en instalaciones costosas e innecesarias, sin embargo, a diferencia de la producción de bienes y mercancías, este proceso de ajuste no se puede estar llevando a cabo de manera constante a medida que varía la demanda, ya que, por lo general, requiere de inversiones considerables y extensos periodos de tiempo. Esto es crítico en áreas urbanas, ya que cualquier construcción o reparación provoca perturbaciones que tiene repercusiones negativas en la movilidad de un gran parte de las personas (Ortúzar, J. & Willumsen, L., 2011).

Una de las características más importantes de la oferta de transporte es que puede presentar congestión. Este fenómeno puede afectar significativamente el nivel de servicio percibido por los usuarios, por ejemplo, el tiempo de viaje, el retraso del servicio y el consumo

de combustible aumentan con el nivel de congestión. La congestión surge cuando la intensidad de la demanda se aproxima a la capacidad de la instalación (calle, carretera, estación, etc.) (Cal y Mayor & Cárdenas, 2008). En este sentido, la inclusión de un vehículo adicional al sistema genera un retraso extra a todos los demás usuarios que ya lo están utilizando, y a medida que el flujo se acerca a la capacidad, el impacto negativo que origina cada vehículo adicional es cada vez mayor. Este efecto externo, motivado por el fenómeno de la congestión, generalmente es percibido por los demás usuarios, pero no por el conductor que lo origina. Éste es el coste que se intenta internalizar mediante sistemas como la tarificación vial electrónica, con el objetivo de ayudar en la toma de decisiones individuales más razonadas.

Finalmente, al igual que la demanda, la oferta también es dinámica, aunque no tan variable. Algunos ejemplos son diferentes frecuencias de los servicios de transporte público en horarios valle y horarios punta, variación de la programación semafórica en diferentes periodos del día, o restricción de estacionamiento o de carga y descarga de mercancías en periodos pico.

2.2.1.3 La interacción entre la oferta y la demanda

Las interacciones entre la demanda y la oferta, resultan en los indicadores que finalmente se ven reflejados por la operación de un sistema de transporte, tales como flujos vehiculares en diversas vialidades, niveles de congestión, contaminación, tiempos de viaje, usuarios por ruta, por mencionar algunos. Es importante establecer que no se trata de una relación unidireccional en donde al combinar el volumen de demanda con la capacidad de la oferta se obtienen los indicadores antes mencionados, más bien, las elecciones de viaje son influenciadas por las características y el servicio que ofrecen los diversos modos de transporte disponibles. Estas características se conocen como nivel de servicio o atributos de desempeño, e incluyen tiempos de viaje, costos, confiabilidad del servicio, comodidad, etcétera.

De acuerdo a lo anterior, existen distintas interacciones o retroalimentaciones entre la oferta y la demanda, hasta llegar a un punto de equilibrio entre estas, que da lugar al funcionamiento del sistema. Se pueden identificar varios ciclos de interacciones en un sistema de transporte urbano, el más interno, que involucra el menor número de elementos y que generalmente muestra el menor tiempo de reacción a las perturbaciones (equilibrio a corto plazo), es la interacción entre los flujos en la red de transporte, el desempeño de la misma por congestión y los costos de viaje originados por esta. Es decir, los viajes realizados en un modo (por ejemplo, automóvil) eligen entre los caminos disponibles y utilizan partes de la red de transporte (por ejemplo, tramos de vialidades); la utilización de estas genera congestión afectando el nivel de servicio en las diferentes vialidades y a su vez, influyen en la elección de ruta del usuario. Esta interacción o retroalimentación continua hasta llegar a un punto en donde ningún usuario del sistema se verá beneficiado por cambiar de ruta, esto se conoce como equilibrio del sistema de transporte (Krylatov et al., 2020).

También hay ciclos de retroalimentación más externos que influyen en diversas elecciones de movilidad e involucran cambios que ocurren durante períodos de tiempo más largos (equilibrio a mediano plazo). Estos ciclos afectan la distribución de viajes en los distintos modos de transporte disponibles, así como la distribución de estos viajes entre los posibles destinos. Por ejemplo, la elección del lugar de consumo puede verse influenciada por

el tiempo y costos de viaje necesarios para llegar al destino; así mismo, la elección del modo para llegar al sitio de trabajo puede depender del tiempo, el costo y la confiabilidad de los otros modos disponibles (Cortés et al., 2013).

Por último, existen ciclos que abarcan períodos de tiempo aún más largos, en los que las interacciones entre las opciones de ubicación de la actividad y la demanda de viajes son importantes. Nuevamente, a través de la congestión, la demanda de viajes influye en la accesibilidad de las diferentes áreas de la ciudad y, por lo tanto, en las opciones de ubicación de los hogares y las empresas (Wang et al., 2011).

Todo lo anterior, muestra la complejidad que existe al analizar un sistema de transporte. Por esta razón, muchas de las decisiones se han tomado si considerar un enfoque sistémico que permita tomar en cuenta todas las interacciones antes descritas, y más bien han estado orientadas a construir más infraestructura para atender la creciente demanda, sin embargo, el espacio es limitado y esta visión no aporta hacia la sustentabilidad. Así, las tendencias actuales en la planeación del transporte van dirigidas hacia la gestión de la demanda en entornos de movilidad sostenible, es decir, en lugar de crecer en infraestructuras, proceder a una mejor optimización de los recursos existentes gestionando adecuadamente la demanda en modos y formas diferentes a los utilizados en las últimas décadas.

2.2.2 Toma de decisiones y el uso de modelos

El adecuado diseño y evaluación de proyectos de transporte requiere de la cuantificación de las interacciones entre los distintos elementos del sistema existente, así como en el proyectado. Si bien los valores de algunos elementos del sistema existente pueden obtenerse a partir de mediciones directas, los sistemas de transporte propuestos no se pueden medir.

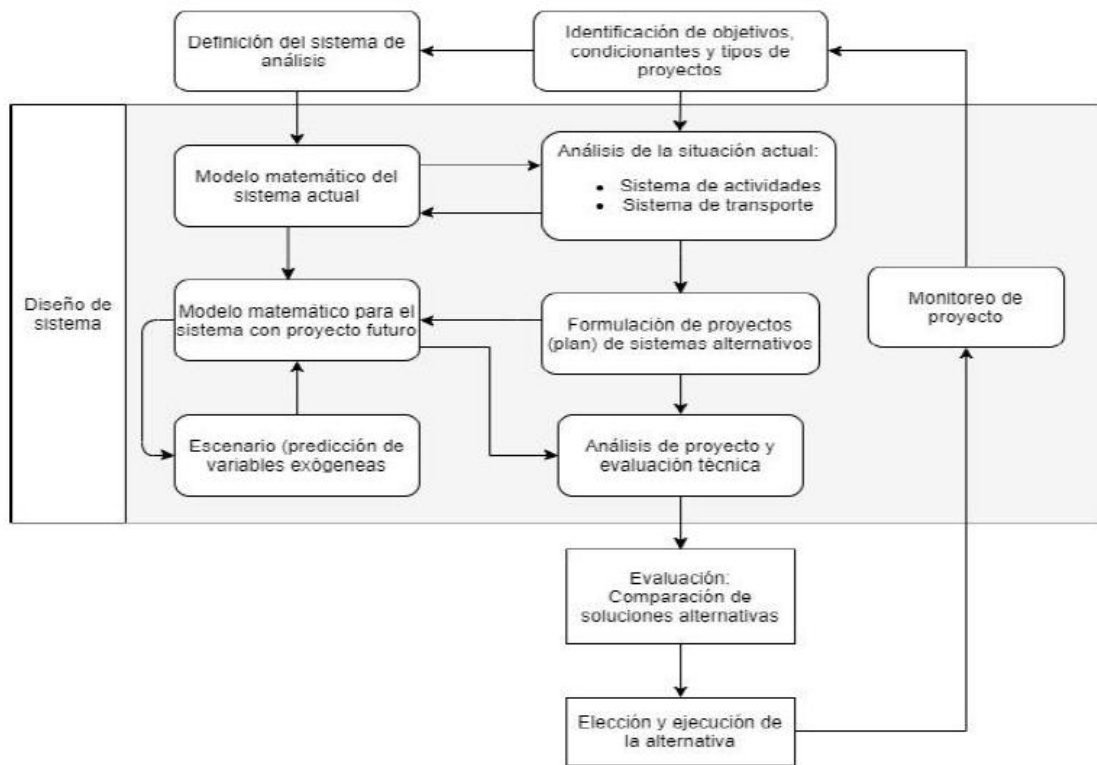
Una alternativa es aislar o seleccionar los elementos más relevantes al problema y a partir de ahí, agrupar estos y sus relaciones dentro del sistema de análisis. Esto es, la construcción de un modelo del sistema de interés. En este sentido, el modelado juega un papel central en el diseño y evaluación de sistemas de transporte. Un modelo es una representación simplificada de una parte de la realidad, por lo que incluye solo ciertos elementos del sistema analizado, que se consideran importantes desde un punto de vista. Aunque son representaciones simplificadas, suelen ser complejos debido a la cantidad de interacciones entre las variables que deben considerarse y la cantidad de datos requeridos (Ben-Akiva et al., 2007).

Los modelos de transporte se utilizan comúnmente para predecir el comportamiento de viajes y condiciones que resultarán de la interacción entre la demanda de viajes de una zona de estudio y la operación del sistema de transporte u oferta. De manera general, las decisiones de los viajes, ya que dependen de las características de las diferentes alternativas de transporte, conforman un modelo de demanda, mientras que las características del sistema de transporte en términos de costo, frecuencia, capacidad, entre otros, conforman un modelo de oferta. Así, un modelo de transporte representa la oferta y la demanda, e incorpora un mecanismo para

determinar los resultados de la interacción entre ambas. Estos modelos determinan de manera simultánea el desempeño de la red de transporte y la respuesta de los usuarios, permitiendo a los planeadores del transporte analizar posibles intervenciones que modifiquen los volúmenes de flujo en el sistema de transporte y las condiciones de servicio (Ben-Akiva et al., 2007).

Es importante establecer que la modelación del transporte no es la planeación del transporte sino una herramienta para la toma de decisiones en dicha actividad, a pesar de que en determinadas ocasiones puede adquirir un papel preponderante, aunque no definitivo. Como explica Cascetta (2009), con el paso de los años, el reconocimiento de las distintas relaciones que existen en la operación de un sistema de transporte y la complejidad de las mismas, dio lugar a cambios en el propio proceso de planeación. Este proceso de planeación da como resultado una secuencia de decisiones (planes o proyectos) tomadas en momentos diferentes, no necesariamente predefinidos, con cada decisión tomando en cuenta los efectos de decisiones anteriores y factores exógenos. En este marco, las técnicas de modelación de transporte para la definición y evaluación de proyectos alternativos son aún más relevantes, ya que aseguran una especie de "racionalidad dinámica" para todo el proceso. Esto se puede explicar en la Figura 02, en donde se presenta el proceso de diseño y planeación ideal de un sistema de transporte.

Figura 02. Proceso de diseño y planeación de un sistema de un sistema de transporte.



Fuente: Cascetta (2009), "Transportation Systems Analysis".

En la franja central de la Figura 02 se muestran las etapas del proceso de toma de decisiones, mientras que en el extremo izquierdo se muestran las fases de análisis y modelación que sirven de apoyo a estas. En la identificación de objetivos y condicionantes se toman en cuenta las perspectivas de quienes toman las decisiones. Posteriormente, dependiendo de los

objetivos y alcances establecidos, se delimita en sistema de análisis y el nivel de detalle que será necesario.

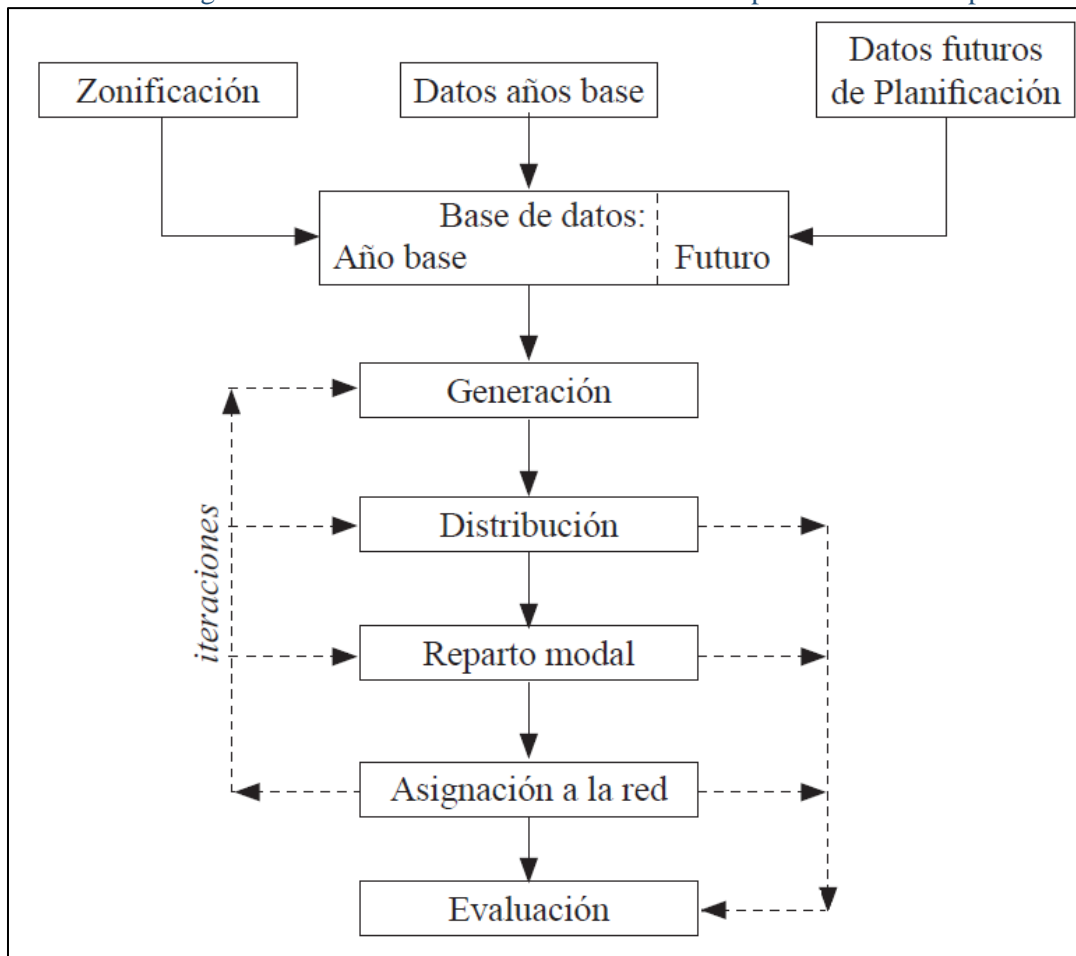
Por otro lado, la etapa de análisis de la situación actual incluye el estado presente tanto del sistema de actividades como el del sistema de transporte y su relación. En ese sentido, se recopila información relativa a ambos sistemas y se analiza para identificar las principales deficiencias o puntos críticos respecto a los objetivos y condicionantes previamente establecidos. Los resultados de esta etapa, sirven para formular los proyectos/alternativas de solución y al mismo tiempo son los datos de entrada para la construcción del modelo matemático del sistema actual.

Después de generadas las alternativas, estas son incorporadas al modelo matemático de la situación actual, el cual está interrelacionado con el modelo de escenarios futuros de variables exógenas. Al trabajar juntos ambos modelos es posible hacer un análisis de los proyectos y su evaluación técnica. Por último, se comparan las distintas alternativas planteadas y se toma la decisión de ejecutar el o los proyectos que mejor resuelvan los puntos críticos y aporten para lograr los objetivos planteados.

2.2.3 Estructura del modelo tradicional de transporte

Años de experimentación y desarrollo han dado como resultado la definición de una estructura general denominada modelo clásico de transporte de cuatro etapas (Ortúzar, J. & Willumsen, L., 2011). Esta estructura ha permanecido relativamente inalterada a pesar de las importantes mejoras experimentadas en las técnicas de modelación durante los últimos años y más bien, se han optimizado las técnicas particulares en cada etapa. Así, las cuatro etapas del modelo clásico conforman una secuencia de sub-modelos: generación de viajes, distribución, reparto modal y asignación. La estructura general puede verse en la Figura 03.

Figura 03. Estructura del modelo clásico de transporte de cuatro etapas.



Fuente: Ortúzar & Willumsen (2008), "Modelos de Transporte".

El enfoque comienza con la zonificación y con la recopilación y codificación de datos. Estos datos deben incluir información sobre la población de diferentes tipos en cada zona del estudio, así como niveles de actividad económica, incluyendo empleo, espacio dedicado a la actividad comercial, instalaciones de educación y recreativas, etcétera. A continuación, estos datos se utilizan como variables independientes de la función de demanda, para estimar modelos que reproduzcan el número total de viajes atraídos y producidos por cada zona del área de estudio (generación de viajes) (Vasconcello, 2010).

El paso siguiente es asignar estos viajes a diferentes destinos, en otras palabras, su distribución en el espacio, resultando una matriz origen-destino (O-D) para el periodo de tiempo analizado. Posteriormente se modela la elección del modo de transporte, y esto tiene como resultado el reparto o partición modal, es decir, el total de viajes entre un par O-D se reparte entre los distintos modos de transporte disponibles (Ortúzar, J. & Willumsen, L., 2011).

Finalmente, la última etapa del modelo clásico consiste en la asignación de los viajes en cada modo a su red correspondiente. A partir de este momento, se presentan una serie de iteraciones, ya que los resultados de la primera asignación provocarán niveles de congestión en algunos elementos de la oferta, y esto pueden alterar la propia elección de ruta de los usuarios, así como la del modo de transporte, e incluso la decisión sobre el destino en el caso de los viajes por consumo o recreación. El proceso iterativo continúa hasta que se logra el equilibrio, es decir, ningún usuario se verá beneficiado por modificar una de sus decisiones de viaje (Wardrop, J. G., 1952).

Es importante mencionar que el desarrollo de cada uno de estos 4 sub-modelos implica un proceso de estimación y calibración, así mismo, debe considerarse la validación de sus resultados. Por un lado, la estimación es la especificación de la forma funcional del modelo, es decir, la definición de las variables que serán incluidas. Una vez estimado, se debe llevar a cabo la calibración, este proceso consiste en ajustar el modelo considerando medidas de bondad de ajuste en función de los datos observados, es decir, definir los coeficientes para las variables o parámetros considerados, los cuales hagan que los datos observados sean más probables de obtener con el modelo generado. Por otro lado, la validación consiste en verificar la capacidad del modelo para entregar información válida, para esto se requiere comparar los resultados de la aplicación del modelo con información que no haya sido utilizada durante el proceso de estimación.

Cuando el modelo se ha calibrado y validado, puede ser aplicado a diferentes horizontes de planeación. Para esto es necesario plantear escenarios y planes que describan las características relevantes del sistema de transporte (proyectos o alternativas propuestas) y variables de planeación en el futuro (población, tasa de motorización, empleos, etc.). Una vez definidos un conjunto de escenarios y planes realistas, se aplica nuevamente la secuencia del modelo de 4 pasos para proyectar el desempeño de las alternativas o proyectos considerados.

En este sentido, a continuación, se describen las generalidades del modelo de oferta y los principales sustentos teóricos de cada una de las cuatro etapas o sub-modelos del modelo general de transporte.

2.2.3.1 Modelación de la oferta de transporte

La oferta suele ser modelada como un “grafo”, el cual en su forma más básica está compuesto por un sistema de “nodos” y “arcos” (Larzo & Odoni, 1981). Los nodos representan intersecciones y los arcos tramos de vialidades homogéneas entre estas intersecciones.

Todos los elementos del modelo de oferta deben especificarse a partir de sus atributos. Los arcos se caracterizan a partir de su longitud, velocidad, número de carriles, sentidos de circulación, sistemas de transportes permitidos y tiempo a flujo libre, este último a partir de una división entre la longitud y la velocidad permitida. Por otro lado, los nodos se especifican considerando el tipo de control (PTV Visum, 2017).

Al unir arcos con nodos se generan “giros”, los cuales representan los posibles movimientos que se pueden dar en la intersección. Así, en una intersección simple de dos vialidades de dos sentidos de circulación se generan 16 “giros” (4 para cada aproximación), los cuales deben de caracterizarse considerando su tiempo a flujo libre, es decir, el tiempo necesario para realizar el movimiento cuando no hay congestión. Este atributo puede ser irrelevante en intersecciones sin mecanismos de control, pero debe estimarse con precisión en intersecciones con semaforizadas (PTV Visum, 2017).

Aunado a lo anterior, los “giros” como “arcos” deben de caracterizarse en función de su capacidad, generalmente en vehículos por hora. Esto es sin duda lo que más demanda recursos

en la construcción de un modelo de oferta y es también la más importante, ya que esta capacidad es indispensable para desarrollar los modelos de asignación de tráfico (TRB, 2010).

Las capacidades de los “arcos” y “giros”, así como el tiempo a flujo libre de los últimos, suelen definirse a partir de las especificaciones del Highway Capacity Manual (HCM) publicado por el Transportation Research Board (TRB, 2010). En este documento se establecen los criterios y fórmulas para definir las capacidades de vialidades e intersecciones en distintos entornos urbanos a partir de las propias características de la infraestructura como cantidad de carriles, presencia del transporte público, velocidad permitida, semáforos y su tiempo de ciclo, carriles para dar vuelta, etcétera.

Cuando el modelo de oferta debe incluir sistemas de transporte público, además de lo anterior, se deben especificar los nodos que funcionan también como paraderos o puntos de acceso a este modo de transporte y el conjunto de arcos que conforma cada una de las rutas del sistema. Aunado a esto, a cada ruta se le asigna un tiempo de operación una frecuencia, y unidades de transporte público con una capacidad definida.

2.2.3.2 Modelación de la demanda de transporte

Los modelos de demanda de transporte tienen la función de expresar la cantidad de viajes demandados durante un determinado periodo, contemplando un conjunto de variables explicativas. En este sentido, el precio de los servicios ofrecidos y el ingreso del consumidor son determinantes para que un usuario elija moverse en cierto modo (Rivera et al. 2002). Este escenario hace que la modelación de la demanda sea fundamental en el análisis y diseño de sistemas de transporte público, ya que para el análisis de estos sistemas se debe contemplar una variedad de factores, con el fin de comprender como fue diseñado y las principales necesidades de movilidad que este busca satisfacer, tomando en cuenta la calidad, tarifas, tiempo de espera, rutas y capacidad (Zaragoza & Islas 2007).

Los modelos convencionales son agregados, en el sentido que predicen directamente la cantidad total de viajes por clase de usuario de una zona a otra. Así mismo, la predicción de los flujos origen-destino, se lleva a cabo por una serie de sub-modelos sucesivos que cuenta con las características socioeconómicas de las zonas de origen y destino, y por el tiempo o costo requerido para viajar entre ellos, aplicando relaciones analíticas basadas en ecuaciones matemáticas (Ben-Akiva et al. 2007).

Por otro lado, para el análisis de la demanda de transporte asume que la demanda del mercado será el agregado de todas las demandas de los consumidores, y ésta será a su vez determinada por los mismos factores que afectan las demandas individuales. Sin embargo, los factores que determinan la demanda de transporte, pueden ser de mayor o menor intensidad en algunas regiones, incluso en ciertos momentos más que en otros, o dependiendo de los motivos de viaje (Rivera et al. 2002). En ese sentido, la movilidad de los usuarios parte de las necesidades que estos presenten, ya sean por motivos laborales, académicos, recreativos, entre otros. Sin embargo, dado que son diferentes factores los que se presentan, se genera una oferta y demanda por la movilidad de estos, la cual varía dependiendo de cada usuario.

En este sentido la demanda de transporte es altamente cualitativa y diferenciada; existen diversos tipos de demandas que se diferencian por hora, día, motivo de viajes, tipo de mercancía, etc (Obregón-Biosca, 2013). Otra característica de la demanda, es que esta tiene lugar en el espacio, por lo que se debe de dividir el área de estudio en zonas y codificarlas. La articulación espacial de la demanda frecuentemente provoca problemas de falta de coordinación del sistema, la cual puede influir de forma relevante en el nivel de servicio que brinda la oferta.

Finalmente, la demanda es dinámica, ya que una buena parte de esta se concentra en unas pocas horas del día y en zonas específicas, donde se presentan congestiones en horarios pico. Puede ser que un sistema funcione adecuadamente bajo demanda promedio, pero colapse durante horarios de máxima demanda.

2.2.3 2.1 Generación de viajes

La etapa de generación de viajes busca predecir el total de viajes producidos y atraídos por cada una de las zonas establecidas para el análisis.

La generación de viajes está en función del uso del suelo, de las características socioeconómicas de la población, del tipo de actividad a realizar y su localización, de la disponibilidad y calidad de las infraestructuras y servicios de transporte disponibles (Rosas Flores, 2017).

En este sentido, para obtener mejores resultados en la modelación se recomienda clasificar los viajes de acuerdo a su propósito y al tipo de persona que lo realiza. En relación al propósito, los viajes HB suelen clasificarse en trabajo, estudio, compras, recreativos y otros. Los primeros dos se conocen como movilidad obligada ya que se realizan de una manera rutinaria. Los viajes NHB por lo general no se subdividen, ya que representan a lo mucho 25% del total de viajes diarios de una ciudad (Vasconcello, 2010).

Por otro lado, el modelo de generación de viajes puede estimarse de forma agregada o desagregada. En el primer caso, generalmente aplicado para la atracción de viajes, se utilizan promedios de las zonas para estimar los viajes que estas producen y atraen. Por otro lado, la producción de viajes se lleva a cabo generalmente utilizando un enfoque desagregado, en donde se estiman los viajes producidos por cada hogar a partir de sus características socioeconómicas, y posteriormente, se agregan los resultados para obtener los totales zona.

Independientemente del nivel de agregación, existen distintos métodos que permiten calcular el total de viajes producidos y atraídos en la ciudad, así como en cada una de sus zonas, entre los cuales destacan el “análisis de categorías” y el método de “regresión lineal”.

- *Análisis de categorías o clasificación cruzada.*

El método calcula el número de viajes producidos por un hogar de acuerdo a sus características y tiene como hipótesis básica que la producción de viajes es relativamente estable en el tiempo para ciertas estratificaciones de hogares. En este sentido, se basa en el cálculo de tasas de producción de viajes para las distintas “categorías” de hogares y posteriormente, se aplican estas al total de hogares de cada tipo en cada zona, para obtener el total de viajes producidos (Stopher, P. R., & McDonald, K. G., 1983). Así, la forma general de este método se expresa en la siguiente ecuación:

$$t^p(h) = T^p(h)/H(h)$$

donde $t^p(h)$ es el tasa de producción de viajes con motivo “p”, por un hogar tipo “h”, en un determinado periodo de tiempo; $T^p(h)$ corresponde a la suma de los viajes observados con motivo “p”, realizados por miembros de un hogar tipo “h” en el periodo de tiempo analizado; por último, $H(h)$ es el total de hogares tipo “h” observados o reportados en la base de datos.

Una vez obtenidas las tasas de producción para cada clasificación, se debe llevar a cabo la agregación para obtener el total de producción por zona, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$O_i^p = \sum_h a_i(h)t^p(h)$$

donde O_i^p es el total de viajes producidos en la zona “i” con motivo “p”, $a_i(h)$ es el total de hogares tipo “h” en la zona “i”, y $t^p(h)$ es el tasa de producción de viajes con motivo “p” de los hogares tipo “h”.

Cuando aparte de la estratificación de hogares, se está trabajando también con diferentes clasificaciones de personas, es necesario aplicar las expresiones anteriores para cada una de estas, es decir, repetir el proceso para cada tipo de persona y al final agregar los totales obtenidos.

La principal ventaja de este método, además de ser de fácil aplicación, es que la agrupación de datos para la obtención de tasas se realiza independientemente de las zonas. Por otro lado, tiene dos grandes desventajas. La primera es la disponibilidad de datos, ya que debe de existir una muestra representativa de cada categoría (50 observaciones mínimas para cada una). La otra desventaja es que es complejo predecir el número de hogares de cada categoría en el futuro.

En el caso de la atracción de viajes el método funciona de forma análoga, sin embargo, la información disponible por lo general es más agregada (totales por zona), por lo que el método se aplica sustituyendo los estratos de hogares por categorías de unidades atractoras de viajes definidas a partir del tipo de actividad que en ellas se realiza (industriales, comerciales, educativas, etc.), de la superficie destinada a las diferentes actividades, y si está disponible, a partir de la cantidades de empleos y matrículas de estudiantes en las zonas.

- *Método de regresión lineal*

El análisis de regresión tiene como propósito obtener una función sencilla de la variable explicativa, que sea capaz de describir lo más detalladamente posible la variación de la variable dependiente (Zenina, N., & Borisov, A., 2012). Existen varios tipos de regresión como lineal, logarítmico o exponencial, sin embargo, en el desarrollo de modelos de generación de viajes, la regresión lineal es el modelo matemático más adecuado. Así, el método establece una relación entre la cantidad de viajes que genera una zona o un hogar, y sus respectivas características, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_i = K + \phi_1 X_{1i} + \phi_2 X_{2i} + \dots + \phi_n X_{ni}$$

donde T_i es la variable dependiente (en este caso los viajes producidos por una zona), X_{1i} a X_{ni} son las variables independientes (nivel de ingreso, empleados, tamaño del hogar, etc.) para la zona “i”, ϕ_1 a ϕ_n son los coeficientes de la regresión lineal para cada variable independiente considerada en el modelo, y K es el término independiente que representa en este caso la cantidad de viajes producidos o atraídos por todas aquellas variables que no han sido incluidas en el modelo. En el caso de las atracciones de viaje, el modelo funciona de forma análoga, cambiando el subíndice “i” por “j”.

En este sentido, lo primero que se debe realizar es definir la forma funcional del modelo, es decir, establecer que variables explicativas se considerarán, tomando en cuenta la disponibilidad de datos. Para el caso de modelos de producción, es común considerar el nivel de ingreso, cantidad de automóviles en el hogar, personas que trabajan en el hogar, personas que estudian, etc. Para las atracciones, en la práctica se utilizan la cantidad de empleados o estudiantes, así como los metros cuadrados destinados a las distintas actividades como educación, producción industrial, comercio, etcétera.

Una vez establecida la forma funcional, se procede a calibrar el modelo, es decir, a partir de los datos disponibles, estimar los coeficientes de cada variable explicativa (ϕ_1 a ϕ_n), así como el valor del término independiente (K). En el caso de que solo se esté considerando una variable explicativa (regresión lineal simple), esto puede realizarse “a mano” utilizando técnicas estadísticas, sin embargo, cuando se incluyen dos o más variables explicativas (regresión lineal múltiple), esto puede resultar muy tardado, por lo que en la práctica se acostumbra utilizar cualquier software que realice cálculos estadísticos.

Una vez calibrado el modelo, tenemos una expresión que puede ser aplicada para cualquier zona u hogar del sistema analizado; ahora es necesario obtener la producción y atracción de viajes en cada zona y eventualmente, el total de sistema analizado. Si la regresión fue agregada nivel zonal (algo común en atracciones de viajes), esto no representa ningún problema, ya que el modelo fue estimado a ese nivel. Por otro lado, si el modelo es desagregado basado en hogares (lo común en las producciones) es necesaria una agregación, y ya que los modelos son lineales, esta se logra asignando a cada variable explicativa (X_{1i} , X_{2i} ... X_{ni}), el valor promedio de dicho atributo en la zona analizada, y el resultado se multiplica por el total de hogares en la zona.

2.2.3.2.2 Distribución de viajes

Los modelos de distribución de viajes tienen por objetivo conocer hacia dónde se dirigen los viajes que se producen en cada zona y de dónde vienen los que son atraídos a cada zona. El resultado de esta etapa es una o varias matrices O-D, las cuales deben de cumplir con la condición de que las sumas horizontales entreguen los viajes producidos por cada zona, mientras que la suma vertical sean los viajes atraídos, (Ortúzar & Willumsen 2008). La forma convencional de una matriz O-D es la que se muestra en a la Tabla 05.

Tabla 05. Estructura general de una matriz de viajes O-D.

Orígenes	Destinos					$\sum_j T_{ij}$
	1	2	3	... j	... z	
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	... T_{1j}	... T_{1z}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}	... T_{2j}	... T_{2z}	O_2
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}	... T_{3j}	... T_{3z}	O_3
⋮						
i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	... T_{ij}	... T_{iz}	O_i
⋮						
z	T_{z1}	T_{z2}	T_{z3}	... T_{zj}	... T_{zz}	O_z
$\sum_i T_{ij}$	D_1	D_2	D_3	D_j	... D_z	$\sum_i T_{ij} = T$

Fuente: Ortúzar & Willumsen (2008), "Modelos de Transporte".

En donde T_{ij} representa los viajes con origen en la zona "i" y destino en la zona "j", la diagonal principal representa los viajes intrazonales, O_i es el total de viajes producidos en la zona "i", D_j es el total de viajes atraídos por la zona "j", y T es el total de viajes de la matriz considerando todos los orígenes y destinos.

Es importante establecer que los totales de producción (columna extrema derecha) y de atracción (fila inferior) por zona, son datos de entrada al modelo de distribución ya que son resultado de la etapa anterior de generación.

Por lo tanto, en la etapa de distribución se busca encontrar los distintos valores de T_{ij} , tomando en cuenta las siguientes condicionantes:

$$\sum_j T_{ij} = O_i \quad \sum_i T_{ij} = D_j$$

Para lograr lo anterior, el método básico se conoce como "modelo gravitacional".

- *Modelo gravitacional de distribución de viajes*

Este modelo se formuló originalmente a partir de una analogía del modelo gravitacional de Newton, considerando la distancia como el separador que inhibe el desplazamiento entre una zona y otra. Así, en un principio el modelo tenía la siguiente forma:

$$T_{ij} = \frac{K P_i P_j}{d_{ij}^2}$$

Donde P_i y P_j es la población de las zonas “i” y “j” respectivamente, d_{ij} es la distancia entre estas dos zonas, y K es un factor de proporcionalidad. Sin embargo, la práctica hizo que esta formulación pronto se ajustara sustituyendo las poblaciones de las zonas por el total de viajes producidos y atraídos.

Así mismo, se entendió que no solo la distancia debe ser considerada como inhibidor, y más bien debe utilizarse una función generalizada de costo que puede incluir tiempos de viaje, tiempos de espera, tarifa, transbordos, costo total, etc. Aunado a esto, fue necesario sustituir el factor de proporcionalidad original, por dos factores de balanceo que permitieran cumplir las dos restricciones previamente establecidas. Así, el modelo gravitacional actual se conoce como doblemente acotado y tiene la siguiente forma:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij})$$

con:

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j f(c_{ij})} \quad \text{y} \quad B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i f(c_{ij})}$$

donde T_{ij} son los viajes entre “i” y “j”, A_i es el factor de balanceo o restricción para el total de producciones por zona, O_i son los viajes generados en i, B_j es el factor de balanceo o restricción para las atracciones, D_j son los viajes atraídos por j y $f(c_{ij})$ es la función de costos representativos para viajar de “i” a “j” (Evans, S. P., 1973).

Respecto a la función de costo representativo puede ser especificada de distintas formas, para esto en la literatura se plantean tres funciones características que han demostrado ser apropiadas para representar el fenómeno de la distribución de viajes; una función exponencial negativa con forma $e^{-\gamma c_{ij}}$, una función de costo elevado a exponente negativo C_{ij}^{-n} , y una función combinada de la forma $\alpha C_{ij}^{\beta} e^{-\gamma c_{ij}}$.

Es en este punto donde se lleva a cabo la calibración del modelo gravitacional, es decir, se estiman los parámetros de la función del costo representativo seleccionada, los cuales deben permitir que los resultados entreguen una distribución de longitudes o costos generalizados de viaje lo más cercana posible a la observada o reportada en la base de datos (Abdel-Aal, M. M. M., 2014).

Una vez calibrada la función c_{ij} , se procede a aplicar el modelo gravitacional doblemente acotado. El problema es que A_i , depende de B_j , y B_j depende de A_i por lo tanto, se tiene que llevar a cabo un proceso iterativo, iniciando con $A_i = 1$ o $B_j = 1$. Es decir, en el caso de que se inicie considerando $B_j = 1$, se calculan los valores A_i para las distintas zonas tomando en cuenta este valor y la función C_{ij} calibrada. Con el valor de A_i para cada fila, se calculan los viajes de cada par O-D aplicando el modelo general, y posteriormente se obtienen factores de ajuste para los orígenes totales (filas), dividiendo el O_i deseado entre el obtenido. Este factor de ajuste se aplica a cada una de los pares O-D de la fila correspondiente. Posteriormente, de forma análoga se obtiene un factor de ajuste para las atracciones totales (columnas), y se aplica a cada par O-D de la columna correspondiente. Este proceso continúa hasta que el factor de error en todas las columnas (o filas) es menor a 1%.

2.2.3.2.3 Partición modal

Los modelos de partición modal buscan definir la cantidad de viajes que se dan en cada modo de transporte entre cada par O-D. En este sentido, toman como dato de entrada los resultados de la etapa de distribución.

Aunque existen en la literatura algunos métodos agregados para obtener una partición modal que refleje adecuadamente el estado actual de un sistema de transporte, se ha comprobado que estos no funcionan adecuadamente cuando se trata de considerar cambios en el sistema como modificaciones a la tarifa, adecuaciones de frecuencias, nuevos derroteros, etcétera. En este sentido, se recomienda estimar la partición modal a partir de modelos desagregados o de elección discreta basados en la Teoría de la Utilidad Aleatoria (TUA), los cuales consideran las características particulares de cada individuo (Domencich & McFadden, 1975).

La TUA establece que cada individuo tiene un conjunto finito de alternativas disponibles, en este caso modos de transporte, de las cuales conoce sus características y por lo tanto, a cada uno le asocia una utilidad (en el caso de transporte es una pérdida o utilidad negativa). Así, el individuo elegirá la alternativa que le reporte mayor utilidad.

Se han desarrollado diversos modelos con alto nivel de detalle para obtener una partición modal considerando el enfoque probabilístico asociado a la TUA, sin embargo, el modelo original y a partir del cual se han propuesto los otros, se conoce como “Modelo Logit Multi nominal (MNL)” (Domencich & McFadden, 1975).

- *Modelo Logit para partición modal*

El MNL encuentra la probabilidad “ P ” de que el individuo “ q ” elija la alternativa “ A ” o modo de transporte “ i ”, considerando el exponencial de la utilidad representativa (V) de este, y dividiendo esta entre la sumatoria de las exponenciales de todas alternativas disponibles “ j ”

para este individuo. Así, la especificación de este modelo es la que se muestra en la siguiente expresión:

$$P_{iq} = \frac{\exp(V_{iq})}{\sum_{A_j \in A(q)} \exp(V_{jq})}$$

Sin duda, la aplicación del modelo anterior no representa mayor complejidad, sin embargo, el reto está en estimar las utilidades representativas “ V ” para cada uno de los modos de transporte. Estas utilidades dependen del valor de los atributos de la alternativa, como son tiempo de viaje, tarifa, tiempo de caminata, costo de estacionamiento, comodidad, etc.

Es importante considerar que el valor de estos atributos varía de una persona a otra, e incluso, sus características como nivel de ingreso, edad, ocupación, etcétera, pueden incidir en la forma de valorarlos. Así, la TUA propone una función lineal para obtener la utilidad representativa de cada alternativa “ i ”, considerando que los atributos “ r ” pueden variar entre cada individuo “ q ”. Dicha expresión tiene la siguiente forma:

$$V_{iq} = \sum_r \theta_r X_{irq}$$

donde “ X ” es el valor del atributo “ r ” de la alternativa “ i ” para el individuo “ q ”, y “ θ ” es el parámetro del atributo “ r ”, el cual permanece constante entre las distintas alternativas y deberá calibrarse utilizando técnicas estadísticas de verosimilitud a partir de los datos de la muestra.

Es importante comentar que los valores “ X ” de los atributos dependen de la oferta y niveles de servicio en las zonas de origen y destino, así como del viaje entre ambas. En este sentido, una vez calibradas las funciones de utilidad representativa para cada modo de transporte disponible, se aplica el MNL en cada par O-D, tomando como valores de “ X ” los correspondientes al par analizado, para obtener la probabilidad de que el individuo “ q ” que viaja en el O-D correspondiente, elija cada una de las alternativas. Posteriormente se aplica cada probabilidad al total de viajes “ V_{ij} ” del mismo par O-D que se obtuvo en la etapa de distribución de viajes; esto entrega el número de viajes en el par O-D realizados por individuos tipo “ q ” en cada modo de transporte disponible.

Para obtener el reparto modal de todos los viajes del sistema analizado, se debe repetir el proceso anterior para los distintos tipos de individuos considerados y para todos los pares O-D. Esto es sin duda resulta poco viable para realizarse “a mano”, sin embargo, puede llevarse a cabo de manera eficiente en softwares especializados.

2.2.3.2.4 Asignación o elección de ruta

La asignación de tráfico es el proceso que distribuye un conjunto de viajes en una red de transporte. Requiere dos grandes insumos de entrada:

- Una demanda de viajes para el periodo de tiempo que se desea analizar, la cual deberá estar especificada en una matriz de viajes O-D.
- Una descripción de tallada de la red de transporte con sus características de operación, es decir, el modelo de oferta.

Existen numerosas técnicas con alto nivel de complejidad para llevar a cabo este proceso (Chow, A. H., 2007), y dependiendo de estas será el tipo de información que entregue, sin embargo, los resultados siempre incluyen una estimación del volumen de tráfico, así como los tiempos y costos de viaje en cada elemento del sistema de transporte. Adicionalmente, algunos métodos pueden entregar resultados más desagregados como tiempos de espera y de caminata, retrasos por congestión en intersecciones, entre otros; esto dependerá del nivel de detalle con el que se construya el modelo de oferta y de la técnica de asignación utilizada.

Todos los modelos de asignación llevan a cabo un proceso iterativo en el que utilizan algoritmos para calcular la interacción entre el volumen de demanda que utilizará un elemento de la red de transporte y las capacidades del mismo. A través de estas iteraciones definen las rutas por la que se llevarán a cabo cada uno de los viajes, y posteriormente, en cada arco o tramo de vialidad, identifican los viajes que la utilizan, de esta forma se obtienen la cantidad de viajes en cada arco.

Cuando el objetivo de la modelación es apoyar en la planeación de todo el sistema de transporte de una ciudad (modelos macroscópicos o mesoscópicos), el método de asignación más utilizado en la práctica es el denominado “asignación por equilibrio”. Este distribuye la demanda en la oferta de acuerdo al primer principio de Wardrop, el cual establece que “cada usuario de la red elige su ruta de tal forma que el costo de viajar en rutas alternativas es igual o mayor, y por lo tanto, cambiar a un ruta diferente aumentaría el tiempo de viaje personal u óptimo del usuario” (Wardrop, J. G., 1952). Así, de manera general el método consiste en:

1. Identificar el tiempo a flujo libre “ t_0 ” para cada elemento de la red.
2. Identificar la ruta de menor tiempo para cada par O-D considerando los “ t_0 ”. Para esto se aplica el Algoritmo de Dijkstra.
3. Cargar los viajes de cada par O-D a la ruta más corta identificada.
4. Calcular el tiempo real “ t_{cur} ” en cada elemento de la red, debido a la congestión generada por los viajes “cargados”. Para esto existen distintas funciones, pero la más utilizada en la práctica es la “BPR Traffic Assignment Formula” desarrollada por el Bureau of Public Roads de los Estados Unidos, la cual tiene la siguiente especificación:

$$t_{cur} = t_0 \left[1 + a \left(\frac{q}{q_{max} \cdot C} \right)^b \right]$$

donde “ q_{max} ” es la capacidad de cada elemento de la oferta, “ q ” es el volumen de demanda cargado a dicho elemento en la iteración, y “ a ”, “ b ” y “ c ” son parámetros de calibración que se estiman a partir de aforos en campo (TRB, 2010).

5. Si los valores " t_{cur} " calculados en el paso anterior difieren considerablemente de los valores " t_0 " se inicia una nueva iteración desde el paso 2, tomando como " t_0 " de la nueva iteración, el " t_{cur} " de la iteración anterior. En caso de no existir diferencias considerables se termina el proceso ya que ningún viaje pueda beneficiarse por un cambio de ruta, que en teoría es lo que sucede diariamente en las áreas urbanas.

El proceso antes descrito es imposible de llevarse a cabo "a mano", sin embargo, existen programas especializados para generación de modelos de transporte que permiten llevar a cabo este tipo de asignación de manera eficiente. Así mismo, la asignación puede resolverse en paquetes de cómputo con lenguajes de programación propio.

Cuando se logra el equilibrio en el proceso de asignación, es posible contabilizar el flujo en cada elemento de la red y, por lo tanto, en las vialidades o rutas del sistema de transporte. Así mismo, se obtienen los tiempos de viaje para cada viajero. A partir de esto, se pueden obtener indicadores generales del sistema como tiempos de viaje promedio, costo total, trasbordos, tiempos de caminata, etcétera.

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

3.1 Movilidad urbana en Mexicali

Mexicali se localiza en el noroeste de la República Mexicana (32°37'28" N, 115°27'7" O), en el estado de Baja California y limita al norte con el estado de California, Estados Unidos. Al año 2018 se contaba con una población de 838,161 habitantes, con una tasa de crecimiento anual del 2.7% y la población económicamente activa representa poco más del 54.3% de la población total, en base a los datos reportados por el Consejo Nacional de Población (COPLADE B.C, 2018). Además, muestra una extensión de su mancha urbana que en los últimos 20 años ha generado una conurbación con las localidades inmediatas de Ejido Puebla, Santa Isabel y Progreso, con las cuales exhibe gran movilidad por motivo de empleo, educación y prestación de servicios.

Esta ciudad se caracteriza por su potencial de desarrollo, esto debido a su localización fronteriza, teniendo así mayor acceso que las ciudades del interior de la república a mercados del exterior, así como un incremento del flujo comercial, migratorio y desplazamientos transfronterizos de carga y turístico, impactando en la infraestructura local.

El territorio del municipio de Mexicali es uno de los más extensos en el ámbito nacional. Lo señalado implica que es un municipio atípico dentro de la tipología nacional. La estructura urbana del municipio Mexicali, tiene sus antecedentes de una base de pequeñas localidades agrícolas a principios del siglo XX en un proyecto de desarrollo agrícola del valle de Imperial en el que la porción mexicana era requerida para poder transportar el agua del río Colorado por gravedad hacia la región norteamericana.

Dentro de esa estructura urbana, la ciudad de Mexicali evolucionó para consolidarse como la principal localidad de la región binacional. Actualmente, presenta características de una intensa concentración de población, urbanización y actividades económicas que la define como la ciudad central para toda la región. Actualmente, el municipio se encuentra dividido en 14 delegaciones municipales que fungen como cabeceras delegacionales. (UABC & CDEM, 2011).

Respecto al tema de infraestructura, Mexicali cuenta con una red carretera que permite un libre acceso a los estados vecinos de Sonora, Baja California Sur y el resto del estado, además de contar con dos garitas internacionales colindantes con el estado de California. Por otro lado, cuenta con un aeropuerto internacional, y una red ferroviaria capaz de trasladar mercancías al vecino país.

Por otro lado, la tasa de motorización es de 400 automóviles por cada mil habitantes, es decir por cada 2.5 habitantes hay un vehículo registrado, siendo la segunda ciudad con el índice más alta del país, tan solo por detrás de Tijuana. Aunado a esto, el indicador de kilómetro-vehículo recorrido (KVR) per cápita asciende 6,000 km por habitante y es, por mucho, el más elevado del país; le siguen las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Valle de

México (Ver tabla 06), todas ellas con valores cercanos a los 4,000 km por habitante (Medina Ramírez, 2012).

Tabla 06. KVR en zonas metropolitanas de México, 2010.

Zona metropolitana	Automóviles privados registrados	KVR (millones de km)	KVR per cápita
Mexicali	395,644	5,821	6,308
Tijuana	577,382	5,663	4,413
Guadalajara	1,209,208	18,976	4,342
Valle de México	5,375,474	84,552	4,260
Monterrey	1,292,751	15,335	3,813
Aguascalientes	248,023	2,942	3,202
Chihuahua	267,132	2,533	3,016
Querétaro	236,300	2,803	2,592
Veracruz	172,790	2,042	2,586
Puebla	523,474	6,210	2,361
León	254,446	3,018	1,709
Tuxtla	111,951	273	432

Fuente: Elaboración a partir de Medina Ramírez (2012).

Comparando con zonas metropolitanas de Estados Unidos, Mexicali tiene valores muy cercanos a estas, donde el sector del transporte se considera insostenible, zonas tales como Nueva York, Chicago y las Vegas.

3.1.1 Valores referencia

Se identificaron valores de referencia de viajes diarios y partición modal en tres documentos previos de los últimos años: el Plan Maestro de Vialidad y Transporte de 2011 (IMIP & SIMUTRA, 2011) (PMVyT), el Proyecto de Rutas Ciclistas para Mexicali (IMIP, 2014), y el Plan Estratégico del Municipio de Mexicali 2015-2029 (CDEM & UABC, 2014).

El PMVyT (2012) reporta datos históricos para los años 2003, 2007 y 2009, donde resalta que el uso del autobús es menor al 11% y que existe un dominio del automóvil particular superior al 80% con un índice de 2.3 pasajeros por unidad. Así mismo, sobresale el aumento del porcentaje de viajes realizados por servicio de empresas del 2003 al 2009. Además, se menciona que en el año 2009 se llevaron a cabo 1'640,979 viajes diarios en promedio, de los cuales solo 147,688 son en transporte público (9%), mientras que 1'493,291 en transporte privado (91%). Así mismo, se incluye una proyección, la cual indica que para el año 2020 se estiman un total de 2'119,079 viajes diarios, de los cuales 148,336 (7%) son en transporte público y 1'970,743 en automóvil privado (93%). El mismo documento menciona que más de la mitad de los viajes realizados en la ciudad tienen como origen o destino el trabajo del usuario.

Por otro lado, el estudio de rutas ciclistas llevó a cabo la aplicación de 6,866 encuestas en el año 2013, a partir de las cuales se identificó la elección de modo de transporte de la

población en diferentes sectores de la ciudad. A partir de los resultados, es posible inferir que el porcentaje de población que utiliza el automóvil como su principal medio de transporte es entre un 40% y 50%, mientras que el autobús está en un rango del 30% a 40%, dependiendo del sector.

El Plan Estratégico del Municipio de Mexicali 2015-2029 menciona que en el año 2015 se llevan a cabo 1'289,500 de viajes diariamente en el municipio de Mexicali, de los cuales el 93% (1.2 millones) se realizan dentro de la ciudad. De estos, 996 mil (83%) son en transporte privado y 204 mil (17%) en transporte público.

Considerando lo anterior es necesario mencionar que los resultados de cada investigación difieren en cuanto al porcentaje de reparto modal, además que cada uno analiza distinta cantidad de modos de transporte, impactando así en el porcentaje resultante de cada uno. Por otro lado, es necesario establecer el enfoque con el cual se obtuvo el porcentaje de reparto modal, si está en función de la cantidad de viajes o en la cantidad de usuarios por modo de transporte, esto debido a que los usuarios del transporte público realizaron menos viajes diarios que un usuario del transporte particular o privado.

SIMUTRA reportó que, en el año 2017, en el servicio de transporte público de autobuses de Mexicali se llevan a cabo en promedio un total de 121 mil viajes diarios. Dicho valor fue obtenido a través de entrevistas con los concesionarios de transporte público y los registros de boletos mediante los sistemas de prepago instalados en las unidades. En este sentido, y considerando la variabilidad de los datos mostrados en los estudios previos, los 121 mil viajes diarios en transporte público reportados por SIMUTRA son tomados como referencia para esta investigación.

Respecto al cálculo del total de viajes diarios y su partición modal, es recomendable categorizar a la población en función de sus actividades diarias, tal y como se hizo en la encuesta de movilidad 2019 llevada a cabo por la Universidad Autónoma de Baja California, en donde se consideraron el origen y el destino de los viajes, la actividad de los encuestados, entre otras variables relevantes en términos de movilidad. En este sentido, para esta investigación se definirá un total de viajes diarios y su partición modal actualizada, esto mediante el procesamiento y análisis desagregado de las respuestas de la encuesta de movilidad 2019 de la Universidad Autónoma de Baja California.

3.2. Estado actual del sistema de transporte público de Mexicali

3.2.1 Concesiones

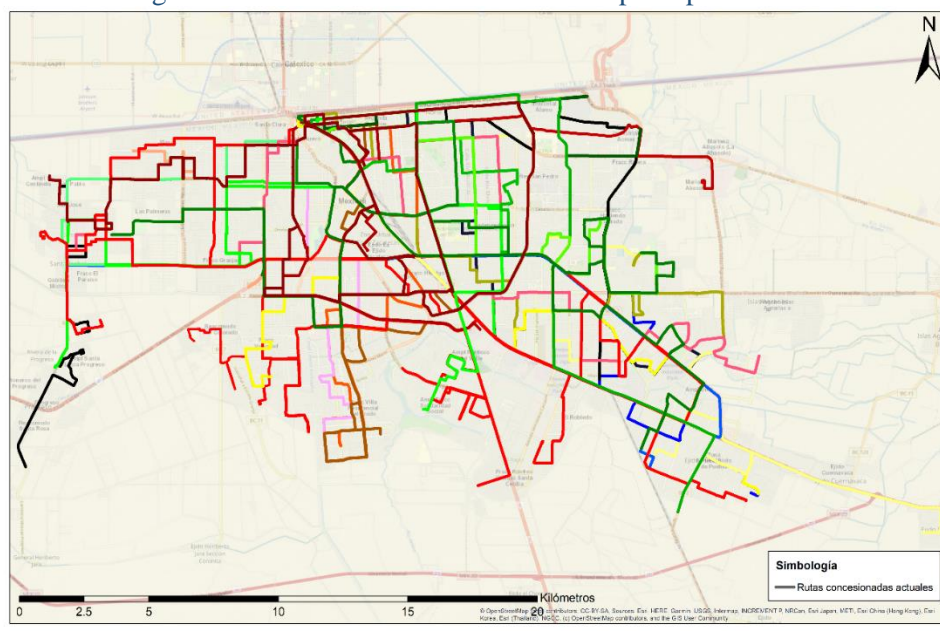
El sistema de transporte público colectivo está conformado por 41 diferentes concesiones de rutas de autobuses (Ver Figura 04), equivalente a 936 kilómetros, distribuidos entre 12 distintas empresas transportistas.

En la mayoría de las ciudades latinoamericanas, el proceso histórico en la toma de decisiones relacionadas con la asignación y reestructuración de sus sistemas de transporte público, se ha llevado a cabo de manera reactiva, ya que los estudios sobre movilidad y transporte son escasos y no se ejecutan de forma periódica.

En Mexicali, como se observa en la Tabla 07, el proceso histórico de conformación de su sistema de transporte público colectivo, ha resultado en una red con un nivel de sobre piso cercano al 80%, y una sinuosidad promedio de 1.77. La sinuosidad se calcula mediante la relación entre la longitud total de la ruta y la distancia en línea recta en el espacio de los puntos de inicio y fin de recorrido de cada ruta. En ese sentido, los factores de sinuosidad cercanos a uno, entregarán recorridos en menor tiempo y a un costo operativo más bajo; mientras que factores de cercanos o mayores a dos, representan el doble de inversión para llegar al destino (UABC, 2019).

Por esto se considera que el estado actual de la oferta del sistema de transporte público de la ciudad de Mexicali, cuenta con diversas áreas de oportunidad desde una perspectiva geométrica y del tipo operacional.

Figura 04. Derroteros del sistema de transporte público de Mexicali.



Fuente: Asesoría para el diseño de red de paraderos del sistema de transporte público colectivo de Mexicali, B.C. (UABC, 2019).

Tabla 07. Factor de Sinuosidad por rutas de transporte público de Mexicali.

No.	Clave	Ruta	Factor de Sinuosidad (FS)
1	ATE09	ORIENTE-OCCID	1.25
2	AB03	EJIDO SINALOA	1.27
3	MXL06	SANTA ISABEL	1.37
4	TM04	RIO PRESIDIO	1.39
5	EN01-FA01	PROGRESO-FLORES MAGÓN	1.41
6	MB02	PROHOGAR-CALLE RIO FUERTE-CENTRO CÍVICO-CENTRO	1.41
7	FA02	COL. ABASOLO-COL. CORREGIDORA-CALZ. AMÉRICAS-CENTRO	1.42
8	FA04	COMPUERTAS-COL. ALAMITOS-BRASIL-CENTRO	1.45
9	AB05	VALLE DORADO	1.50
10	TC02	VILLA VERDE	1.51
11	AB07	NUEVO MEXICALI-PARQUE INDUSTRIAL ALAMITOS-CENTRO	1.51
12	SM02	NACIONALISTA	1.54
13	AB06	CARRANZA	1.55
14	AT02-EN04	ROBLEDO-SANTA ISABEL	1.57
15	TC08	EJIDO PUEBLA	1.59
16	TME08	EXPRESO BENITO JUÁREZ-CASTELLÓN-PUEBLO NUEVO	1.60
17	TC09	VILLA FLORIDA-CENTRO CÍVICO-CENTRO" CONCESIONADA	1.63
18	TC0507	B. VISTA-CALLE I	1.64
19	TME12	EXPRESO PERIFÉRICO-HIDALGO-CENTRO	1.64
20	TM05	VIRREYES	1.65
21	AT06	AMP. SOLIDARIDAD-LOS NARANJOS-JUSTO SIERRA-CENTRO	1.69
22	ATE03	NARANJOS	1.71
23	FV02	COMANDANCIA	1.75
24	AT04-08	PORTALES	1.76
25	AT01	PALACO	1.79
26	MB01	LAGO	1.82
27	AT03-07	HIDALGO	1.82
28	AB04	CONSTITUCIÓN	1.84
29	AB02	COL. INDEPENDENCIA-PRO HOGAR-LIBERTAD-CENTRO	1.86
30	MB04	PORTALES-LUCIO BLANCO-STA. MÓNICA-C. CÍVICO-CENTRO	1.92
31	AB10	NVO. AMANHECER-V. PALMAR-INDEP.-CENTRO CÍVICO-CENTRO	1.99
32	MB03	ORIZABA	2.00
33	AB09	NVO. AMANECER-V. PALMAR-INDEP.-PRO HOGAR-CENTRO	2.01
34	AZ01	CALLE G	2.09
35	EN02	COL. AMP. CENTINELA-ORIZABA-CENTRO-CENTRO CÍVICO	2.21
36	EN11	P. I. MARAN-WISTERIA-CENTRO-CENTRO CÍVICO	2.40
37	EN05	JAZMINES-V. DE LAS MISIONES-RIO NVO.-C. CÍVICO-CENTRO	2.52
38	FV01	CALLE E	2.62
39	SM01	COL. SAN CARLOS-JUV. 2000-RIO NVO.-CENTRO CÍVICO-CENTRO	2.98
Factor de Sinuosidad Promedio del sistema de rutas concesionadas			1.77
<i>Solo se presenta la sinuosidad de 39 rutas, ya que aunque EN01-FA01 y ATE02-EN04 representen concesiones activas para diversas empresas, funcionan como una sola ruta.</i>			

Fuente: Asesoría para el diseño de red de paraderos del sistema de transporte público colectivo de Mexicali, B.C. (UABC, 2019).

Con lo anterior se puede deducir que el estado actual de sistema sobrepone una operación ineficiente, que a su vez genera una disminución del uso del mismo, provocando el uso del automóvil particular para desplazarse dentro de la mancha urbana. Cabe mencionar que el 80% de los 936 kilómetros concesionados se encuentran en sobrepiso, Por ejemplo, en la zona del centro histórico se sobrepone hasta ocho diferentes concesiones. Esto se traduce en una operación ineficiente que provoca una disminución constante de usuarios y, por lo tanto, altos costos de operación. Esto es consecuencia del proceso histórico de conformación del sistema de transporte público colectivo de la ciudad, el cual como en muchas ciudades latinoamericanas, ha sido definido por la toma de decisiones reactiva, provocando así diversas

áreas de oportunidad en materia de eficientización operativa, ampliación de cobertura y accesibilidad. Cabe mencionar que derivado del escenario anteriormente descrito en el año 2020 solamente operan 22 de las 41 rutas, representando únicamente un total del 67% de los kilómetros concesionados en operación.

3.2.2 Rutas en operación

Derivado del escenario descrito en el punto 3.2.1 en el año 2020, únicamente se encuentran operando 22 rutas administradas por diez empresas distintas. De acuerdo con lo expuesto por UABC (2019), en conjunto estas rutas suman un total de 627.2 kilómetros de trazo, y son atendidos por una flota vehicular de 517 autobuses, de la cual poco más del 60% de los modelos son del año 2005 en adelante, aunque el rango y edad del parque vehicular oscila entre los años 1986 y 2016. La Tabla 08 presenta un resumen de las rutas activas, las empresas que las operan, unidades con las que brindan en servicio de transporte y el aforo diario con el que contaban según los datos reportados en el año 2017.

Tabla 08. Rutas de transporte público operando 2020

No.	Clave	Nombre	Aforo diario 2017	Unidades	Rango del modelo
Auto Transportes Urbanos S.A. de C. V.			54930	151	2005-2015
1	ATE01	Palacio-Justo Sierra-Centro	5331		
2	ATE02-EN04*	Robledo - Centro Cívico - Centro - Santa Isabel	8193		
3	ATE03	Expreso Naranjos - Santa Cecilia-Insurgente	14829		
4	AT04-08	Col. San Fernando-Portales-Justo Sierra-Cívico-Centro-Wisteria	13410		
5	ATE09	Expreso Oriente-Occidente-Centro	14976		
Sociedad Cooperativa de Transporte Azul y Blanco de Mexicali S.C.L. de C.V.			1255	20	1987-2008
6	AZ01	Fraccionamiento Villas de la Republica-González Ortega-Carbajal-Calle G-Centro	1255		
Transportes Urbanos y Sub Urbanos Cachanilla S.A de C.V.			16585	40	1988-2011
7	TC02	Valle de Puebla-Villa Verde-Centro Cívico-Centro	3856		
8	TC05-07	Lomas Altas-Centro Cívico-Bella Vista-Centro-Calle I-Maestros Estatales-Conj.Urbano Esperanza	2314		
9	TC08	Ej. Puebla-Lázaro Cárdenas-Los Virreyes	10415		
Transportes Modernos de Mexicali, Sociedad Anónima de Capital Variable			8287	37	2006-2014
10	TM04	Expreso Río Presidio-Centro-Calle I	5621		
11	TM05	Expreso Virreyes-Centro-González Ortega	2666		
Sociedad Cooperativa de Transportes Urbanos Fausto Vásquez S.C.L.			7929	24	2008-2015
12	FV01	Fracc. Villa Residencial Las Lomas-P.I. Marán-Infonavit-Centro Cívico-Calle E-Centro	3643		
13	FV02	Fracc. Villa Residencial Las Lomas-Buenos Aires-Comandancia-Centro Cívico-Centro	4286		
Auto Transportes Urbanos de Pasajeros en Microbuses S.A. de C.V.			3941	41	1986-2010
14	B03	Valle de las Misiones-Orizaba-Centro Cívico-Independencia-Corredor Palacio	3941		
Sociedad Cooperativa de Autotransportes Estrella del Norte S.C.L.			8113	93	1986-2011
15	ATE02-EN04*	Robledo - Centro Cívico - Centro - Santa Isabel	8193		

16	EN01-FA01**	Colonia González Ortega-Ricardo Flores Magón-Av. Reforma-Centro	11972		
Autotransportes Fernando Amilpa S.A.			5488	23	1997-2011
17	EN01-FA01**	Colonia González Ortega-Ricardo Flores Magón-Av. Reforma-Centro	11972		
Sociedad Cooperativa de Autotransportes Amarillo y Blanco S.C.L.			12326	73	2005-2011
18	LEXP-1 AB03	Línea Express 01 - Ej. Sinaloa-Cuernavaca-Puebla	6695		
19	AB04	Rincones de Puebla-Palaco-Constitución-Centro	1260		
20	AB05	Rincones de Puebla-Palaco-El Cóndor-Valle Dorado-Periférico-Centro	2895		
21	AB06	Rincones de Puebla-V. Carranza-Centro Cívico-Centro	1476		
Sociedad Cooperativa de Autotransportes Malpica del Norte S.C.L.			2730	15	2005-2016
22	SM02	Col. Nacionalista-Infonavit-Centro Cívico-Centro	2730		
			Total	121584	517
* La ruta ATE02-EN04 está duplicada ya que está conformada por dos concesiones de distintas empresas.					
** La ruta EN01-FA01 está duplicada ya que está conformada por dos concesiones de distintas empresas.					
*** Unidades de flota vehicular por empresa concesionaria de acuerdo con el padrón reportado 2017-2018.					

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de SIMUTRA (2017) & UABC (2019)

Por otro lado, en la Tabla 09 se resumen los parámetros de operación de las rutas actuales, en donde se pueden apreciar las frecuencias promedios, tiempo de operación y kilómetros totales recorridos por cada una de las concesiones. Cabe mencionar que estos indicadores serán motivo de análisis con la propuesta de reordenamiento que en el apartado 3.3 se menciona.

Tabla 09. Parámetros de operación en rutas actuales

Clave de ruta	Nombre	Longitud (km) por sentido	Frecuencia promedio (minutos)	Tiempo de operación promedio (minutos)	Total de recorridos diarios en promedio	Kilómetros totales diarios recorridos por unidades TP
AT01	Palaco	33.5	14	965	69	4614.5
AT02-EN04	Robledo-Santa Isabel	38.6	25	970	39	1497.1
AT04-08	Portales-UABC	34.0	10	988	99	6723.6
AT03	Naranjos	21.6	11	988	90	3871.4
ATE09	Express Oriente-Occid.	44.3	7	947	135	11970.3
AZ01	Calle G	28.4	83	855	10	584.7
TC02	Villa Verde	28.5	102	940	9	526.0
TC05-07	Bella Vista-Calle I	33.3	120	835	7	463.4
TC08	Ej. Puebla - Lázaro Cárđ.	31.5	8	1010	126	7939.6
TME04	Express Río Presidio	25.8	30	950	32	1630.5
TME05	Virreyes	41.8	30	958	32	2671.1
FV01	Calle e	20.1	23	950	41	1658.1
FV02	Comandancia	18.1	13	968	74	2690.0
MB03	Orizaba	33.1	24	985	41	2712.6
EN01-FA01	Progreso-Flores Magón	54.3	13	960	77	4150.7
LEXP1	Línea Express 1	29.3	14	985	70	4119.6
AB04	Constitución	34.8	49	913	19	1296.9
AB05	Valle Dorado	28.3	16	993	62	3509.0
AB06	Carranza	29.0	48	905	19	1095.3
SM02	Nacionalista	19.2	16	960	60	2302.8
		Total (km)	627.2			71674.7

Fuente: UABC, 2019

Cabe mencionar que el sistema del transporte público actual, se encuentra en un proceso de modernización, el cual tiene como principal objetivo migrar hacia una movilidad sustentable, lo que busca es reducir emisiones contaminantes por parte de las unidades

transportadoras, brindar mayor seguridad y confort al usuario, además de reducir costos operativos por parte de los transportistas.

3.2.3 Cobertura

La cobertura del transporte público de Mexicali está orientada a atender las principales zonas de generación y atracción de viajes, dejando de lado algunas zonas residenciales con baja demanda del transporte público. La Tabla 10 resume el análisis de la cobertura espacial para las rutas que operan al 2020 en el polígono urbano de Mexicali, mientras que la Figura 06 muestra la cobertura espacial que poseen las 22 rutas en operación, la cual corresponde a 64.6% a 300 metros y 82.0% a 500 metros al eje del conjunto de las rutas.

Tabla 10. Cobertura del sistema de transporte público colectivo operando

	m ²	%
Área urbana considerada	208304951	100%
Cobertura de 500 m a cada lado del eje de las 22 rutas	170779647	82.0%
Cobertura de 300 m a cada lado del eje de las 22 rutas	134623876	64.6%

Fuente: UABC, 2019

3.2.4 Sobrepiso y sinuosidad

El trazado de las rutas del sistema de transporte público, presentan un sobrepiso a considerar. Este se refiere al paso de más de una ruta sobre la misma sección de la vialidad, visto desde las perspectivas del usuario podría representar más opciones para trasladarse de un punto a otro, sin embargo, desde el punto de vista operativo este indicador impacta de manera negativa para los transportistas, ya que se genera una competencia por captar al mayor número de usuarios, dejando de lado otras vialidades sin cobertura que podrían ser atendidos con una distribución de rutas más eficiente.

Por otro lado, la sinuosidad se obtiene mediante la relación de la longitud total de la ruta y la distancia en línea recta entre los puntos de inicio y fin de la ruta. Por ello, los factores de sinuosidad (FS) cercanos a uno entregan recorridos más eficientes, en menor tiempo y a un costo operativo menor; mientras que factores cercanos o mayores a dos, representan el doble de inversión para llegar al destino, generando así gastos extras donde los usuarios y operadores están obligados a cubrir. En la Tabla 11 se muestra los kilómetros de sobrepiso con los que opera el conjunto de rutas en servicio, así como sus respectivos factores de sinuosidad.

Tabla 11. Sobrepiso (SP) y Factor de Sinuosidad (FS) de rutas en operación.

Clave de ruta	Alias	Longitud (km) por sentido	Km. sin SP	% sin SP	Km. con SP	% con SP	FS
AT01	Palaco	33.5	6.1	18.3%	7.4	81.7%	1.79
AT02	Robledo	19.5	4.4	22.7%	5.0	77.3%	1.57
EN04	Santa Isabel	19.1	9.1	47.3%	0.1	52.7%	1.57
AT0408	Portales-UABC	34.0	13.7	40.2%	0.4	59.8%	1.76
AT03	Naranjos	21.6	10.6	49.4%	0.9	50.6%	1.71
ATE09	Express Oriente-Occ.	44.3	5.4	12.2%	8.9	87.8%	1.25
AZ01	Calle G	28.4	8.8	30.9%	9.6	69.1%	2.09
TC02	Villa Verde	28.5	4.8	16.9%	3.7	83.1%	1.51
TC05-07	Bella Vista-Calle I	33.3	13.7	41.3%	9.6	58.7%	1.64
TC08	Ej. Puebla - Lázaro C.	31.5	3.4	10.9%	8.0	89.1%	1.59

TME04	Express Río Presidio	25.8	1.9	7.2%	3.9	92.8%	1.39
TME05	Virreyes	41.8	17.2	41.2%	4.6	58.8%	1.65
FV01	Calle e	20.1	9.1	45.1%	1.0	54.9%	2.62
FV02	Comandancia	18.1	2.7	14.9%	5.4	85.1%	1.75
MB03	Orizaba	33.1	19.9	60.2%	3.2	39.8%	2.01
EN01	Progreso	30.5	18.5	60.8%	1.9	39.2%	1.41
FA01	Flores Magón	23.8	15.5	65.3%	.3	34.7%	1.41
LEXP1	Línea Express 1	29.3	7.8	26.5%	1.5	73.5%	1.17
AB04	Constitución	34.8	3.8	10.8%	1.1	89.2%	1.84
AB05	Valle Dorado	28.3	9.9	35.1%	8.4	64.9%	1.50
AB06	Carranza	29.0	4.1	14.3%	4.9	85.7%	1.55
SM02	Nacionalista	19.2	5.0	26.1%	4.2	73.9%	1.54
		627.2	195.4	31.7%	31.8	68.3%	1.65
		Total (km)	Total (km)	Promedio (%)	Total (km)	Promedio (%)	Promedio

Fuente: UABC, 2019

Como se muestra anteriormente 19 de 22 rutas tienen SP en más del 50% de su trazo. Así mismo, del total de kilómetros operando, el 68.3% está en SP y solamente 195 kilómetros no se encuentran en esta situación. Por otro lado, el FS promedio de las rutas operando es de 1.65, e incluso existen tres rutas donde este valor es mayor a 2: Calle G, Calle E y Orizaba.

Con esto se puede confirmar lo mencionado anteriormente, pues el estado actual del sistema de transporte público cuenta con diversas áreas de oportunidad respecto a la eficiencia operativa, si bien influye las discontinuidades de la traza vial de la ciudad en el factor de sinuosidad, el índice de sobrepeso representa la forma de operar de los transportistas bajo el enfoque de competencia y servicio directo, dejando de lado la operación integral donde se busca la coordinación entre operadores y mejore los servicios brindados.

3.2.5 Paraderos

De acuerdo con datos recabados por SIMUTRA y UABC, la red de puntos de ascenso y descenso (paraderos) en la ciudad de Mexicali alcanza un total de 1381, de estos 1174 (el 85%) son paraderos de tipo informal, es decir que no cuentan con infraestructura para realizar el ascenso y/o descenso de pasajeros, pero generalmente los usuarios lo utilizan con este propósito, o en el caso de contar con algún tipo de infraestructura puede tener cubierta o banca para esperar a que pase el transporte público, y la cual ha sido improvisada / patrocinada por alguna empresa. El otro 15% se refiere a 207 paraderos formales, los cuales cuentan con infraestructura necesaria para el ascenso y/o descenso de pasajeros.

Con lo anterior se puede mencionar que, en su mayoría, los paraderos son del tipo informal donde con el paso del tiempo los operadores fijan estos puntos en función de la necesidad de los usuarios. Además, se entiende que no haya una distribución equitativa en la mancha urbana, pues como se comentó con anterioridad las rutas no se encuentran distribuidas de esta forma, por el contrario, estas se alinean a los importantes centros industriales, laborales, educativos y comerciales de Mexicali.

Una vez obtenida las rutas y paraderos de la ciudad es posible determinar el área de cobertura espacial o potencial accesibilidad de los usuarios a la red de transporte público, la cual se muestra en la Tabla 12 y que fue calculada considerando un radio de 300 metros y 500 metros de los puntos de ascenso y descenso mencionados.

Tabla 52. Cobertura de los paraderos STP

	m ²	%
Área urbana considerada	208304951	100%
Cobertura de 500 m de radio del conjunto de paraderos	157201947	75.5%
Cobertura de 300 m de radio del conjunto de paraderos	107449848	51.6%

Fuente: UABC, 2019

Por otro lado, en la Figura 05 se aprecia la cobertura de los puntos de ascenso y descenso de la ciudad, la cual alcanza 51.6% para un radio de cobertura de 300 metros y 75.5% para un radio de 500. Cabe señalar que la ruta AT0408 “Portales” es la que mayor cantidad de puntos de ascenso / descenso registra con 108 en el sentido Periferia – Centro y 82 en el sentido de circulación Centro – Periferia, en contraste la ruta TC05-07 “Bella Vista” es la que cuenta con menor cantidad de puntos de ascenso / descenso registrados con 15 en el sentido Centro – Periferia y 11 en el sentido de circulación Periferia – Centro.

Figura 05. Cobertura de los paraderos STP



Fuente: UABC, 2019

3.2.6 Transporte de personal

Como es de esperarse en una ciudad fronteriza donde prevalece la actividad industrial, el transporte de personal representa un fenómeno importante a analizar en cuestión de desplazamientos dentro de la mancha urbana. Actualmente el servicio de transporte de personal es suministrado por once diferentes empresas privadas, las cuales brindan un servicio a 78 empresas dentro de la mancha urbana. Estas prestadoras del servicio cuentan con un parque vehicular de 1,213 unidades registradas para satisfacer un total de 411 rutas (IMOS, 2020). Según datos del Sistema Municipal de Transporte, el total de viajes del transporte de personal representa el 3.91% de los viajes diarios (equivalente a 80,269) que se suscitan en la ciudad. Este representa una opción de movilidad que responde a necesidades de una parte de la población de Mexicali que requieren traslados en horarios específicos en los que el servicio de

transporte público no está operando, o simplemente es un servicio que presta la empresa para apoyar los traslados de su personal y garantizar los tiempos de llegada a sus instalaciones.

3.3 Propuesta de reordenamiento

Con lo expuesto anteriormente se puede deducir que el estado actual de sistema sobrepone una operación ineficiente, que a su vez genera una disminución del uso del mismo, provocando el uso del automóvil particular para desplazarse dentro de la mancha urbana, Por otro lado, se puede mencionar que existen diversas áreas de oportunidad en materia de eficientización operativa, ampliación de cobertura y accesibilidad.

A pesar de esto, los estudios de movilidad en Mexicali son escasos y no se han llevado a cabo de una forma periódica, sin embargo, LOGIT en 2009 desarrolló el “Proyecto de modernización del sistema municipal de transporte con un sistema de autobuses rápidos troncales BRT” donde propuso migrar a un sistema troco-alimentado, creando carriles exclusivos. En la actualidad estos ya fueron construidos, sin embargo, apenas está en funcionamiento la LEXP-1.

Por otro lado, y más reciente tenemos el caso de la UABC que en 2019 realizó una propuesta para eficientizar el sistema de transporte colectivo público, a partir de la integración y operación de ejes troncales. Esta propuesta se llevó a cabo desde un enfoque geométrico, buscando optimizar la oferta mediante recorridos más eficientes para reducir costos operativos, y considerando una integración y operación conjunta de las distintas empresas transportistas. Como resultado se obtuvo una propuesta base conformada por 23 rutas, de las cuales 4 son troncales, 16 alimentadoras y 3 circuitos. El diseño de trazos de esta red permite atender de forma más eficiente las necesidades de movilidad de la población de la ciudad de Mexicali.

Para que este diseño sea eficiente requiere de la operación conjunta de los concesionarios, y que los ejes troncales sean alimentados por rutas alimentadoras y de tipo circuito, buscando que los usuarios puedan llegar a cualquier punto de la ciudad mediante la operación del transbordo. Para llevar a cabo esta propuesta de reordenamiento la UABC en 2019 definió los siguientes criterios para reestructurar el sistema:

Generales:

- Pasar del sistema radial y de servicio directo a un sistema tronco-alimentado, para disminuir tiempos de traslado.
- Disminuir los kilómetros de rutas transitando por vialidades terciarias.
- Trazos que promuevan la comunicación entre rutas.
- Operación conjunta de concesionarios.
- Brindar accesibilidad a los centros atractores.
- Prioridad al transbordo.
- Reestructuración a partir de las 41 concesiones de rutas existentes.

Específicos:

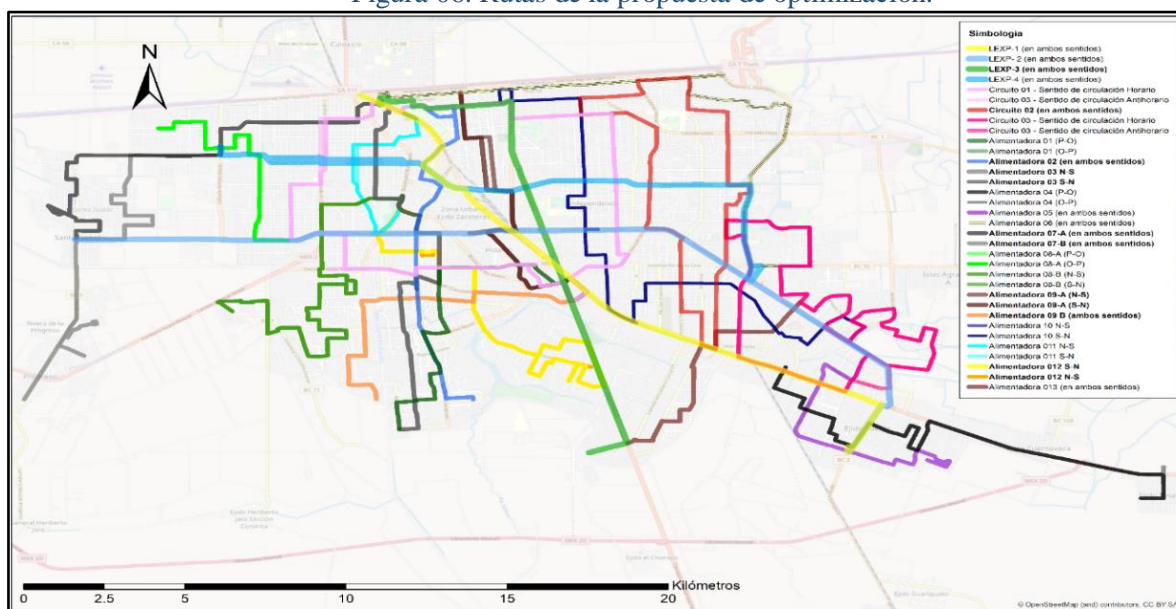
- Sinuosidad lo más cercana a 1 o ≤ 2 .
- Utilizar el concepto de circuitos para conectar rutas y alimentar ejes troncales.
- Definir la vocación de las rutas.
- Reducir el sobre piso.

- Evitar que el usuario recorra más de 500 metros caminando para abordar la ruta.

De acuerdo con los criterios establecidos con anterioridad se establece un escenario con la propuesta de optimización a partir de un diseño ideal del sistema, donde se busca obtener beneficios para los usuarios y operadores, considerando la estructura vial, las características de la oferta actual, las dinámicas de movilidad urbana, así como aspectos poblacionales que dictaran las necesidades del sistema.

Una vez obtenida la propuesta base, se inicia una etapa de análisis donde se analizan aspectos operativos y demográficos de la ciudad, con la finalidad de obtener certeza del impacto positivo de la propuesta base en la ciudad. Como resultado se obtuvo una propuesta base conformada por 23 rutas (ver Figura 06), de las cuales 4 son troncales, 16 alimentadoras y 3 circuitos.

Figura 06. Rutas de la propuesta de optimización.



Fuente: UABC, 2019

Cabe mencionar que esta propuesta de reordenamiento si entrega beneficios desde el punto de vista operativo. Posterior al análisis de datos; esta muestra aumento en el porcentaje de cobertura espacial, de un 92% al 96% respectivamente.

Tabla 6 Comparativa geométrica de escenarios

Indicador de servicio	Red existente	Red propuesta SIT			
	Promedio	Troncales	Circuitos	Alimentadoras	Promedio
Kilómetros totales	935.6	82	85.3	234.8	402.1
Factor de sinuosidad	1.77	1.25	1.37	1.88	1.70
Factor de sobre piso	75%	37.6%	33.7%	22.1%	26.3%

Fuente: UABC, 2019.

Tal como se exhibe en la Tabla 13 la red del transporte público actual en conjunto las 41 rutas concesionadas, suman un total de 936 kilómetros de trazo, distribuidos entre los principales atractores de viajes, sin embargo, la propuesta únicamente considera 402

kilómetros, logrando así reducir los kilómetros recorridos de los operadores en un 57%, permitiendo la reducción de los costos operativos y dando la posibilidad de mejorar las frecuencias de paso para beneficio de los usuarios.

Además, con relación al sobrepiso (SP) se logra una reducción cercana al 55%, ya que la red actual presenta un factor promedio del 75%, mientras que la propuesta de reordenamiento únicamente el 26.3% de sus trazos se sobreponen. De este modo se impacta de manera positiva en la eficiencia de la operación y del sistema en conjunto, pues se genera una traza más distribuida y específica para cada zona de la ciudad. Adicionalmente el factor de sinuosidad (FS) promedio pasa de 1.77 a 1.25 en troncales y 1.37 en circuitos, mientras que los recorridos sinuosos son llevados a cabo por rutas alimentadoras de recorridos menores. Cabe mencionar que la comparativa de los factores antes mencionados permite establecer criterios de aceptación de la propuesta, pues esta procura ganancias en la operación y eficiencia de la red y beneficios para el usuario. La Tabla 14 presenta un resumen de los datos mencionados para cada ruta que conforma la propuesta.

Tabla 7. Datos generales de rutas de propuesta SIT.

Ruta	Long. (km)	F. Sin.	F. Sob. (%)	Ruta	Long. (km)	F. Sin.	F. Sob. (%)
LEXP-01	20.2	1.17	48.5	Alimentadora 07-A	15.7	1.71	2.3
LEXP-02	26.3	1.22	38.2	Alimentadora 07-B	18.1	1.87	21.1
LEXP-03	16.8	1.29	32.3	Alimentadora 08-A	9.7	1.78	21.3
LEXP-04	18.7	1.27	31.3	Alimentadora 08-B	17.8	2.98	10.7
Circuito 01	31.9	1.29	36.4	Alimentadora 09-A	12	1.78	33.3
Circuito 02	25.9	1.25	21.5	Alimentadora 09-B	12.1	1.85	18.9
Circuito 03	27.5	1.57	43.4	Alimentadora 10	21.9	1.84	14.5
Alimentadora 01	12.8	1.99	47.2	Alimentadora 11	8.8	2.06	33.2
Alimentadora 02	12.9	1.34	30.6	Alimentadora 12	17.4	2.21	24.8
Alimentadora 03	15.3	1.48	31.7	Alimentadora 13	8.4	1.29	11.4
Alimentadora 04	16.8	1.62	5.9				
Alimentadora 05	10.8	2.25	10.3	Total	402.1		
Alimentadora 06	24.3	2.16	36.7	Promedio	17.5	1.7	0.263

**F. Sin. = Factor de Sinuosidad PROM.; F. Sob. = Factor de sobre piso promedio con otras rutas en trazo en al menos 100 metros. Longitud = Kilómetros promedio por sentido.*

Fuente: UABC, 2019

Además de considerar cambios en el trazado de rutas, esta propuesta de reordenamiento también considera la incorporación de los paraderos propuestos por la UABC (2019), donde propone nuevas zonas de transferencia, así como paraderos que sirvan de manera eficiente y priorice la disminución en tiempos de caminatas del usuario para acceder al sistema de transporte público. En esta propuesta se presentan 17 zonas potenciales de transferencia en donde todas tienen relación con 5 de los principales ejes viales de la ciudad: Bulevar Lázaro Cárdenas, Bulevar Adolfo López Mateos – Corredor Industrial, Bulevar Benito Juárez – Bulevar Justo Sierra, Bulevar Anáhuac y Calzada Independencia – Santa Isabel. Así mismo, el estudio propone un total de 1,528 paraderos propuestos para el SIT, de los cuales 1282 son utilizados por una sola ruta, mientras que el resto son compartidos por dos, tres e incluso cuatro rutas, tal y como se indica en la Tabla 15.

Tabla 8. Paraderos propuestos compartidos por rutas

Relación entre paraderos y rutas	Cantidad
Paraderos utilizados por una ruta	1282
Paraderos utilizados por dos rutas	219
Paraderos utilizados por tres rutas	26
Paraderos utilizados por cuatro rutas	1
Total de paraderos	1528

Fuente: UABC 2019

A continuación, se presenta un resumen de los paraderos para cada una de las rutas de la propuesta de reordenamiento, así como el espaciamiento promedio que oscila entre los 412.4 metros aproximadamente (Ver figura 16).

Tabla 9. Paraderos propuestos por rutas.

Ruta	Sentido 1			Sentido 2			Ambos sentidos de la ruta		
	Paraderos	Esp. prom. (m)	Km.	Paraderos	Esp. prom. (m)	Km.	Paraderos	Esp. prom. (m)	Km.
LEXP-01	39	484.7	19.7	41	462.9	19.7	80	473.8	39.4
LEXP-02	59	429	26.4	64	409	25.8	123	419.0	52.2
LEXP-03	36	455	16.8	34	477.5	16.8	70	466.3	33.6
LEXP-04	42	418.9	19.4	43	391.2	17.4	85	405.1	36.8
CIR-01	74	413.2	31.6	75	422.1	32.1	149	417.7	63.7
CIR-02	59	417.9	25.8	56	430.4	25.9	115	424.2	51.7
CIR-03	49	527	26.5	50	507.4	27.1	99	517.2	53.6
AL-01	33	377.5	12.4	29	372.1	11.1	62	374.8	23.5
AL-02	32	390.4	12.6	27	385.8	11.4	59	388.1	24
AL-03	42	353.1	15.3	42	344	15.1	84	348.6	30.4
AL-04	30	482.5	16.9	31	445.4	16.5	61	464.0	33.4
AL-05	24	407.4	10.6	29	379.3	11	53	393.4	21.6
AL-06	52	433.4	24	41	419.1	18	93	426.3	42
AL-07A	38	362.1	15.2	37	383.5	15.7	75	372.8	30.9
AL-07B	34	498.9	18.8	34	496.1	18.7	68	497.5	37.5
AL-08A	28	335	9.9	29	310.8	9.2	57	322.9	19.1
AL-08B	41	398.8	17	41	422.6	18.1	82	410.7	35.1
AL-09A	27	369.1	10.4	30	404.4	12.1	57	386.8	22.5
AL-09B	29	395.9	11.5	24	415.7	10.5	53	405.8	22
AL-10	58	354.3	21.2	55	359.6	20.2	113	357.0	41.4
AL-11	20	398	8.6	18	440.5	8.6	38	419.3	17.2
AL-12	42	417.3	18.2	37	435.8	17h	79	426.6	35.2
AL-13	23	363.4	8.3	21	376.7	8.1	44	370.1	16.4
Esp. Prom.	412.3 metros			412.7 metros			412.5 metros		

Fuente: UABC 2019

Cabe mencionar que lo expuesto anteriormente solo existe a manera de propuesta, por lo que aún es necesario llevar a cabo su implementación. Las rutas antes mencionadas solo existen a nivel de trazo, diseñadas desde un punto de vista de la oferta y buscando ampliar la cobertura del sistema de forma más eficiente, considerando un sistema integral y tronco-alimentado, para reducir costos operativos.

En este sentido, es necesario evaluar también como este reordenamiento del sistema de transporte público impactará en los usuarios. Para esto es necesario emplear técnicas de simulación, en donde se analice la interacción entre la oferta y la demanda, y se obtengan

indicadores promedio del sistema que permitan contrastar el estado actual contra escenarios propuestos.

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

Se plantea una metodología general que consta de la implementación de 7 elementos particulares, los cuales se muestran en la Figura 10. El primero de ellos es la caracterización de la población del área de estudio, esto con el fin de obtener el segundo elemento particular que es definir el modelo de generación de viajes diarios para nuestra zona de estudio; de este modo obtener el tercero que es la generación de viajes en transporte público durante el horario de máxima demanda del sistema de actual, y así continuar con el modelo de distribución de viajes, siendo este el cuarto elemento particular; el quinto es llevar a cabo la simulación del estado actual y asignar la demanda previamente obtenida; Posterior a ello, se considera un sexto elemento particular donde se lleva a cabo la simulación del escenario propuesto. Finalmente, el séptimo elemento considera una comparación de los resultados entre el escenario base y la propuesta de reordenamiento.

4.1 Caracterización de la población del área de estudio

En esta etapa del proceso se llevó a cabo un análisis desagregado de los resultados de la encuesta origen-destino del año 2018 llevada a cabo por la Universidad Autónoma de Baja California. Esta es una herramienta de recolección de datos en la ciudad, que recaba información sobre diversos sectores poblacionales, características sociodemográficas, ocupacionales, ubicación del origen y destino de los viajes de cada uno de los respondientes, además de considerar el horario de salida del origen y horario de llegada al destino. Por otro lado, considera el medio de transporte en el cual se lleva a cabo el viaje.

En este análisis se obtuvieron datos relevantes sobre la distribución poblacional, medio de transporte utilizado, desagregado por sectores sociales, entre otros datos útiles para posteriores análisis. Durante este proceso se tomaron en cuenta un total de 3,915 encuestas aplicadas.

Para definir las características principales de la población perteneciente al área de estudio se consideró una zonificación en dos niveles:

- Partición del área de estudio en 22 de Macro- zonas (MZ), para análisis de resultados de encuesta y modelo de generación de viajes. Las MZ se definen buscando homogeneidad en marginación urbana y accesibilidad a vialidades primarias.
- Partición de las MZ, hasta obtener 100 zonas en nuestra área de estudio, utilizadas en el modelo de demanda de la ciudad de Mexicali (UABC 2019) para distribución de viajes en transporte público y asignación de los mismos.

Con la finalidad de obtener datos actualizados a la fecha que aporten mayor certeza a los resultados de la investigación, se llevó a cabo una proyección poblacional para cada una de las cuatro localidades que comprenden el área de estudio (Mexicali, Santa Isabel, Valle de Puebla y Progreso).

Tomando en cuenta datos de los censos INEGI 2000, 2010 y la proyección 2018 de CONAPO, se utilizó una función exponencial de crecimiento para finalmente obtener los datos esperados. De acuerdo a la información oficial del censo del 2010 y la proyección para 2020, la población incrementó el 15.1%. Posterior a este dato y con la finalidad de obtener la población por zonas, este incremento se asignó de manera proporcional al área de crecimiento urbano en la última década reportado por el IMIP. De este modo se obtuvo una proyección al año 2020, que permitió obtener el número de habitantes para cada una de las 100 zonas que comprenden el área de estudio.

De acuerdo con lo expuesto por Ortúzar (2012), se llevó a cabo una clasificación poblacional que consta de tres grupos principales: el primero está enfocado al sector poblacional que se dedica exclusivamente a trabajar, el segundo grupo es el sector con dedicación exclusiva al estudio y, por último, el tercer grupo que es todo aquel sector desempleados o dedicación al hogar. Esto con la finalidad de obtener resultados más desagregados y útiles para posteriores etapas de la investigación.

4.2 Modelo de generación de viajes diarios en Mexicali

4.2.1 Producción de viajes diarios

Se llevó a cabo un análisis desagregado de los resultados de la encuesta origen-destino del año 2018 llevada a cabo por la Universidad Autónoma de Baja California, donde se consideró el origen y el destino de los viajes para cada zona. Cabe mencionar que este análisis de distribución modal, se llevó a cabo desde dos enfoques: el primero es considerando la cantidad de usuarios por modo de transporte y el segundo: considerando la cantidad de viajes realizados por los usuarios para cada uno de los modos de transporte, estos a continuación se mencionan:

i. Considerando modo de transporte

Para definir la partición modal de la población por modo de transporte para el área de estudio, se tomaron en consideración un total de 3,128 encuestas de las cuales se consideró hasta 7 viajes distintos por encuesta, con sus respectivos modos de transporte para cada uno de los viajes realizados.

Posterior a ello se desagregó por cada uno de los tres grupos poblacionales considerados y se obtuvo el porcentaje de modo de transporte para cada una de las cien zonas.

Una vez definido el valor porcentual de cada modo de transporte por zonas, se procedió a aplicar este al total de la población de cada grupo por zona para obtener el total de usuarios por cada modo para cada una de las zonas.

ii. Considerando número de viajes promedio

Para definir la producción de viajes diarios se procesan los resultados de la encuesta UABC para obtener el porcentaje de usuarios de cada modo de transporte en cada una de las 22 MZ. Posteriormente se multiplica dicho porcentaje por el total de población de cada MZ para obtener el total de usuarios de cada modo en cada una de las 22 MZ. Posteriormente se aplica el método de clasificación cruzada o categorías para obtener tasas de producción de viajes diarios a partir de los resultados de la encuesta UABC. Considerando que las MZ son homogéneas en términos de marginación urbana, variable directamente relacionada con las características de movilidad de las personas, el método de clasificación cruzada o categorías se aplica considerando tres variables: tipo de persona (3), medio de transporte principal (10), y MZ de residencia (22).

Así, el método de clasificación cruzada fue aplicado de la siguiente forma:

$$t^m(mz) = T^m(mz)/p^m(mz)$$

donde $t^m(mz)$ es el tasa de producción de viajes en modo de transporte “m”, por personas residentes de la macrozona “mz”, en un día; $T^m(mz)$ corresponde a la suma de los viajes observados en modo de transporte “m”, realizados por residentes de la macrozona “mz” en el periodo de tiempo analizado; por último, $p^m(mz)$ es el total de personas “p” residentes de la macrozona “mz” que utilizan el modo de transporte “m” y que fueron observadas o reportadas en la base de datos.

Se aplica la tasa de generación a la población usuaria de cada modo en cada MZ y se suman para obtener el total la partición modal de viajes diarios de Mexicali en todos los modos de transporte. Así, una vez obtenidas las tasas de producción para cada clasificación, se debe llevar a cabo la agregación para obtener el total de producción por zona, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$O_{mz} = \sum_m P^m(mz)t^m(mz)$$

donde O_{mz} es el total de viajes producidos en la macrozona “mz”, $t^m(mz)$ es la tasa de producción de viajes en modo de transporte “m”, por personas residentes de la macrozona “mz”, y $P^m(mz)$ es el total de personas usuarias del modo de transporte “m” residentes de la macrozona “mz”, el cual se obtuvo multiplicando el porcentaje de usuarios identificado en la encuesta por la población de cada macrozona obtenida en la proyección previamente realizada.

Finalmente, se agregaron los resultados de las tres clasificaciones de población, para obtener la cantidad de viajes diarios en cada modo de transporte de todo el caso de estudio. Es

preciso mencionar que una vez definida la cantidad de viajes por zonas se obtuvo el valor porcentual de cada una de ellas y posteriormente se aplicó al total de viajes realizados en un día reportado por SIMUTRA (121,584 viajes), de este modo, al finalizar esta etapa ya se contaba con la distribución de viajes en pares O-D de los viajes realizados en un día.

4.2.2 Atracción de viajes diarios

Para definir la atracción de viajes se parte de la atracción de viajes diarios de las 100 zonas reportada en estudio UABC 2019. Esta atracción fue calculada de acuerdo a los factores de atracción de viajes indicados en el trabajo de Sperry, Chigoy, Green y Hard (2016) denominado “Development of Improved Trip Attraction Rates for Small and Medium-Sized Travel Demand Models”.

Los factores de atracción de viajes utilizados en el estudio 2019 consideran el tipo de actividad de todas las unidades económicas (UE) reportadas por DENU, así como el tipo de área en donde se encuentra ubicada la misma sin embargo, los factores del estudio de Sperry et al. se aplican a la cantidad de empleados de cada UE, esto representa una limitante en México, ya que DENU no entrega la cantidad de empleados exactos, solo rangos, por lo que en UE con una cantidad mayor a 100 empleados el resultado puede variar demasiado de la realidad. Por ello, se utilizó el Texas Trip Generation Manual (Texas Department of Transportation, 2014), donde se calcula la atracción de viajes particular de cada uno de los establecimientos de más de 100 empleados considerando la superficie de cada uno de estos. Posteriormente se ajustan los viajes atraídos en cada una de las zonas reportados en el modelo de demanda.

4.3 Generación de viajes en transporte público en horario pico

4.3.1 Identificación de horario de máxima demanda

Durante esta etapa se consideraron datos de referencia con respecto al horario de máxima demanda del transporte público en la ciudad. Tal es el caso de lo expuesto por el Instituto de Movilidad Sustentable que plantea los horarios pico del transporte público en los siguientes intervalos de tiempo: de las 6:15 a las 8:00 y de las 16:00 a las 17:30. Por otro lado el Plan maestro de movilidad y transporte de Mexicali, B. C Menciona que el horario de máxima demanda es de las 7:15 a las 8:15 AM.

En este sentido, se llevó a cabo un análisis desagregado de los resultados de la encuesta Origen- Destino, UABC (2018), donde se tomaron en consideración los horarios de salida del origen y la llegada al destino de cada uno de los viajes realizados por el usuario. Después se establecieron intervalos de tiempo y se contabilizaron cada una de las respuestas en el intervalo correspondiente para de este modo obtener el valor porcentual mayor. En un principio se consideraron intervalos de una hora, sin embargo, después de obtener estos datos y con la finalidad de contar con resultados más homogéneos, se decidió aumentar periodos de 2 horas por intervalo. Se tomaron en consideración un total de 10,436 respuestas de viajes entre zonas, de los cuales 5,193 corresponden a viajes atraídos y 5,243 a viajes generados.

4.3.2 Producción de viajes en TP en HP

La partición modal entrega viajes diarios en todos los modos de transporte realizados por residentes de las distintas MZ de Mexicali. Estos se contrastan con los viajes en TP obtenidos en la partición modal con los viajes reportados por SIMUTRA y al no existir diferencias significativas, los viajes producidos diariamente en transporte público resultado del análisis de partición modal se ajustan de manera proporcional para que la suma en dicho modo entregue los 121,584 viajes diarios indicados por SIMUTRA. Una vez definido se separan los viajes de las 22 MZ del transporte público, para posteriormente subdividir el número de viajes resultantes entre cada una de las zonas que conforman la MZ. De este modo se obtuvo el número de viajes para cada zona una de las 100 zonas en función del porcentaje de viajes que estas representan dentro de su MZ a la que pertenecen.

Ya que los viajes diarios obtenidos están en función de tasas de generación de viajes, las cuales a su vez se obtienen en función del modo de transporte analizado, del tipo de dedicación de la población (trabajo/estudio/hogar), y de zonas homogéneas en términos de marginación urbana y accesibilidad a la red vial primaria, es entonces posible ajustar el total de viajes diarios en TP de manera proporcional en cada una de las 100 zonas para obtener los viajes producidos en cada zona en horario pico.

El ajuste de las producciones de viajes diarios en TP a viajes en HP en TP se hace a través de dos consideraciones y posteriormente los resultados se suman.

- i. Viajes TP dentro del HP con origen en el hogar del usuario.

Para conocer cuántos viajes en TP realmente salen del hogar durante el HP, se analiza la zona de residencia de los usuarios, y el origen de los viajes reportados en la encuesta durante el periodo de máxima demanda, para cada una de las encuestas analizadas y se identifica el % que realmente sale del hogar. Posteriormente se aplica el porcentaje correspondiente (78.15%) a los viajes totales del TP en HP (26,842.62), obteniendo 20977.84 viajes en TP en HP que realmente salen de casa. Estos se ajustan a la producción que suma 121 mil de manera proporcional, para que la suma represente el total de viajes TP HP saliendo de casa (20,977.87).

- ii. Viajes TP dentro del HP que NO salen de casa

Los viajes restantes, son todos aquellos viajes en TP durante el HP que tienen como origen algún lugar que No es el hogar del usuario. Estos equivalen a 5,864.77 (Se obtiene de restar el total de los viajes menos los viajes con origen en el hogar: 26,842.616-20,977.84). Estos 5,864 viajes se distribuyen de manera proporcional entre las 100 zonas, considerando la distribución y tamaño de las unidades económicas en la ciudad, es decir, el nivel de atracción de viajes obtenido en el modelo general de la etapa anterior (esto ya que como son viajes que NO salen de casa, entonces deben de salir de otro sitio en donde ya realizaron alguna actividad,

y la distribución de estas actividades está directamente relacionada con la atracción de viajes original obtenida de DENUÉ).

Una vez definido los dos tipos de viajes para cada zona, se suman ambas columnas y se obtienen los viajes producidos por zona en TP durante el HP, considerando los que salen de casa y los que no (estos suman un total de 26,842.616 viajes, que será un insumo necesario para cargar a VISUM).

4.3.3 Atracción de viajes en TP en HP

El modelo de generación diario entrega los viajes totales atraídos en un día a cada zona, considerando la distribución, características y tamaño de las distintas UE de la ciudad, por lo tanto, la distribución de viajes en TP hacia las distintas zonas se comporta igual. En este sentido, la atracción de viajes a cada una de las 100 zonas se ajusta de manera proporcional considerando su peso en el total de viajes diarios, para que la suma total entregue los 26,842.616 viajes en TP durante el HP.

4.4 Modelo de distribución de viajes

4.4.1 Distribución de longitudes de viaje

Una vez definido la cantidad de viajes dentro del horario de máxima demanda y desagregado por zonas, se obtuvo la distancia entre el origen y el destino de los viajes para cada par O-D. Este criterio muestra que la población tiene en promedio desplazamiento al orden de 0.3 y 3 kilómetros por viaje, con un total de 27.33% de los viajes entre estas distancias, cabe mencionar que esta distribución de longitudes de viajes, representa un insumo valioso de información utilizado para calibrar el modelo de distribución de viajes (OD), dentro del modelo de la oferta actual del sistema de transporte público.

4.4.2 Método Kalibri para estimar función de utilidad de modelo gravitacional

El software Visum permite la calibración del modelo mediante diferentes funciones de utilidad, empleando parámetros (a, b y c) que después del análisis de datos se le asignará un valor a cada incógnita, misma que servirá como insumo de información para la etapa de la distribución de viajes. En esta ocasión, por disponibilidad de datos se decidió utilizar como datos de entrada para realizar la calibración del modelo, las distancias de viajes promedio obtenidos a partir del punto 4.3.4.

$$f(ux_{ij}) = a * u_{ij}^b * e^{c-u}$$

dónde:

ux_{ij}	Valor de utilidad (Por ejemplo distancia de recorrido o tiempo de viaje), entre zona i y j
a, b y c	Parámetros a estimar por el software

En síntesis, la función Kalibri ajusta estas funciones de utilidad a una distribución de longitud de viajes determinada, para posteriormente calcular el flujo del tráfico (de zona a zona) y obtener las distancias de los viajes del modelo. Finalmente, esto es para obtener un punto de comparación entre los datos obtenidos de las bases de datos consultadas y los datos de salida del software, de este modo se determina la certeza del modelo y se define el nivel de calibración que se estará utilizando.

4.4.3 Modelo gravitacional y obtención de matriz OD 100x100

El modelo gravitacional, es un modelo matemático para el cálculo de la distribución de viajes. Se basa en el supuesto de que los viajes realizados en un área de planeación son directamente proporcionales a la demanda de origen y destino relevante en todas las zonas y los valores funcionales de la función de utilidad entre las zonas (Ortúzar 2001).

El modelo gravitacional trabaja con parámetros de distribución, por lo tanto, con valores dentro de la función de utilidad (distancia entre pares OD), que analiza la reacción de los usuarios de la vía a las relaciones de distancia o tiempo. Estos parámetros se determinan comparando la demanda por par OD que surge del modelo, con la demanda contada por par OD (calibración).

4.5 Simulación del estado actual

4.5.1 Modelación de oferta actual

Durante la elaboración del modelo de oferta del sistema de transporte público actual, se inició con una versión base elaborada por Sánchez Atondo et al (2017), el cual se llevó a cabo en el software con licencia PTV Visum. Este contaba con datos sobre vialidades (Número de sentidos, velocidad de operación, velocidad máxima, número de carriles y capacidad vial), intersecciones o nodos (Giros permitidos, giros prohibidos, y tipo de intersección), conexión de vialidades, puntos de parada obligatorio, paraderos y áreas de parada, entre otros datos.

A partir de este se llevaron a cabo las modificaciones necesarias de los elementos antes mencionados para representar el sistema del transporte público actual de la mejor manera posible y permitir el trazado de las rutas actuales. Este modelo cuenta con los siguientes elementos que permitirán hacer los cambios necesarios en los trazos con la finalidad de obtener un segundo escenario con las rutas de la propuesta de optimización de la UABC y los paraderos oficiales proporcionados por SIMUTRA (Ver tabla No. 17).

Tabla 10. Modelo de la oferta vial.

Elemento	Cantidad
Nodos	787
Conectores	828
Zonas	100
Vialidades	2,298

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Asignación

La asignación de viajes entre rutas se hizo con el proceso “headway-based assignment”, el cual es ideal para redes urbanas, donde se llevan a cabo avances cortos, se planea a largo plazo y exista coordinación horaria nula entre operadores del sistema

Esta asignación proyecta la elección de ruta de los usuarios del sistema a partir de impedancias que toman en cuenta la distancia de viaje, el tiempo de caminata de los usuarios hacia algún paradero, el costo del viaje, los tiempos de espera, y el tiempo total del viaje. Para el procedimiento “headway-based assignment”, el perfil de tiempo es el principal elemento a considerar para la elección de viajes por ruta, ya que el modelo está basado en el avance por los perfiles de tiempo.

En este procedimiento de asignación las rutas operan con un mismo avance para cada una de las secciones que comparten, y se llega al equilibrio mediante tres pasos operativos: El primero es el Cálculo de avances que considera a los tiempos de operación de las rutas del sistema de transporte público, donde automáticamente se detectan las frecuencias y se toman en consideración. El segundo es la búsqueda y elección de ruta donde detecta las posibles rutas entre un par de zonas y se especifica una distribución entre ellas, considerando los datos antes mencionados. Por último, la asignación de la demanda es el tercer paso, aquí las rutas que se encontraron en la búsqueda se cargan con la demanda asignada para posteriormente realizar las evaluaciones de la asignación.

Cabe mencionar que la demanda de viajes en transporte público obtenida anteriormente se asigna a la oferta modelada, utilizando el proceso headwayy asiggment, con los siguientes parámetros:

- El horario que se asigna en el modelo es de 06:00:00 a.m. – 08:00:00 a.m. ya que es el horario de máxima demanda en el día.
- La espera máxima de una ruta de transporte es de 30 min.
- El tiempo máximo de caminata es de 20 min.
- Cada zona cuenta con al menos 4 conectores
- El costo por viaje es de \$15.50 pesos y el transbordo es de \$15.50 pesos.
- Se consideraron 19 rutas que operan actualmente (antes de la pandemia, es decir, a inicios de año 2020).

Una vez definida la asignación de viajes, se realizó una evaluación parcial del sistema de transporte público actual, en donde se tomaron en consideración los promedios del tiempo total de traslado, distancia del viaje y numero de trasbordos realizados. Estos datos se obtuvieron mediante la asignación previa, para considerarlos como indicadores del estado actual, de tal modo sirvan como valores de referencia y poder llevar a cabo una comparativa con el escenario propuesto.

4.5.3 Indicadores

Posterior a llevar a cabo la asignación, se realizó una evaluación parcial del escenario actual, en donde se tomaron en consideración los principales indicadores obtenidos en función a las recomendaciones encontradas en la literatura. Zegras (2006) comenta que los indicadores de transporte son un componente crítico para la “planeación del transporte basada en desempeño”, ya que están muy ligados a los criterios de evaluación para la toma de decisiones. Cabe señalar que los indicadores fueron obtenidos a partir las recomendaciones encontradas en la literatura y que fue posible obtenerlos en la simulación, considerando las características y nivel de detalle del modelo construido/generado. En este sentido, fue posible lograr los siguientes indicadores:

- Promedios del tiempo total de traslado.
- Distancia de caminata por parte del usuario, hasta acceder al sistema de TP.
- Numero de trasbordos realizados.

Por otro lado, cabe mencionar que, gracias a la asignación previa realizada, fue posible obtener los indicadores antes mencionados, ya que esta asignación define el comportamiento de los usuarios en el modelo.

4.6 Simulación de escenario propuesto

4.6.1 Propuesta de frecuencias

Posterior a tener el modelo de la propuesta de reordenamiento se propuso las frecuencias de operaciones de cada una de las 22 rutas que la componen. Se propusieron tomando en consideración los siguientes pasos:

- Identificación de las rutas en operación que se traslapan con las rutas de la propuesta de reordenamiento.
- Obtener el valor porcentual de la cantidad de kilómetros de vialidades compartidas por sentido, para cada una de las rutas de la propuesta.
- Obtener la relación de la frecuencia que aporta cada una de las rutas en operación del sistema actual, mediante la multiplicación del porcentaje de traslape por la frecuencia de operación en horario de máxima demanda.
- Realizar una sumatoria ponderada de cada una de las rutas que se traslapan con las rutas de la propuesta para finalmente obtener el valor resultado

4.6.2 Modelación de oferta propuesta

En esta etapa se partió del modelo de la oferta del sistema de transporte público previamente generado. Durante este paso se generó un escenario 2 denominado “propuesta”, en el cual se llevaron a cabo las modificaciones necesarias que representaran a la propuesta de reordenamiento de mejor manera. Estas modificaciones fueron las siguientes:

- Trazado de las nuevas rutas de transporte público de la propuesta de reordenamiento y eliminación de las anteriores.
- Configuración de frecuencias a las nuevas rutas trazadas.
- Eliminación del costo de trasbordo.
- Restricción de los puntos de ascenso y descenso de usuarios.

Además de estos ajustes en el modelo de la propuesta, cabe mencionar que únicamente se consideraron los puntos de ascenso y descenso definidos en el estudio de “Asesoría para el diseño de red de paraderos del sistema de transporte público colectivo de Mexicali, B.C” realizado por la UABC/ SIMUTRA, en el cual solo considera un total de 1,154 puntos de ascenso y descenso para satisfacer las necesidades de todo el sistema de transporte público.

4.6.3 Asignación

Al igual que el escenario base, esta asignación de viajes entre rutas se hizo con el proceso “headway-based assignment”, que permite llevar a cabo el software PTV Visum el cual es ideal para redes urbanas, donde se llevan a cabo avances cortos, se planea a largo plazo y exista coordinación horaria nula entre operadores del sistema. Como se mencionó en el apartado 4.5 hubo diferencias significativas durante la asignación del escenario propuesto, principalmente hubo cambios en algunos parámetros previamente establecidos, tales como: frecuencias y costo de trasbordo nulo.

Además, la demanda de viajes en transporte público obtenida anteriormente se asigna a la oferta modelada del escenario propuesto, utilizando el proceso headwayy asiggment, con los siguientes parámetros:

- El horario que se asigna en el modelo es de 06:00:00 a.m. – 08:00:00 a.m. ya que es el horario de máxima demanda en el día.
- La espera máxima de una ruta de transporte es de 30 min.
- El tiempo máximo de caminata es de 20 min.
- Cada zona cuenta con al menos 4 conectores
- El costo por viaje es de 15.50 pesos y el transbordo es de 0.00 pesos.
- Se consideraron 22 rutas propuestas

4.6.4 Indicadores

Posterior a llevar a cabo la asignación, se realizó una nueva evaluación parcial del escenario propuesto, en donde se tomaron en consideración los principales indicadores obtenidos en el escenario actual. En este sentido, se obtuvieron los siguientes indicadores:

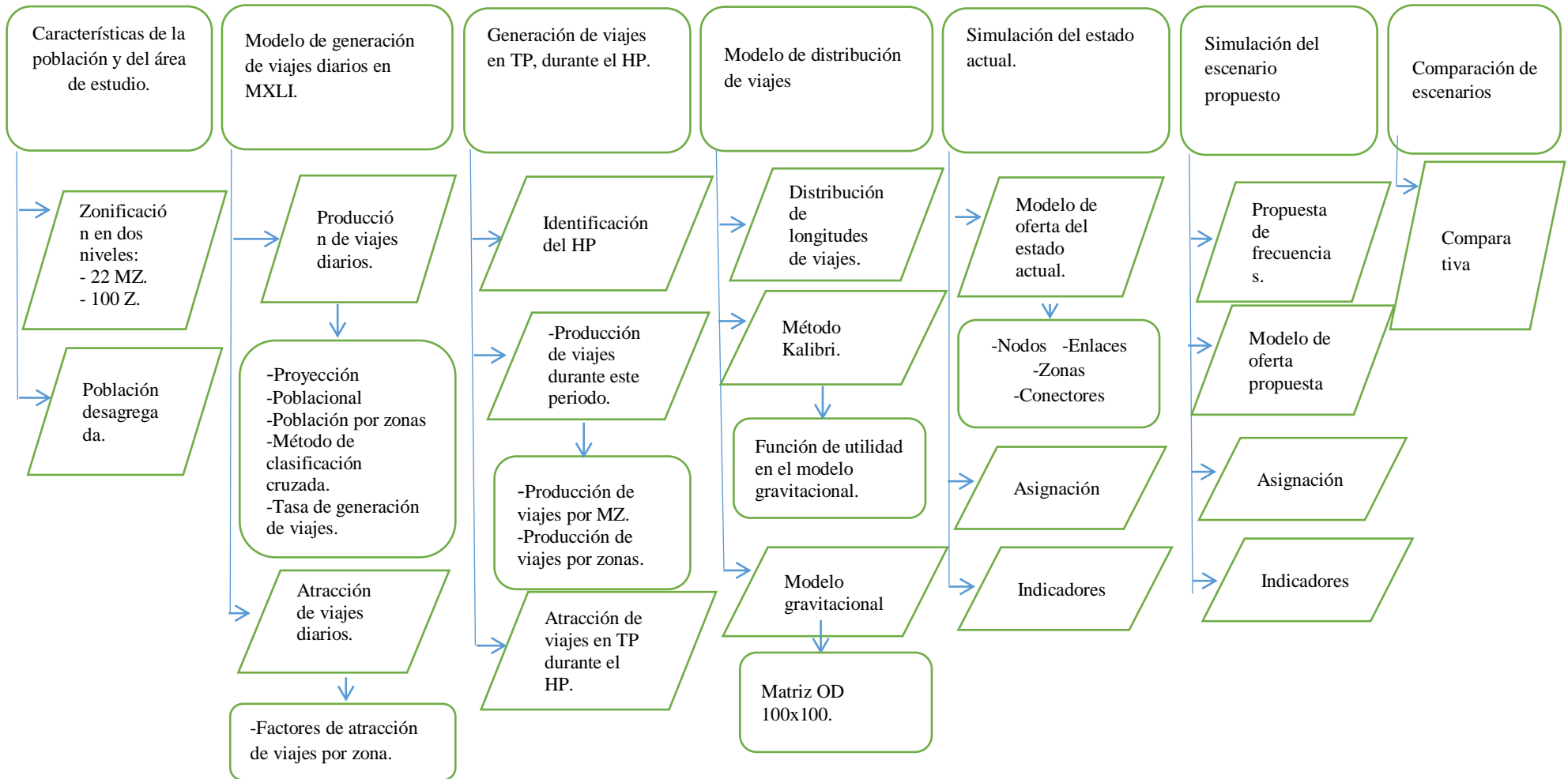
- Promedios del tiempo total de traslado.
- Distancia de caminata por parte del usuario, hasta acceder al sistema de TP.
- Numero de trasbordos realizados.

Por otro lado, cabe mencionar que, gracias a la asignación previa realizada, fue posible obtener los indicadores antes mencionados, ya que esta asignación define el comportamiento de los usuarios en el modelo.

4.7 Comparación de escenarios

Una vez obtenido los indicadores del escenario base y del escenario propuesto, se realizó un análisis comparativo en donde se exhiben las diferencias en eficiencia entre un modelo y otro. Aquí se exhibe que la propuesta de trazos del Sistema Integrado de Transporte (SIT) respecto a la red actual entrega beneficios que impactan en la eficiencia operativa del sistema y disminuye los tiempos de traslado

Figura 07 Metodología del análisis.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

5.1 Caracterización de la población del área de estudio

El análisis de los resultados obtenidos en este apartado, permitió obtener una proyección poblacional actualizada para cada una de las regiones y zonas que conforman el área de estudio (857,841 habitantes al año 2020). Además, se obtuvo una visión sobre las dinámicas de movilidad urbana que se desarrolla en la actualidad, en donde la mayoría de los viajes se realizan en automóvil como conductor (60.9%), seguido del transporte público.

Por otro lado, se obtuvieron la cantidad de viajes realizados en transporte público en un día dentro de la ciudad de Mexicali (121,584 viajes en un día), distribuido entre las cien zonas que la conforman, con una media de 1,021.26 viajes por zonas.

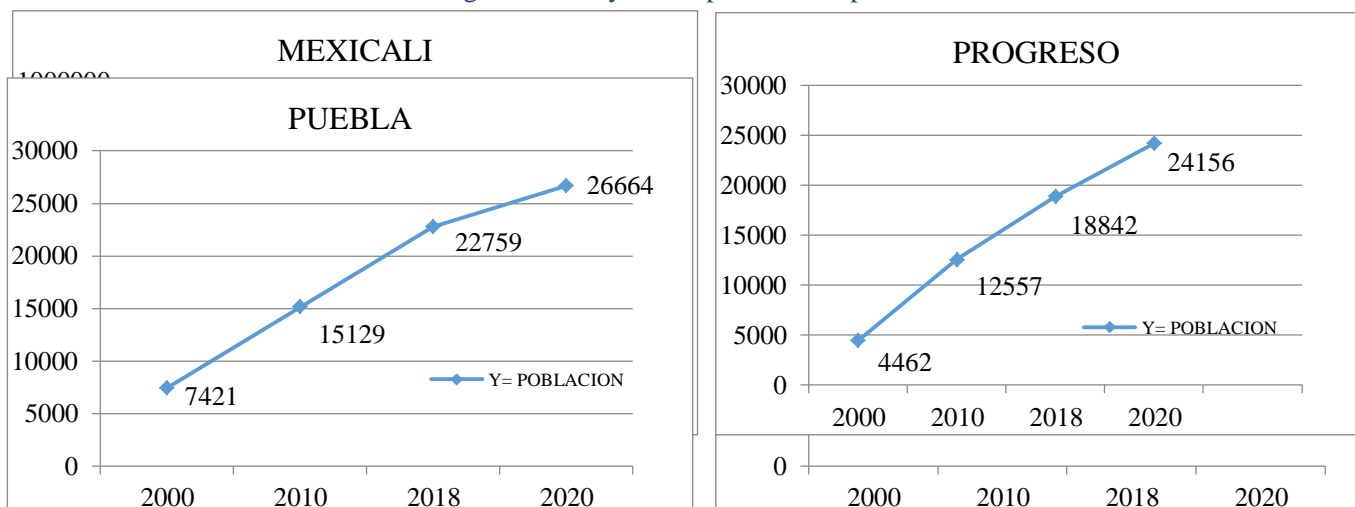
Además, se obtuvo que durante el periodo de máxima demanda para el transporte público (06:00 a las 08:00 AM), se realiza un total del 22.08% de los viajes durante este periodo, es decir, 26,842.62 viajes. Finalmente, se obtuvo una distribución de viajes desagregado por zonas, para el periodo de análisis, correspondiente al de máxima demanda.

5.1.1 Zonificación en dos niveles y población desagregada

Es preciso mencionar que las particularidades de la zona de estudio orillaron a generar una Macro-zonificación de esta, con la finalidad de facilitar el manejo de información. Esta se lleva a cabo de manera homogénea, donde las particularidades de la población llegaran a ser similares en promedio al resto. Por otro lado, se consideró el Índice de Marginación Urbana, el cual nos brinda una característica del desarrollo de los habitantes para cada zona en específico. Se obtuvieron 22 Macrozonas con características similares entre cada una de ellas. Posteriormente, se obtuvo una nueva Sub-zonificación del área de estudio, la cual permitió establecer 100 nuevas áreas, con características similares a las anteriores.

En este sentido, después de generar la Macro- Zonificación y la sub-zonificación se llevó a cabo una proyección al año 2020, del número de habitantes para cada una de las cuatro localidades que comprenden el área de estudio (Mexicali, Santa Isabel, Valle de Puebla y Progreso), Ver figura 08.

Figura 08. Proyección poblacional por localidades.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información oficial del censo de INEGI, realizado en el 2010 y la proyección realizada en esta investigación para 2020, la población incrementó el 15.1%. El análisis de resultados permite mostrar la cantidad de habitantes por localidades, macrozonas y zonas a partir de estimaciones para el año 2020, donde resultó un total de 857,841 habitantes distribuidos entre las 4 localidades principales del municipio de Mexicali, Baja California, tal como se muestra en la Tabla No. 18.

Tabla 11. Total, de Habitantes por localidad.

LOCALIDAD	TOTAL POBLACIÓN
MEXICALI	762964
SANTA ISABEL	46072
PUEBLA	25607
PROGRESO	23198

Fuente: Elaboración propia.

Con la finalidad de obtener en número de habitantes por zonas, este incremento se asignó de manera proporcional al área de crecimiento urbano en la última década reportado por el IMIP. De este modo se obtuvo una proyección de habitantes al año 2020, desagregado por las 100 zonas que conforman el área de estudio. En la Tabla No. 19 muestra estos datos, en donde se observa una media de 6,118 habitantes por zona. La zona con mayor número de habitantes es la que corresponde al número 4 con 25,875 pobladores, y la de menor número es la que corresponde a la zona 52 con apenas 71 habitantes.

Tabla 12. Total, de Habitantes por zonas.

Zona	POBLACIÓN TOTAL 2020	Zona	POBLACIÓN TOTAL 2020	Zona	POBLACIÓN TOTAL 2020	Zona	POBLACIÓN TOTAL 2020
1	22159	26	4687	51	895	76	1395
2	8224	27	7357	52	71	77	4108
3	15689	28	14136	53	7544	78	22683
4	25875	29	5033	54	2675	79	5102
5	15036	30	13788	55	10314	80	1679
6	7556	31	10246	56	9638	81	5147
7	21093	32	9324	57	11560	82	862
8	12154	33	5130	58	14004	83	2960
9	13514	34	730	59	9346	84	1477
10	18221	35	4491	60	5298	85	13222
11	14451	36	4273	61	12560	86	15800
12	4658	37	10123	62	14225	87	10434
13	6271	38	5038	63	7762	88	18504
14	2751	39	5909	64	13441	89	8170
15	1606	40	2503	65	11353	90	15832
16	4433	41	1777	66	9047	91	7872
17	504	42	9706	67	9568	92	20594
18	1364	43	11282	68	1760	93	13435
19	1015	44	13316	69	3623	94	23778
20	5611	45	7799	70	4216	95	23198

21	7304	46	2554	71	8760	96	2602
22	2092	47	9258	72	9671	97	11577
23	2731	48	16240	73	3931	98	4142
24	5933	49	5784	74	5390	99	14611
25	3103	50	7132	75	3883	100	7156

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Modelo de generación de viajes diarios en Mexicali

5.2.1 Producción de viajes diarios

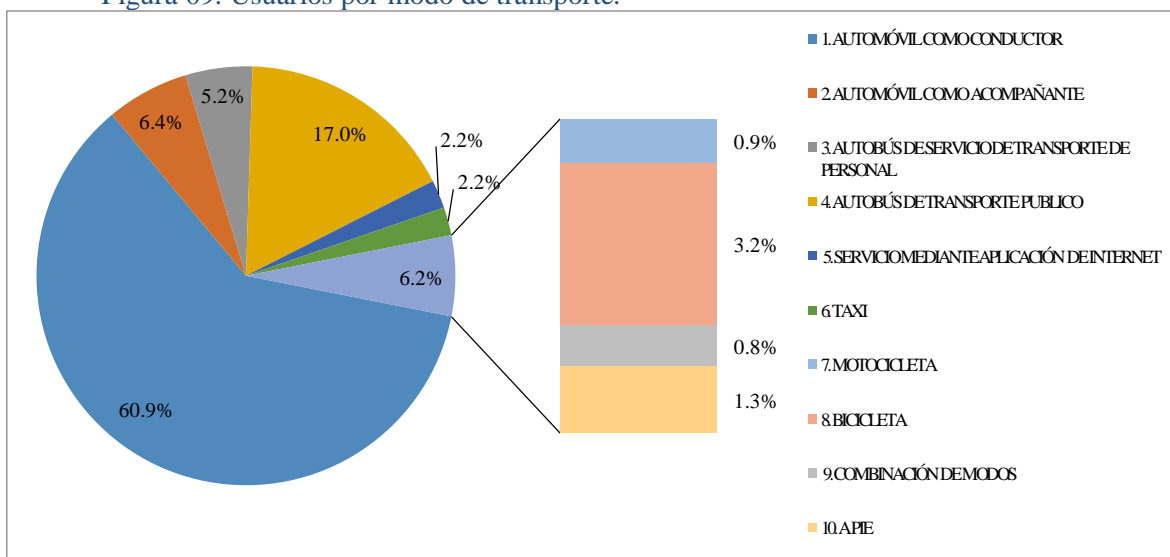
Para definir la producción de viajes diarios de la ciudad de Mexicali primero se analizaron valores de referencia, con lo cual se obtuvo por parte del Sistema Municipal de Transporte (SIMUTRA) la cantidad de usuarios diarios del sistema de transporte público, donde se señala un total de 121,584 viajes en un día. Por otro lado, se definió la partición modal actualizada a partir de una evaluación de datos provenientes de la encuesta origen-destino del año 2018 llevada a cabo por la Universidad Autónoma de Baja California.

i. Considerando modo de transporte

Cabe mencionar que la distribución modal se llevó a cabo desde sus dos enfoques posibles, considerando el número de usuarios para cada uno de los modos de transporte que se utilizan en la ciudad (Fig. No. 09). Esta permite identificar que la distribución modal es variable, ya que en algunas zonas el autobús de transporte público es utilizado por menos del 12%, mientras que en otras este valor es cercano al 20%. Resalta también que el porcentaje de personas que se desplazan la mayoría de las veces en medios no motorizados es más elevado en las zonas periféricas del sur, sureste y poniente de la ciudad, en donde más del 4.5% de la población se desplaza a pie o en bicicleta.

Los resultados de la encuesta indican que, de los 857,841 habitantes, únicamente cerca del 17.04% se desplaza dentro de la ciudad en transporte público, mientras que casi el 67.22% lo hacen en vehículo particular, seguido del uso de transporte de personal con un con un 5.2%.

Figura 09. Usuarios por modo de transporte.



Fuente: Elaboración propia

ii. Considerando número de viajes promedio.

Posteriormente se obtuvo la producción de viajes realizados por habitantes de cada una de las zonas mediante el método de clasificación cruzadas o categorías. En este sentido, a partir de la base de datos de la encuesta OD 2018, se obtuvieron para las tres clasificaciones de población las tasas de generación de viajes diarios en los distintos modos.

Las tasas de generación de viajes se aplicaron a la cantidad de usuarios de cada modo y cada zona. Finalmente, se agregaron los resultados de las tres clasificaciones de población, para obtener la cantidad de viajes diarios para cada una de las zonas que conforman el área de estudio, donde se obtuvo un total de 2044058 viajes diarios en todos los modos de transporte considerados (ver Tabla 20).

Tabla 13. Viajes diarios por modo de transporte.

MACRO ZONA	MODO DE TRANSPORTE										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A	100578	7697	12841	10317	1781	3914	3118	6020	395	1976	148635
B	112979	5783	10185	9993	1249	2709	1607	5853	988	891	152237
C	50902	8660	1772	7013	1268	1970	408	790	288	506	73577
D	68792	4092	1797	10881	1426	969	948	1425	567	449	91348
E	89848	7620	8975	7253	969	1396	543	2150	322	585	119660
F	31012	1829	351	2435	503	244	66	426	176	176	37218
G	76472	5800	298	5648	912	1362	102	525	232	298	91650

H	56155	3058	1515	4385	1049	416	108	710	242	303	67942
I	48828	4317	2242	2571	486	937	69	1815	78	306	61647
J	82388	6082	5301	8358	1153	1468	102	3114	638	312	108916
K	16616	1669	32	840	423	283	252	98	46	40	20298
L	62596	5786	46	2383	1480	572	365	1251	953	0	75432
M	34973	1999	740	4138	567	449	295	184	477	185	44008
N	56218	6014	1818	7721	853	1074	2131	3125	227	682	79863
O	92108	11724	1755	5790	1984	1158	610	2733	892	195	118949
P	44379	6993	2532	5725	1047	1290	725	3096	135	460	66382
Q	25397	1051	1113	2134	530	862	874	699	383	0	33045
R	108779	4942	159	2806	1567	800	992	1251	522	0	121818
S	85529	6528	3039	3433	1139	1069	99	2245	304	304	103690
T	74404	8288	1456	6633	1241	1027	627	853	485	437	95453
U	118149	12360	6926	10584	3061	909	1873	2183	1095	173	157313
V	110721	18965	12927	17092	1813	1624	5056	3706	246	2828	174978
Σ	1547823	141256	77821	138135	26501	26503	20971	44252	9691	11105	2044058
%	75.7%	6.9%	3.8%	6.8%	1.3%	1.3%	1.0%	2.2%	0.5%	0.5%	
1. Automóvil como conductor 2. Automóvil como acompañante 3. Autobús de servicio de transporte de personal 4. Autobús de transporte público 5. Servicio mediante aplicación de internet 6. Taxi 7. Motocicleta 8. Bicicleta 9. Combinación de modos 10. A pie											

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Atracción de viajes diarios

Para definir la atracción de viajes se parte de la atracción de viajes diarios de las 100 zonas reportada en estudio UABC 2019. Esta atracción fue calculada de acuerdo a los factores de atracción de viajes indicados en el trabajo de Sperry, Chigoy, Green y Hard (2016) denominado “Development of Improved Trip Attraction Rates for Small and Medium-Sized Travel Demand Models”.

Los factores de atracción de viajes utilizados en el estudio 2019 consideran el tipo de actividad de todas las unidades económicas (UE) reportadas por DENU, así como el tipo de área en donde se encuentra ubicada la misma sin embargo, los factores del estudio de Sperry et al. se aplican a la cantidad de empleados de cada UE, esto representa una limitante en México, ya que DENU no entrega la cantidad de empleados exactos, solo rangos, por lo que en UE con una cantidad mayor a 100 empleados el resultado puede variar demasiado de la realidad. Por ello, se utilizó el Texas Trip Generation Manual (Texas Department of Transportation, 2014), donde se calcula la atracción de viajes particular de cada uno de los establecimientos de más de 100 empleados considerando la superficie de cada uno de estos. Posteriormente se ajustan los viajes atraídos en cada una de las zonas reportados en el modelo de demanda.

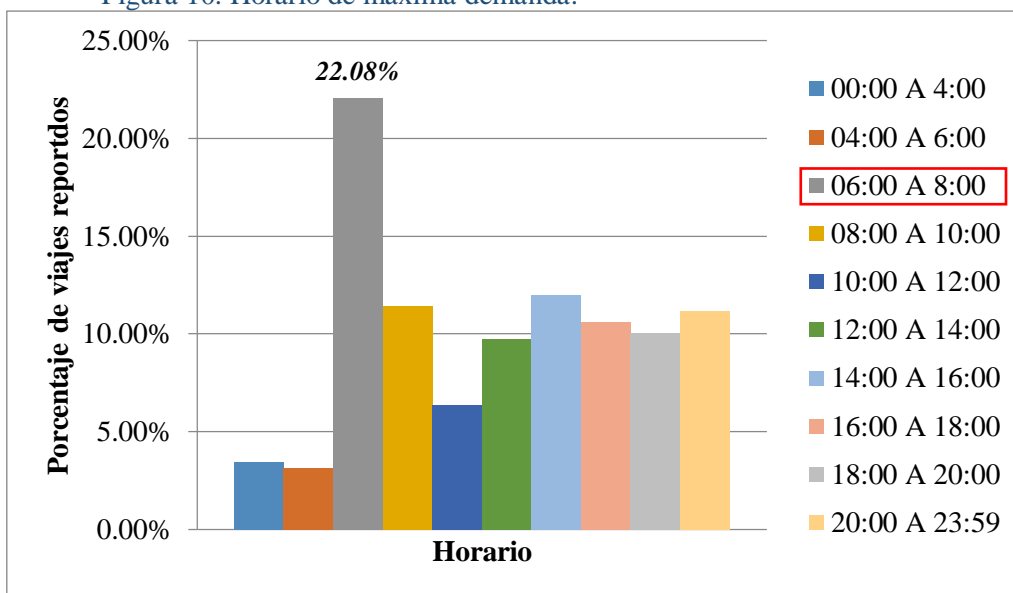
5.3 Generación de viajes en transporte público en horario pico

5.3.1 Identificación de horario de máxima demanda

Una vez definido la cantidad de viajes que se realizan por zonas durante un día, se analizaron los viajes considerando el horario de salida del origen y el de llegada al destino. En

total se analizaron 10,436 respuestas de viajes entre zonas, de los cuales 5,193 corresponden a viajes atraídos y 5,243 a viajes generados. De este modo se definió el horario de máxima demanda; resultando como mayor periodo el que corresponde de las 06:00 a las 08:00 AM (Ver Fig. 10), con un total del 22.08% de los viajes realizados durante este lapso (26,842.62 viajes). Cabe mencionar que además del antes mencionado, se obtuvo un segundo periodo vespertino de máxima demanda, sin embargo, correspondía al periodo de las 10:00 a las 11:59 PM, por lo que no se consideró para el análisis, debido a que durante ese horario no hay servicio de transporte público.

Figura 10. Horario de máxima demanda.



Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Producción de viajes en TP durante el HP.

Una vez definido el periodo de máxima demanda del transporte público y el valor porcentual de los viajes que se realizan dentro de este intervalo para cada una de las zonas, se obtuvo el número de viajes para cada una de las demarcaciones, en las que resalta una media en los viajes producidos de 195.24 y una media de viajes atraídos de 102.60 viajes, con un total de 26,842.62 viajes distribuidos entre el periodo de las 6:00 a las 8:00 AM.

Tabla 14. Total, de viajes en horario de máxima demanda por zonas.

ZONA	Viajes producidos	Viajes atraídos	ZONA	Viajes producidos	Viajes atraídos	ZONA	Viajes producidos	Viajes atraídos	ZONA	Viajes producidos	Viajes atraídos
1	59.98	30.89	26	145.99	97.96	51	13.79	551.63	76	43.85	0.42
2	182.86	63.07	27	199.8	201.17	52	143.31	438.94	77	169.49	35.76
3	227.72	21.47	28	596.42	388.43	53	314.67	93.22	78	661.62	49.5
4	440.52	14.6	29	399.85	950.09	54	92.96	158.93	79	381.42	259.73
5	13.93	91.47	30	376.75	94.61	55	235.48	52.33	80	20.24	131.14
6	46.09	43.34	31	294.82	377.18	56	368.97	151.35	81	739.97	2058.74
7	353.18	120.97	32	264.96	15.84	57	173.37	43.36	82	337.42	1163.64
8	378.38	63.66	33	142.19	346	58	299.35	59.57	83	185.42	178.41

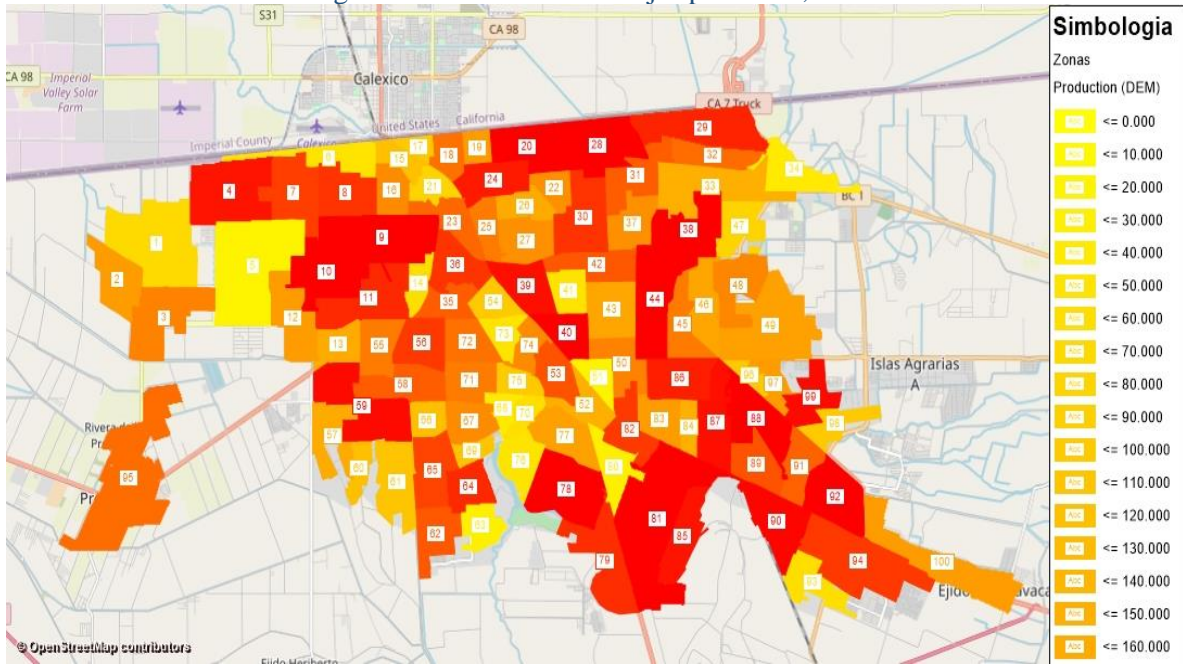
9	972.29	498.78	34	37.03	89.76	59	452.39	81.47	84	111.54	360.91
10	868.75	155.26	35	295.09	156.41	60	113.49	0.45	85	437.45	57.85
11	399.33	199.51	36	373.9	2125.44	61	99.75	30.46	86	419.5	158.01
12	190.05	207.86	37	203.49	45.67	62	305.81	49.58	87	443.27	74.15
13	153.45	247.88	38	540.16	606.51	63	21.65	4.4	88	603.13	244.81
14	52.26	89.66	39	440.2	550.77	64	394.36	44.37	89	407.8	266.31
15	114.81	795.25	40	463.54	895.91	65	351.65	38.85	90	472.49	54.22
16	209.44	72.93	41	47.37	554.15	66	107.49	4.84	91	379.21	54.39
17	92.89	650.3	42	302.83	67.1	67	207.06	92.88	92	556.05	101.25
18	254.48	1048.12	43	159.37	206.4	68	36.93	68.85	93	49.71	6.76
19	178.45	913.14	44	615.96	475.76	69	105.62	28.29	94	371.8	78.94
20	610.64	900.75	45	253.58	62.1	70	52.27	19.1	95	269.57	101.68
21	76.26	6.65	46	180.64	540.27	71	241.64	185.75	96	91.97	61.15
22	194.78	404.21	47	75.44	31.42	72	255.34	46.83	97	185.71	22.06
23	276	2090.05	48	219.58	74.59	73	46.66	163.97	98	97.11	22.02
24	418.01	468.6	49	167.14	215.51	74	214.47	34.55	99	456.73	25.83
25	238.31	335.49	50	228.8	22.97	75	93.78	7.93	100	180.13	97.13

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 21 se aprecia que los valores difieren en función de la zona, sin embargo, se puede observar en las zonas que corresponden a la periferia, de manera general producen una cantidad mayor de viajes en transporte público, respecto a la zona central de la ciudad.

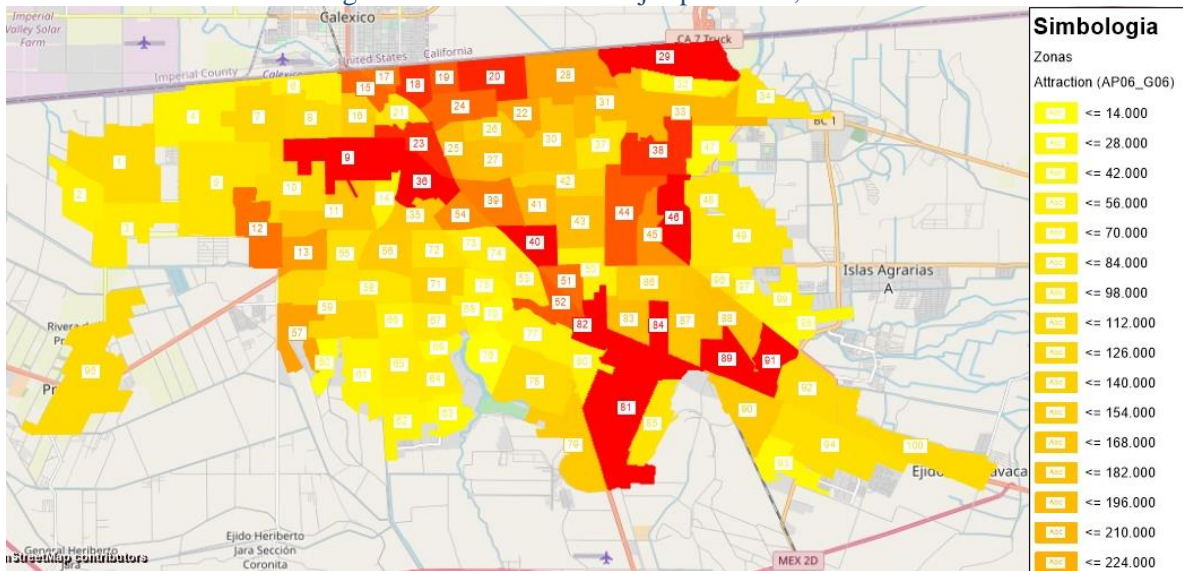
Esto se interpreta que los usuarios pertenecientes a estas zonas, tienen mayor dependencia al TP ya que lo utilizan para trasladarse a los centros laborales y de educación ubicadas sobre las vialidades más importantes de la ciudad. En la figura 11 que se muestra a continuación se puede observar los viajes atraídos del estado actual del sistema de transporte público para cada una de las 100 zonas que conforman el área de estudio, contrastan con la Figura 12, donde se observa la atracción de viajes.

Figura 11. Producción de viajes por zonas, estado actual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Atracción de viajes por zonas, estado actual.



Fuente: Elaboración propia.

5.4 Modelo de distribución de viajes

5.4.1 Distribución de longitudes de viajes

Después de obtener la cantidad de viajes dentro del horario de máxima demanda y desagregado por zonas, se obtuvo la distancia promedio de los viajes realizados por los usuarios. Primero se desarrolló una matriz de distancias entre zonas (100x100), (Tabla 22), en donde se exhibe la distancia entre centroides entre cada una de las cien zonas, obteniendo un promedio de distancia de 9.23 kilómetros, siendo la distancia mayor la que existe entre la zona 100 y la 95, de 25.6 kilómetros.

Por otro lado, se llevó a cabo el análisis de los orígenes y destinos de cada uno de los viajes para obtener las distancias promedio que recorre cada uno de los usuarios durante sus traslados en transporte público.

Tabla 22. Matriz de distancia entre zonas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.950	1.205	1.854	2.992	4.327	7.409	4.800	7.071	7.050	5.126	7.165	5.046	7.333
2	1.205	0.950	1.366	4.583	5.438	9.025	6.538	8.687	7.964	5.807	7.846	5.297	7.583
3	1.854	1.366	0.950	5.111	3.870	8.956	6.347	8.618	7.773	5.615	6.391	3.729	6.015
4	2.992	4.583	5.111	0.950	2.062	4.012	1.905	3.674	4.786	4.145	6.361	4.419	6.596
5	4.327	5.438	3.870	2.062	0.950	4.607	2.726	4.268	4.147	3.506	4.487	1.824	4.111
6	7.409	9.000	8.973	4.012	4.607	0.950	2.138	1.338	4.004	3.634	4.169	5.905	5.792
7	4.800	6.391	6.363	1.905	2.726	2.138	0.950	1.800	3.120	2.479	4.695	3.878	4.930
8	7.071	8.662	8.634	3.674	4.268	1.338	1.800	0.950	3.672	3.296	3.837	5.567	5.461
9	7.128	7.964	7.790	4.863	4.225	4.168	3.198	3.589	0.950	2.789	2.143	4.577	3.767
10	5.126	5.807	5.632	4.222	3.584	3.634	2.557	3.267	2.789	0.950	1.624	2.419	3.179
11	7.165	7.846	6.391	6.438	4.487	4.334	4.773	3.754	2.143	1.624	0.950	2.684	1.583
12	5.046	5.297	3.729	4.419	1.824	5.905	3.878	5.567	4.577	2.419	2.684	0.950	2.308
13	7.333	7.583	6.015	6.673	4.111	5.957	5.008	5.378	3.767	3.179	1.583	2.308	0.950
14	8.365	9.045	8.670	7.224	6.586	4.982	5.559	4.403	1.986	3.468	1.781	4.962	3.862
15	9.092	10.683	10.655	5.535	6.289	2.491	3.821	2.310	3.870	4.653	5.140	7.574	6.764
16	8.481	10.072	10.044	5.215	5.578	2.011	3.341	1.674	3.783	3.928	4.416	6.849	6.039
17	9.559	11.150	11.122	6.078	6.756	2.958	4.288	2.777	4.262	5.120	5.607	8.041	7.231
18	10.144	11.734	11.707	6.819	7.240	3.615	4.945	3.336	3.605	5.591	5.169	8.350	7.249
19	11.270	12.861	12.834	7.946	8.367	4.742	6.072	4.463	5.044	6.717	6.607	9.571	8.637
20	12.769	14.360	14.332	9.444	9.866	6.240	7.570	5.962	6.111	8.216	7.675	10.856	9.755
21	9.670	11.261	11.233	6.628	6.766	3.442	4.758	2.863	4.073	5.117	5.131	7.971	7.037
22	13.946	15.361	14.920	10.621	11.042	7.417	8.747	7.139	6.943	9.286	8.031	11.212	10.111
23	9.364	10.955	10.815	7.100	6.461	4.453	5.434	3.874	2.338	4.681	3.927	7.108	6.007
24	10.417	12.007	11.843	7.845	7.513	4.641	5.971	4.362	3.390	5.733	4.954	8.135	7.034
25	10.708	12.099	11.658	8.443	7.804	5.773	6.777	5.284	3.681	6.024	4.769	7.951	6.850
26	12.179	13.570	13.130	9.914	9.275	7.051	8.249	6.755	5.153	7.496	6.241	9.422	8.321
27	12.763	14.015	13.267	10.498	9.860	7.919	8.833	7.339	5.737	8.080	6.379	9.560	8.459
28	14.778	16.369	16.341	11.453	11.874	8.249	9.579	7.971	8.120	10.225	9.684	12.865	11.764
29	18.282	19.873	19.845	14.958	15.379	11.754	13.084	11.475	11.625	13.729	13.188	16.369	15.268
30	14.880	16.131	15.384	12.471	11.976	9.267	10.597	8.989	7.854	10.196	8.495	11.677	10.576
31	16.509	17.988	17.323	13.184	13.605	9.980	11.310	9.702	9.570	11.913	10.434	13.615	12.514

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo exhibido, se propusieron intervalos para agrupar las distancias promedio de los viajes, ya que este criterio influye de manera notoria al momento de seleccionar el modo para desplazarse por parte del usuario. De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Tabla 23).

Este criterio muestra que la población tiene en promedio desplazamiento al orden de 0.3 y 3 kilómetros por viaje, con un total de 27.33% de los viajes entre estas distancias, cabe mencionar que esta distribución de longitudes de viajes, se utiliza para calibrar el modelo de distribución de viajes (OD).

Tabla 153. Distribución de distancias de viajes.

INTERVALOS		VIAJES	INTERVALOS		VIAJES
0	0.3	0.00%	12	13	1.80%
0.3	3	27.33%	13	15	3.14%
3	5	20.08%	15	20	2.07%
5	7	18.06%	20	27	0.30%
7	10	19.66%	27	30	0.00%
10	12	7.57%	∑		100.00%

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Método Kalibri para estimar la función de utilidad en el modelo gravitacional

Durante el desarrollo del modelo, el software Visum, permite llevar a cabo la estimación de funciones de utilidad mediante el método Kalibri, empleando parámetros (a, b y c), en esta ocasión se utilizó las distancias de viajes como dato de entrada.

$$f(ux_{ij}) = a * u_{ij}^b * e^{c-u}$$

dónde:

ux_{ij}	Valor de utilidad (Por ejemplo distancia de recorrido o tiempo de viaje), entre zona i y j
a, b y c	Parámetros a estimar por el software

La función Kalibri ajusta estas funciones de utilidad a una distribución de longitud de viajes determinada, para posteriormente calcular el flujo del tráfico (de zona a zona) y obtener las distancias de los viajes del modelo, este dato se compara con los datos previamente obtenidos del estado actual y se define la certeza del mismo (Ver figura 12). Cabe mencionar que el valor de cada uno de los parámetros establecidos en esta función, fueron necesarios como valores de entrada para realizar el modelo de distribución, que a continuación se describe.

$$f(ux_{ij}) = 0.98689171 * u_{ij}^{0.30176203} * e^{-0.26510091 - u}$$

Dónde:

ux_{ij}	Valor de utilidad (Por ejemplo distancia de recorrido o tiempo de viaje), entre zona i y j
a, b y c	Parámetros a estimar por el software

5.4.3 Aplicación de modelo gravitacional (generación de matriz OD)

El modelo gravitacional, es un modelo matemático que utiliza el software Visum para el cálculo de la distribución de viajes. Se basa en el supuesto de que los viajes realizados en un área de planeación son directamente proporcionales a la demanda de origen y destino relevante en todas las zonas y los valores funcionales de la función de utilidad entre las zonas (Ortúzar 2001).

Es en este punto donde se lleva a cabo la calibración del modelo gravitacional, es decir, se estiman los parámetros de la función del costo representativa seleccionada, los cuales deben permitir que los resultados entreguen una distribución de longitudes o costos generalizados de viaje lo más cercana posible a la observada o reportada en la base de datos. Estos parámetros se determinan comparando la demanda por par OD que surge del modelo de iteraciones, este utiliza la forma general de la función de utilidad expuesta por Schnabel (1980).

El modelo gravitacional trabaja con parámetros de distribución, por lo tanto con valores dentro de la función de utilidad (En este caso se utilizó, la distancia entre pares OD), que analiza la reacción de los usuarios de la vía a las relaciones de distancia o tiempo. Cabe mencionar que este modelo gravitacional calcula una matriz completa con relación al tráfico, utilizando los pares OD del modelo (Ver figura 13).

Figura 13. Matriz O-D 100x100.

100 x 100			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Name		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Sum	99.43	55.92	61.68	36.74	73.58	54.61	124.48	110.29	707.22	109.23	156.15	391.26	268.30
1	1	536.19	32.11	16.20	13.21	6.35	8.06	3.21	12.15	6.38	37.68	9.10	6.85	35.59	14.77
2	2	205.69	13.72	9.14	8.09	1.80	2.75	0.97	3.43	1.92	14.00	3.59	2.73	16.11	6.72
3	3	376.57	14.99	10.85	14.90	2.23	6.83	1.46	5.38	2.89	21.92	5.64	6.32	40.12	16.13
4	4	601.96	8.23	2.75	2.55	9.60	11.44	5.92	21.55	11.91	48.08	7.83	5.47	27.25	11.55
5	5	368.17	2.64	1.06	1.97	2.89	9.90	2.48	7.94	4.96	30.33	4.98	5.10	36.11	13.13
6	6	259.00	0.41	0.15	0.16	0.58	0.96	4.34	4.12	6.32	13.14	1.97	2.34	3.54	3.13
7	7	523.97	2.37	0.83	0.92	3.23	4.72	6.30	18.33	12.99	45.52	7.61	4.99	17.50	10.49
8	8	424.52	0.64	0.23	0.26	0.93	1.53	5.00	6.73	11.01	20.88	3.14	3.71	5.59	4.93
9	9	738.97	0.86	0.39	0.45	0.84	2.11	2.28	5.31	4.98	87.82	5.13	9.43	10.49	11.74
10	10	830.67	2.72	1.27	1.48	1.76	4.42	4.61	11.34	9.40	65.66	19.48	19.82	37.95	24.33
11	11	388.51	0.47	0.22	0.39	0.29	1.08	1.20	1.73	2.63	27.99	4.60	9.24	11.37	15.21
12	12	174.99	0.86	0.46	0.86	0.51	2.67	0.67	2.18	1.34	10.88	3.08	3.98	22.96	10.44
13	13	317.09	0.61	0.33	0.59	0.36	1.66	0.96	2.17	2.07	20.79	3.37	9.07	17.81	28.42
14	14	73.94	0.05	0.02	0.03	0.03	0.09	0.15	0.21	0.33	4.67	0.35	0.96	0.81	0.99
15	15	196.24	0.11	0.04	0.04	0.15	0.25	0.94	0.97	1.81	6.03	0.61	0.74	0.93	1.01
16	16	191.53	0.13	0.05	0.05	0.17	0.31	1.16	1.16	2.40	6.29	0.79	0.96	1.17	1.28
17	17	145.15	0.07	0.03	0.03	0.10	0.16	0.61	0.64	1.17	4.06	0.40	0.49	0.62	0.67
18	18	222.71	0.07	0.02	0.03	0.09	0.16	0.53	0.57	1.05	5.63	0.38	0.63	0.62	0.74
19	19	175.53	0.04	0.01	0.02	0.05	0.09	0.29	0.31	0.57	2.76	0.21	0.32	0.34	0.39
20	20	297.36	0.04	0.02	0.02	0.05	0.09	0.30	0.33	0.58	3.27	0.23	0.38	0.39	0.46
21	21	257.29	0.10	0.04	0.04	0.12	0.24	0.74	0.79	1.63	6.25	0.58	0.83	0.91	1.03
22	22	116.94	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.08	0.08	0.15	0.91	0.06	0.12	0.13	0.15
23	23	276.71	0.09	0.03	0.04	0.09	0.22	0.44	0.53	0.96	9.81	0.56	1.04	0.99	1.19

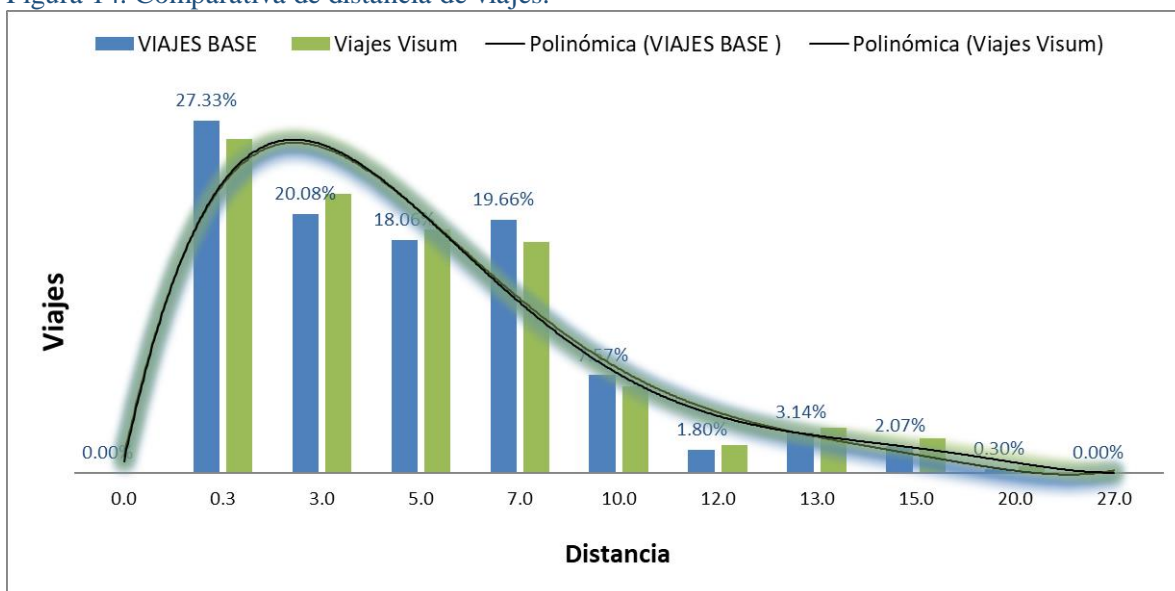
Fuente: Elaboración propia

En la figura 13 se muestra una porción de la matriz origen- destino. En ella se muestran los viajes atraídos y generados para cada una de las cien zonas que componen el área de estudio. En donde se exhibe que en promedio para cada una de las zonas se llevan a cabo 2.68 viajes, con un total de 26,842 viajes intrazonales durante el periodo de análisis que corresponde al HMD (de las 6:00 AM a las 8:00 AM). Además, las zonas entre las cuales se presenta el mayor número de desplazamientos es de la zona 85 a la 81, cabe mencionar que en este territorio se encuentran industrias maquiladoras ubicadas sobre el corredor industrial Palaco,

por ello se explica el número de desplazamientos. Por otro lado, la zona con mayor número de viajes calculados es la 85 con 278 viajes.

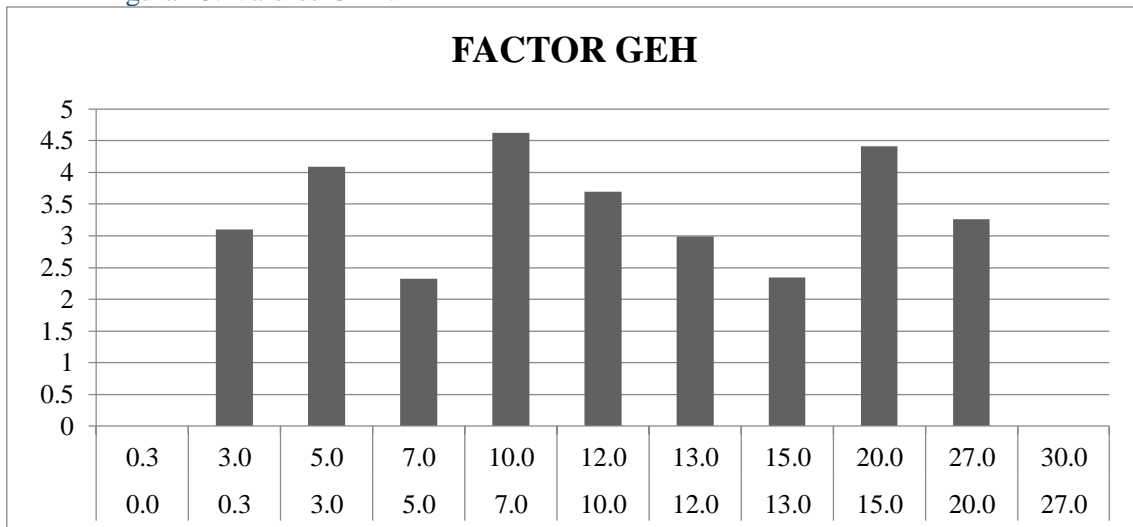
Una vez establecida la distribución de viajes del modelo, y con la finalidad de obtener mayor certeza de los datos de salida del software, estos se comparan con los datos previamente establecidos (obtenidos de las encuestas) Utilizando el factor GEH, cabe mencionar que se obtuvieron valores para cada intervalo GHE <5 (Ver figura 15), Según la literatura respecto a esta función estadística, los valores obtenidos indican que modelo entrega resultados con certeza del 90 al 95% o dicho de otra manera, el modelo puede garantizar los resultados de la investigación. Además, en la figura 14 se muestra las diferencias porcentuales menores o cercanas al 1%, de los resultados de las encuestas, respecto a los resultados que arroja el modelo.

Figura 14. Comparativa de distancia de viajes.



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Valores GEH.



Fuente: Elaboración propia

5.5 Simulación del estado actual

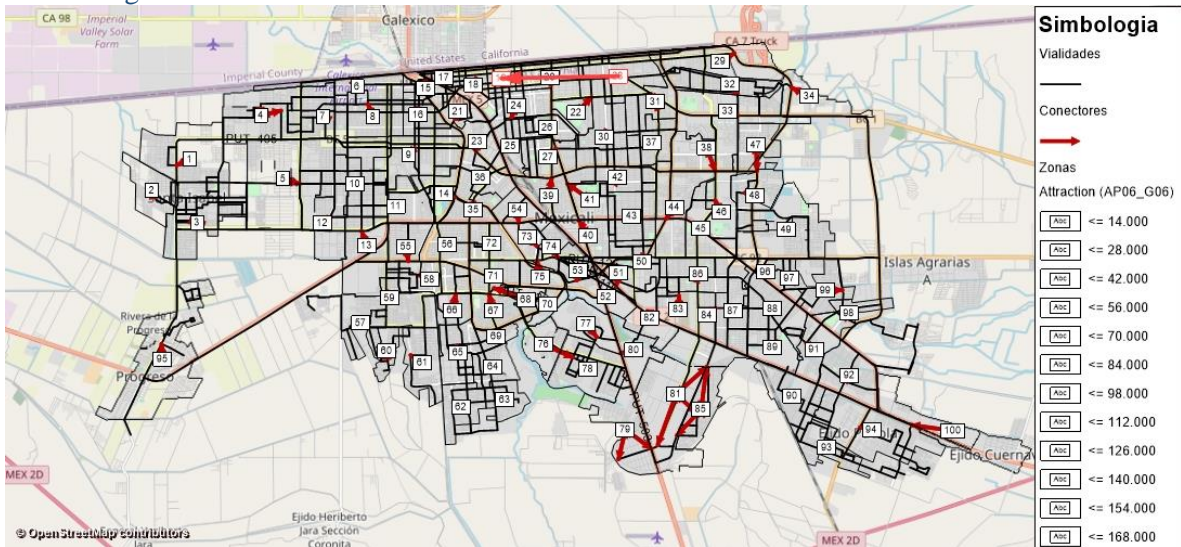
Para llevar a cabo la obtención de indicadores, fue necesario elaborar el modelo digital, trasladando los datos previamente obtenidos y caracterizando cada uno de los elementos que conforman el estado actual del sistema de transporte público de Mexicali al software de simulación PTV Visum (Ver figura 19). Cabe mencionar que las flechas color rojo representan un conector, el cual tiene como función principal, distribuir al usuario del TP (Pertenece a su zona) a un nodo, el cual le permita trasladarse a su destino o alguna cercanía que le permita posteriormente llegar a su destino final, esto mediante el traslado a través de nodos y vialidades (caracterizadas en color negro).

5.5.1 Modelación de la oferta actual

Es preciso mencionar que estos viajes se analizan en función de las 100 zonas exhibidas en la Figura 16. Así mismo, se agregaron las principales características de operación del estado actual. Elementos como las 22 rutas, que se encuentran funcionando actualmente, los 517 autobuses, de los cuales poco más del 60% de los modelos son del año 2005 en adelante, aunque el rango del parque vehicular oscila entre los años 1986 y 2016.

Además, se obtuvo que las rutas operan con una frecuencia promedio de 32 minutos. Por otro lado, se obtuvo el tiempo de operación promedio, que resultó en 15 horas con 50 minutos, esta información es de un día hábil del sistema de transporte público. Esta información fue obtenida por SIMUTRA mediante mediciones en campo, por lo que refleja la operación real del sistema.

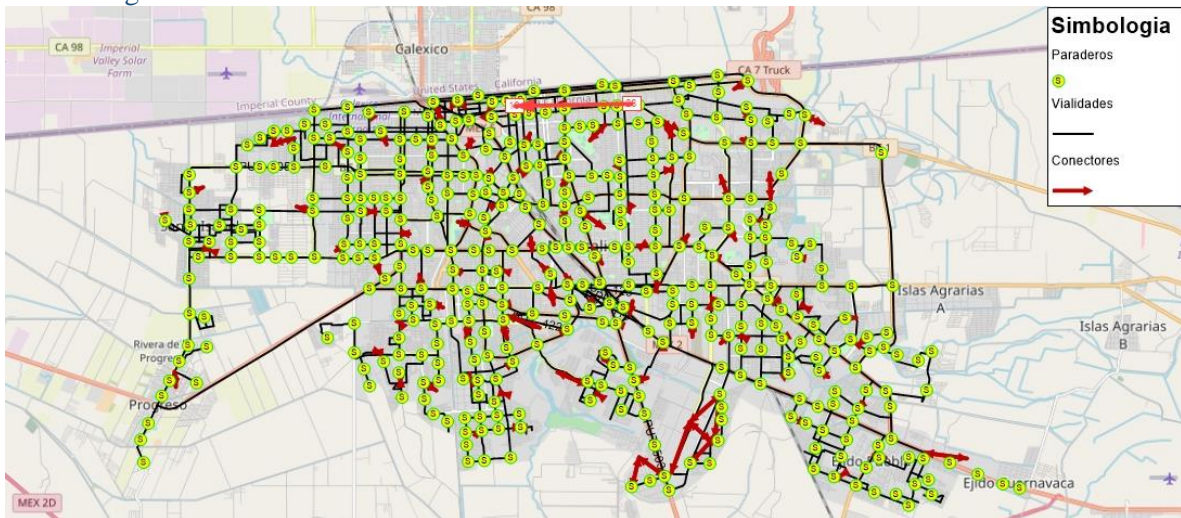
Figura 16. Modelo de oferta del estado actual.



Fuente: Elaboración propia

Con lo anterior, fue preciso establecer los puntos de parada del sistema actual, estos son lugares específicos en donde el operador del transporte público tiene permitido llevar a cabo labores de ascenso y descenso de pasajeros.

Figura 17. Paraderos del estado actual.



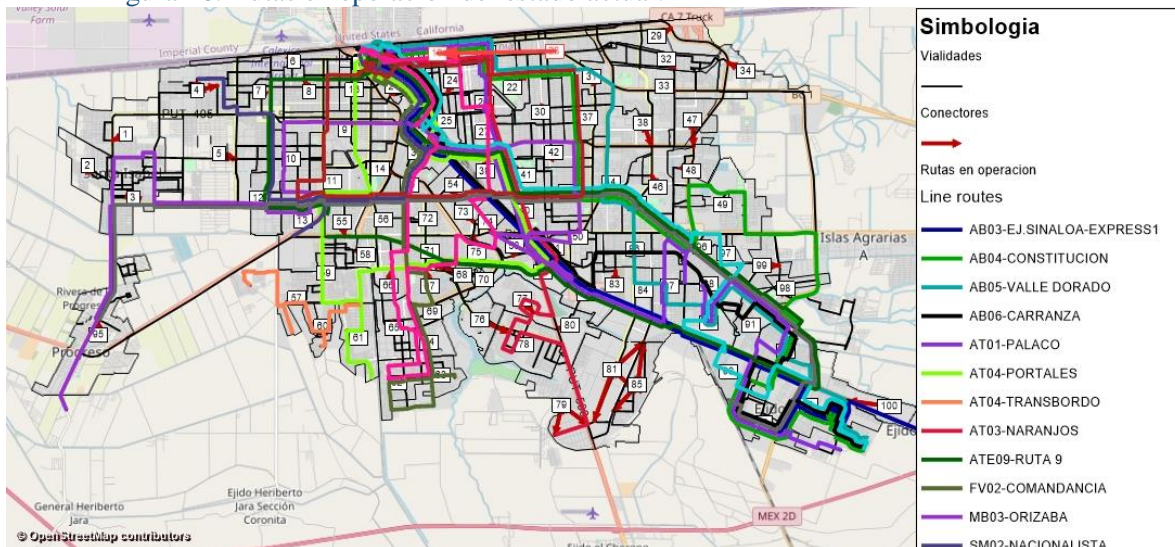
Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que en total se consideraron 1,154 puntos, de los cuales se encuentran distribuidos a través de los 627.2 kilómetros de rutas en operación (Ver figura 17). La ubicación de algún paradero respecto al lugar de origen del viaje de cada usuario influye de manera considerable al momento de seleccionar el modo para desplazarse, por ello, se presume que una buena ubicación de los mismos proporcionaría una atracción mayor del transporte público.

En este sentido al considerar un radio de cobertura por paradero, de 500 metros se obtuvo un poco más del 75% del área urbana considerada con cobertura. Mientras que, al considerar solo 300 metros de radio como área cubierta por paradero, solo cerca del 52% del área se encuentra cubierta.

Después de obtener el modelo digital del estado actual, se llevó a cabo el trazo de las rutas 22 rutas que actualmente están operando en la Figura 18, se muestra la ubicación e interacciones que tienen cada una de ellas. Como era de esperar, se muestra un factor de sobrepeso muy claro en la red y del mismo modo se exhibe que en algunas partes de la ciudad actualmente están siendo desatendidas por las rutas de transporte público, principalmente en zonas pertenecientes a la periferia de la ciudad, en donde la densidad de población es menor a la parte central.

Figura 18. Rutas en operación del estado actual.



Fuente: Elaboración propia

5.5.2 Asignación e indicadores del escenario actual

Posterior a esto se llevó a cabo la asignación de viajes, en la cual de los 26,842 desplazamientos realizados se distribuyeron entre las rutas previamente trazadas. En esta asignación del escenario actual se obtuvo que los usuarios tienen como espera máxima entre trasbordos de 15 minutos, el tiempo máximo total del viaje es de 1 hora y 30 minutos, además la tarifa es de 15.5 pesos. Por otro lado, los usuarios tienen un tiempo máximo de caminata (Del lugar de origen del viaje hacia algún paradero) de 20 minutos.

Por otro lado, se obtuvo que durante el periodo de máxima demanda los usuarios realizan viajes que en total equivale a 8,347 horas de traslados, esta cantidad es el equivalente a sumar el tiempo total que duran cada uno de los viajes que realizan cada uno de los usuarios durante el periodo antes mencionado.

La Tabla 24 muestra que durante el periodo de máxima demanda (6:00-8:00 AM), el promedio del tiempo total de traslado es cercano a los 20 minutos por usuario por viaje, además se muestra que únicamente cerca del 12% de los viajes son producto de algún trasbordo realizado por los usuarios, con un total de 3214 durante el periodo de máxima demanda. Respecto al tiempo promedio de caminata hasta acceder a algún paradero se presenta un total de 1,542 horas, distribuidos entre los viajes realizados durante el HMD.

Indicadores generales de desempeño de la red actual	Red existente
Σ Tiempo total de traslados	8347.94 hr
Número de transferencias	3214.93
Tiempo de caminata hasta acceder a algún paradero	1542.52 hr

Tabla 24. Indicadores del escenario actual

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se puede deducir que, en promedio un usuario requiere de 25 minutos de traslado, más el tiempo de espera en algún punto de parada para acceder a iniciar su viaje en transporte público. Este tiempo de espera puede variar en función de la ruta, horario y la ubicación del usuario, por ello no es de esperarse que, en algunos casos el tiempo de espera sea mayor que el tiempo de traslado dentro de algún autobús de pasajeros.

Otro elemento a considerar es la operación actual, pues esta influye directamente en la velocidad promedio por ruta, que esta a su vez se ve influida por el trazado de su ruta y la condición de la infraestructura existente, entre otros. En la Tabla 25 muestra las velocidades promedio de avance por ruta, así como los kilómetros de servicio que las rutas ofrecen, se puede observar que la velocidad promedio de operación del sistema actual es de 24.55 km/hr, además los kilómetros totales de servicio ascienden a 81,884.

Tabla 25. Características operacionales TP.

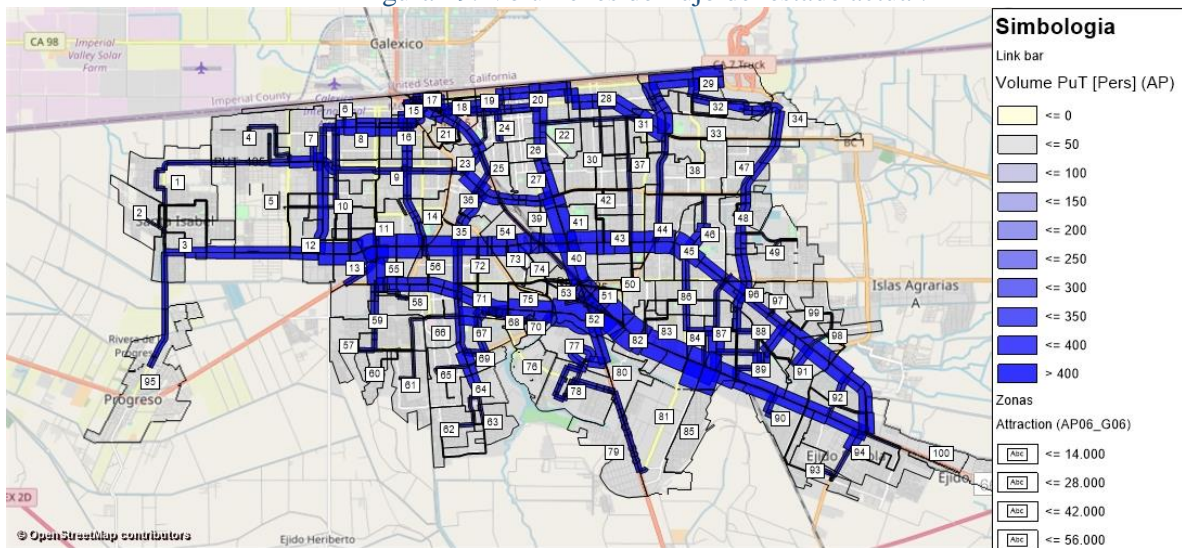
RUTA	VELOCIDAD PROMEDIO (Km/hr)	KILÓMETROS DE SERVICIO
AB03- EJ. SINALOA-EXPRESS 1	25.81	5263.96
AB04- CONSTITUCIÓN	22.08	1970.65
AB05-VALLE DORADO	25.84	3631.38
AB06-CARRANZA	22.24	1108.20
AT01-PALACO	24.64	4699.12
AT04-PORTALES	25.96	8835.29
AT04-TRANSBORDO PORTALES	21.64	1950.43
ATE03-NARANJOS	28.52	4842.64
ATE09-EXPRESS RUTA 9	26.70	12535.46
AZ01-CALLE G	23.41	675.79
EN01-PROGRESO	21.59	5639.23
FA01-FLORES MAGÓN	32.43	5367.28
FV01-CALLE E	22.52	4058.72
FV02-COMANDANCIA	22.57	3268.45
MB03-ORIZABA	22.72	3065.17

SM02-NACIONALISTA	25.82	2132.58
TC02-VILLA VERDE	24.15	548.31
TC05-BELLA VISTA-CALLE I	23.91	961.57
TC08-EJ. LÁZARO CÁRDENAS	25.29	9264.65
TEM04-EXPRESS RIO PRESIDIO	23.08	2065.31
Σ	24.55	81884.19

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 19 muestra el volumen de flujo en el sistema de transporte público durante el HMD, estos flujos se comportan en función a la demanda y ubicación de las rutas, por ello es de esperarse que se concentre mayor volumen de viajes sobre las principales vialidades de la ciudad en donde pasan más de una ruta del transporte público que actualmente se encuentran en operación.

Figura 19. Volúmenes de flujo del estado actual.



Fuente: Elaboración propia

5.6 Simulación del escenario propuesto

Durante la elaboración del modelo de la propuesta de reordenamiento, se obtuvo el nuevo trazado de las rutas que en ella se proponen. Este se encuentra conformada por 18 rutas, de las cuales 3 son troncales, 11 alimentadoras y 4 circuitos. El diseño de trazos de esta red cuenta con un total de 395 kilómetros de rutas, los cuales buscan satisfacer las necesidades de movilidad de la población de la ciudad de Mexicali, con mayor eficiencia y ahorro en gastos de operación.

Por otro lado, esta propuesta de reordenamiento entrega beneficios desde el punto de vista operativo, pues aumenta el porcentaje de cobertura espacial, de un 92% al 96% respectivamente, esto sin mencionar que existe una disminución cercana al 58% en los kilómetros de ruta propuestos respecto al sistema actual (Ver tabla 26), de este modo permite la

reducción de costos operativos y abre la posibilidad de invertir en mejorar otros elementos necesario ,tales como la renovación de parque vehicular y ampliar la cobertura de la ciudad.

Tabla 26.16 Comparativa geométrica de escenarios.

Factores	Red existente	Red propuesta	Diferencia
Kilómetros totales	935.60	395.00	-540.6 (57.78%)
Factor de Sinuosidad promedio	1.77	1.46	-0.31 (17.51%)
Sobre Piso promedio	75%	21%	-54.0%
Cobertura espacial	92%	96%	+4.0%

Fuente: Elaboración propia.

Además, respecto al porcentaje de sobrepiso (SP) se logra una reducción cercana al 55%, ya que la red actual de STP presenta un factor promedio del 75%, mientras que la propuesta de reordenamiento únicamente el 21% de sus trazos se sobreponen. De este modo se impacta de manera positiva en la distribución de la demanda, la eficiencia de su operación y del sistema en conjunto, pues se genera una traza más distribuida y específica para cada zona de la ciudad. Adicionalmente el factor de sinuosidad (FS) promedio pasa de 1.77 a 1.46, resaltando la eficiencia de cada uno de los trazos que corresponden a las rutas.

Cabe mencionar que la comparativa geométrica de los elementos antes mencionados permite establecer criterios de aceptación de la propuesta, pues esta representa impactos positivos en la operación, eficiencia de la red y por tanto entrega beneficios para el usuario.

La Tabla 27 muestra un análisis desagregado por rutas de la propuesta SIT en donde se observa que en promedio la longitud por ruta ronda los 22 kilómetros, siendo la alimentadora 06 la más larga con cerca de 42 kilómetros de extensión y la alimentadora 02 la más corta con cerca de 12 kilómetros. Además, se muestra que respecto a las rutas del escenario base, el 100 % de las rutas de esta propuesta presentan disminución en el factor de sinuosidad, siendo la Línea Exprés-1 la menor con apenas 1.05, mientras que la ruta que presenta el índice mayor es la denominada alimentadora 11. Esto se puede atribuir a la longitud de esta y a las vialidades por las cuales brinda servicio. Por un lado, se muestra el índice de sobrepiso desagregado por rutas, en donde se puede observar que el promedio general el 21% de los trazos se sobreponen.

Tabla 27.17. Datos generales de rutas de la propuesta SIT.

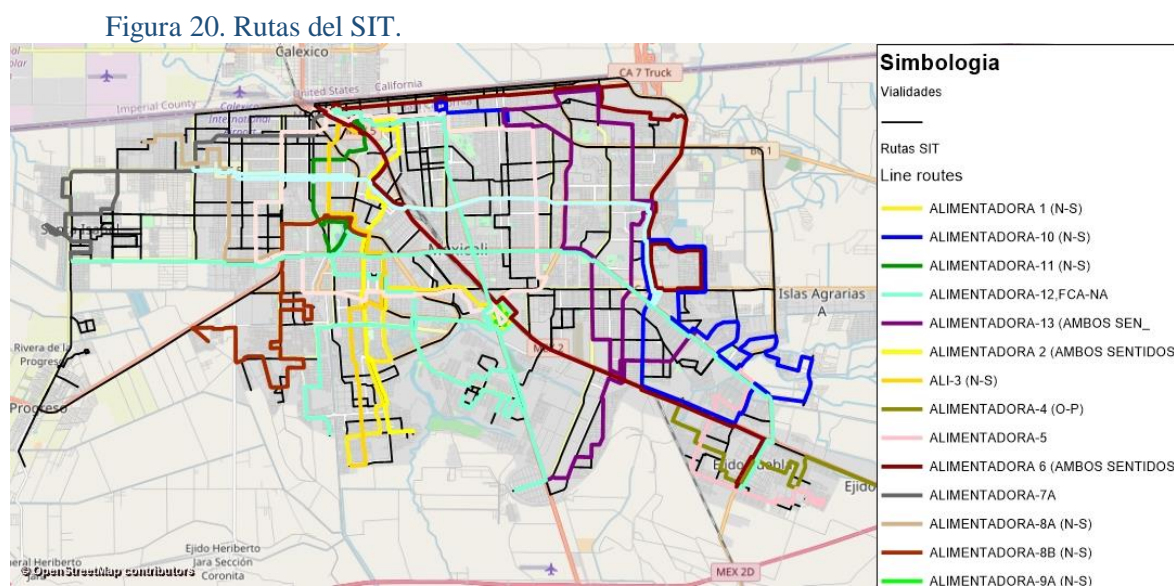
Ruta	Long. (km)	F. Sin.	F. Sob. (%)	Ruta	Long. (km)	F. Sin.	F. Sob. (%)
LEXP-01	20.2	1.17	48.5	Alimentadora 07-A	15.7	1.71	2.3
LEXP-02	26.3	1.22	38.2	Alimentadora 07-B	18.1	1.87	21.1
LEXP-03	16.8	1.29	32.3	Alimentadora 08-A	9.7	1.78	21.3
LEXP-04	18.7	1.27	31.3	Alimentadora 08-B	17.8	2.98	10.7
Circuito 01	31.9	1.29	36.4	Alimentadora 09-A	12	1.78	33.3
Circuito 02	25.9	1.25	21.5	Alimentadora 09-B	12.1	1.85	18.9
Circuito 03	27.5	1.57	43.4	Alimentadora 10	21.9	1.84	14.5

Alimentadora 01	12.8	1.99	47.2	Alimentadora 11	8.8	2.06	33.2
Alimentadora 02	12.9	1.34	30.6	Alimentadora 12	17.4	2.21	24.8
Alimentadora 03	15.3	1.48	31.7	Alimentadora 13	8.4	1.29	11.4
Alimentadora 04	16.8	1.62	5.9				
Alimentadora 05	10.8	2.25	10.3	Total	402.1		
Alimentadora 06	24.3	2.16	36.7	Promedio	17.5	1.7	0.263

*F. Sin. = Factor de Sinuosidad PROM.; F. Sob. = Factor de sobre piso promedio con otras rutas en trazo en al menos 100 metros. Longitud = Kilómetros promedio por sentido.

Fuente: UABC, 2019

Por otro lado, la Figura 20 muestra las rutas de la propuesta de reordenamiento del SIT, la cual muestra lo antes mencionado. Disminución en el factor de sobrepiso, sinuosidad y longitud total por ruta, respecto al escenario base que corresponde al sistema actual de transporte público.



Fuente: Elaboración propia

5.6.1 Propuesta de frecuencias

Tal como se mencionó con anterioridad, la propuesta de reordenamiento solo se encuentra a nivel de trazo sin especificaciones de operación, por ello fue necesario llevar a cabo una propuesta de frecuencias de viajes para cada una de las rutas, y posteriormente obtener una nueva asignación de viajes para este modelo.

Por ello, en la Tabla 28 muestra las frecuencias propuestas para cada una de las rutas, de acuerdo a las particularidades de cada una de ellas, promediando frecuencias cercanas a 15 minutos. Cabe mencionar que las frecuencias de operación del servicio para cada ruta varían dependiendo de la hora del día y la demanda de viajes en distintos puntos de la ciudad asociado a centros laborales, educativos y comerciales. Frecuencias bajas con largos tiempos de espera suelen producir una percepción negativa que impacta la calidad del servicio y el uso de este por los usuarios activos y potenciales

Como era de esperar la Línea exprés 1 muestra la mayor frecuencia de servicio por lo que representa el intervalo de espera menor que asciende a 5 minutos, esto se puede atribuir a la demanda de servicio que se presenta en la principal vialidad en la que la ruta presta servicio. Por otro lado, la ruta con la menor frecuencia es la alimentadora 10, que representa el intervalo de espera igual a 34 minutos.

Tabla 28. Frecuencias promedio propuestas del SIT.

Ruta SIT (nueva)	Frecuencia propuesta HMD	Ruta SIT (nueva)	Frecuencia propuesta HMD
LEXP1	5	ALIMENTADORA 6	12
LEXP2	7	ALIMENTADORA 7A	12
LEXP3	9	ALIMENTADORA 7B	13
LEXP4	15	ALIMENTADORA 8A	14
CIRCUITO 01	21	ALIMENTADORA 8B	7
CIRCUITO 02	12	ALIMENTADORA 9A	26
CIRCUITO 03	22	ALIMENTADORA 9B	14
ALIMENTADORA 1	15	ALIMENTADORA 10	34
ALIMENTADORA 2	10	ALIMENTADORA 11	9
ALIMENTADORA 3	25	ALIMENTADORA 12	20
ALIMENTADORA 4	14	ALIMENTADORA 13	18
ALIMENTADORA 5	25	<i>HMD=Horario de Máxima Demanda</i>	

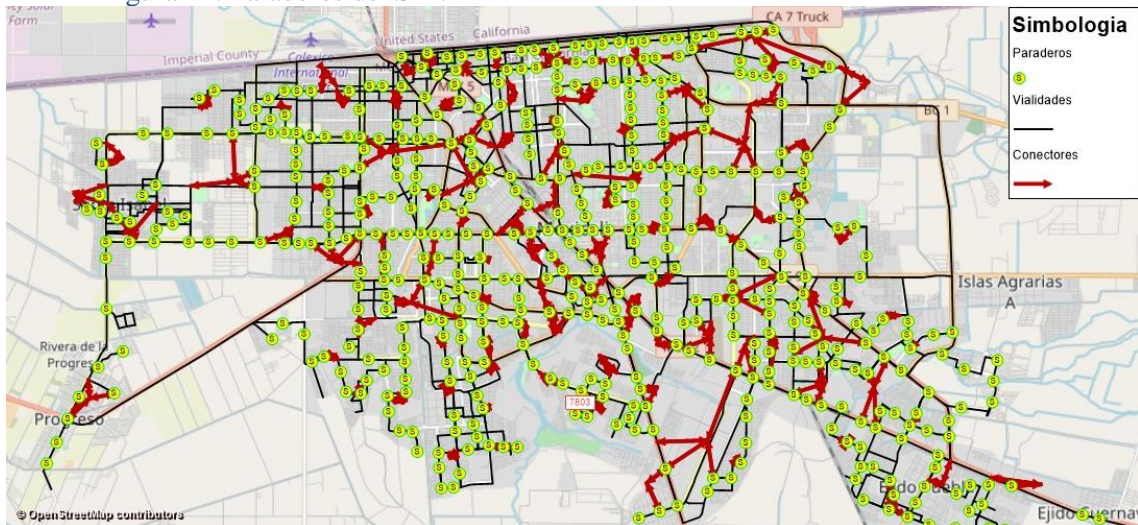
Fuente: Elaboración propia

5.6.2 Modelación de oferta propuesta

Cabe mencionar que además de lo anterior, se consideró la propuesta de paraderos de la UABC en 2019. De esta se obtuvo la ubicación de cada uno de ellos y su zona de influencia, en total se consideró 1,528 paraderos para la propuesta de reordenamiento (Ver figura 21). Cabe mencionar que estos se encuentran distribuidos entre las principales vialidades de la ciudad, con un espaciamiento promedio de 412 metros, además, este cambio representa un aumento en la cobertura espacial. El estado actual presenta un 75.5% de cobertura, considerando un radio de 500 metros, mientras que esta propuesta entrega una cobertura del 71% de la zona urbana de la ciudad al considerar únicamente un radio de cobertura de 400 metros.

Con relación a los paraderos utilizados por al menos una ruta se encuentra 1,282 en esta condición. Los paraderos que son utilizados por dos rutas son 219, por otro lado 26 paraderos son utilizados por tres rutas y solamente uno es utilizado por cuatro rutas distintas. Esto habla de la distribución estratégica de los paraderos, pues se pretende reducir el número de zonas para realizar labores de ascenso o descenso de pasajeros. Esto con la finalidad de eficientizar las labores de los transportistas, y, por otro lado, hacer más atractivo el uso del transporte público al iniciar acciones con la finalidad de disminuir los tiempos de traslado de los usuarios. Al incluir este sistema de paraderos se llevaría a cabo una operación más fluida por parte de los operadores.

Figura 21. Paraderos del SIT.



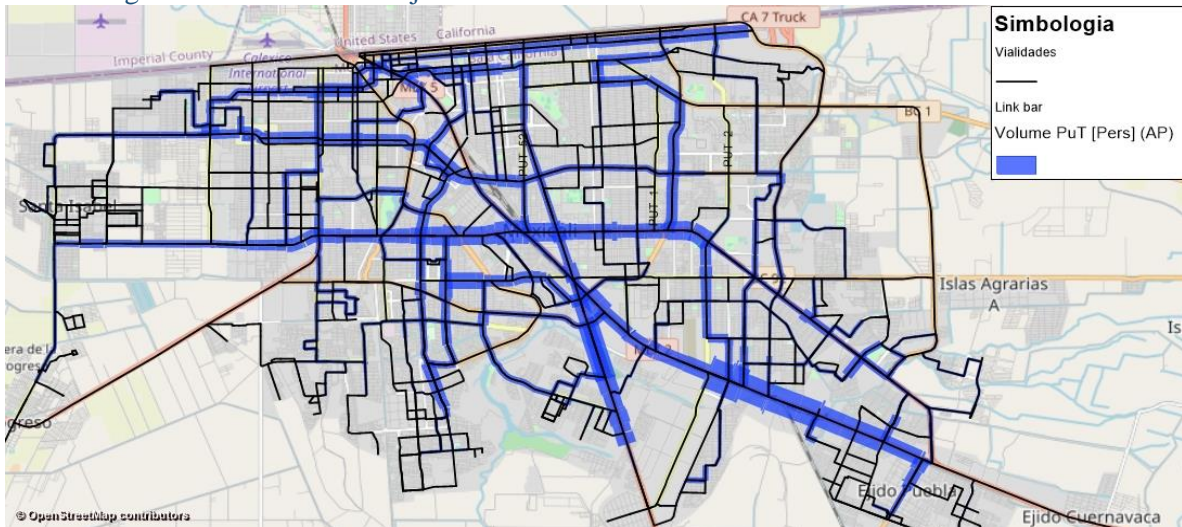
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 22 se muestra el volumen del flujo de personas en el sistema de transporte público de la propuesta de reordenamiento, cabe mencionar que estas dinámicas de movilidad son exclusivas para el horario y rutas establecidas en este apartado. Como es de esperarse, las mayores concentraciones de flujos se encuentran sobre las principales vialidades de la ciudad, tales como el Blvd. Lázaro Cárdenas, Blvd. Anáhuac, Calz. Independencia y corredor Palaco, solo por mencionar algunas.

5.6.3 Asignación e indicadores del escenario propuesto

Una vez definido el escenario con la propuesta de reordenamiento y obtener la nueva asignación de viajes con las frecuencias propuestas, se obtuvieron los volúmenes de flujo mostrados en la Figura 22.

Figura 22. Volumen de flujo del SIT.



Fuente: Elaboración propia.

Resalta que en los viajes analizados durante el periodo de máxima demanda (6:00-8:00 AM), se obtuvo que en promedio cada usuario dura 13.49 minutos dentro del autobús, resultando un tiempo total de traslados de 6,036 horas, esto es al considerar la sumatoria de todos los viajes que realizan los usuarios dentro del HDM. Por otro lado, es importante mencionar que de acuerdo al Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali (IMIP, 2007), el tiempo de traslado medio de viaje en transporte público para la ciudad de Mexicali es de 23 minutos, tiempo mayor al obtenido en esta investigación. Este aumento en el tiempo de los desplazamientos puede estar asociado al periodo de análisis con el cual se obtuvieron ambos resultados y al trazado estratégico que se propuso.

Además, se muestra que cerca del 27% de los viajes son producto de algún trasbordo realizado por los usuarios, con un total de 7052. Cabe mencionar que en esta propuesta se considera el eliminar el costo por trasbordo, por lo que resulta natural el aumento de usuarios que deciden realizar un segundo viaje en TP. Por ello, se presenta un mayor número de trasbordos en esta propuesta respecto al escenario base.

Respecto al tiempo promedio de caminata hasta acceder a algún paradero muestra que en total se tardan 681.22 horas, distribuidos entre todos los viajes durante el HMD. Cabe mencionar que el tiempo máximo de caminata por usuario es de 20 minutos, ya que se pretende contar con un sistema de transporte más accesible y de este modo atraer a un mayor número de usuarios.

Los indicadores generales de dicha asignación se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Indicadores de la propuesta de reordenamiento SIT.

Indicadores generales de desempeño de la red propuesta	Red propuesta
--	---------------

Σ Tiempo de traslados	6036.03 hr	Fuente: Elaboración propia
Transferencias	7052.86	
Tiempo de caminata hasta acceder a algún paradero	681.22 hr	

5.7 Comparación de escenarios

Una vez obtenidos los indicadores generales de desempeño de los escenarios actuales y propuestos, es posible llevar a cabo un análisis comparativo para identificar los impactos que la propuesta de trazos del Sistema Integrado de Transporte (SIT) tiene en la eficiencia operativa del sistema y disminución de tiempos de traslado (Tabla 30).

Tabla 30. Comparativa de Indicadores.

Factores	Red existente	Red propuesta	Diferencia
Σ Tiempo de traslados	8347.94 hr	6036.03 hr	-2,311.91 hr (27%)
Trasbordos	3214.93	7052.86	+219%
Tiempo de caminata hasta acceder a algún paradero	1542.52 hr	681.22 hr	-55.84%

Fuente: Elaboración propia

Se observa una disminución del 27%, que equivale a cerca de 2,312 horas, promediando una reducción de 5.16 minutos por viaje, exhibiendo un impacto positivo directo a la eficiencia y haciendo más atractivo el uso del transporte público.

Tal como se comentó con anterioridad, en la propuesta de optimización se obtuvo aumento en el número de trasbordos, esto se puede asociar a la eliminación del costo de transbordo, que considera la propuesta. De este modo se pretende hacer más atractivo el uso del transporte público y atraiga más usuarios, dejando de lado las preferencias al uso de vehículo particular.

Entre los criterios generales destacan la operación conjunta de concesionarios, la prioridad al transbordo y la posibilidad de implementar políticas de transbordo gratuito; proponer un sistema que busque transitar hacia un modelo tronco-alimentado, brindar mayor

accesibilidad a los centros atractores; y también contemplar procesos internos de evaluación y mejora continua del sistema y su operación.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

A partir de esta investigación, se desarrolló una metodología específica con la finalidad de obtener el modelo del transporte público actual, considerando un escenario base para posteriormente llevar a cabo modificaciones de un segundo escenario, que permiten realizar una evaluación y análisis de los resultados, lo cual constituye una herramienta útil para los tomadores de decisiones de este tema.

Una vez concluida la etapa de análisis, es posible confirmar la hipótesis planteada al inicio de esta investigación, en donde se establece que en una ciudad como la de Mexicali, con crecimiento constante, dispersa, y con una oferta del transporte público con muchas áreas de oportunidad, una reorganización completa del sistema, realizada a partir de indicadores de la oferta y orientada a un enfoque integral y coordinado entrega beneficios al sistema, lo cual se confirma con los resultados de la asignación de la demanda de movilidad del transporte público, en donde se obtuvo una disminución en los tiempos de traslado, de kilómetros de rutas propuestas y la reducción del tiempo de caminata de los usuarios hasta acceder a algún paradero.

Así mismo se establece que la propuesta de reordenamiento del SIT Mexicali, mediante su modelación y simulación, entrega beneficios a operadores y usuarios en términos de costos operativos, tiempos de traslados y costos de viajes. Por otro lado, es posible también obtener conclusiones relacionadas a las consideraciones metodológicas, así como particulares al caso de estudio.

6.1. Conclusiones metodológicas

En primera instancia se puede mencionar aspectos relevantes de la principal fuente de información de esta investigación, como es la encuesta realizada por parte de la UABC en 2019. Esta muestra datos socioeconómicos sobre los encuestados acerca del tipo de desplazamiento que realiza y en qué modo, sin embargo, se presentaron impedimentos al momento de depurar la información, ya que algunos usuarios no respondieron de manera completa la encuesta, por lo que se obtuvieron datos relevantes para esta investigación de aquellos que respondieron de manera parcial o completa. Por un lado, se puede mencionar que, si bien esta fuente de información represento un insumo valioso para la investigación, con la cual se pudo llevar a cabo distintos análisis, y generar el modelo de simulación, lo ideal hubiera sido llevar a cabo una encuesta enfocada específicamente a usuarios de transporte público para validar la matriz Origen-Destino obtenida. Sin embargo, no se llevó a cabo por disponibilidad de recurso, aunado a la pandemia de la Covid-19, la cual modificó temporalmente las dinámicas de movilidad en la ciudad, por lo que, en el supuesto de haber llevado a cabo dicha encuesta, no hubiera sido representativa de la realidad.

Como resultado de las modificaciones que se proponen al estado actual del transporte urbano, es de esperar que se presenta una demanda inducida, es decir, un número de usuarios potenciales se ven atraídos al hacer más atractiva la oferta del transporte público, por lo que es

de esperarse aumentar la demanda, sin embargo, en esta investigación se dejó de lado este fenómeno, y solo se consideró la demanda actual de transporte al momento de analizar el escenario con los trazos propuestos. Además, la simulación que se llevó a cabo solo se enfocó en el transporte público como modo de transporte, por lo que el proceso de asignación y el cálculo de indicadores se basaron en velocidades promedio de operación de este modo. Sin embargo, para lograr resultados aún más precisos, lo ideal sería elaborar un modelo de transporte completo con demanda dinámica, en donde el proceso de asignación considere la presencia de usuarios de otros modos de transporte en la misma oferta, y así mismo, estos sean considerados en el cálculo de los indicadores. En esta investigación, no fue posible llevarlo a cabo por limitantes en disponibilidad de información, de recursos y de tiempo. Aun así, el modelo generado es un primer paso que permite obtener resultados confiables, ya que este fue calibrado a partir de las longitudes de viaje reportadas en la encuesta y del total de viajes diarios en transporte público reportados por SIMUTRA. En este sentido, el modelo producto de esta investigación puede continuar alimentándose con nueva información que se vaya generando, para que termine por convertirse en un modelo de transporte general de Mexicali para el horario pico, en donde se considere la interacción entre los distintos modos de transporte.

Por otro lado, se menciona que únicamente se consideraron los datos disponibles para llevar a cabo las delimitaciones de cada una de las cien zonas que componen el área de estudio. Cabe mencionar, que se utilizaron datos sobre el incremento histórico del área urbana al año 2018, y con información solamente establecida de manera oficial, por ello se presume que no fueron consideradas aquellas áreas menores de incremento, que no contaban con un sustento oficial o posterior a la fecha de obtención de datos.

6.2. Conclusiones particulares

Como primera conclusión se establece que el estado actual del sistema de transporte público de Mexicali, B. C. presenta diversas áreas de oportunidad, de acuerdo a lo establecido en esta investigación el nivel de uso del sistema de transporte muestra que apenas un 6.76% de los desplazamientos se llevan a cabo por este medio. Contrastante con lo establecido en el Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015, el cual indica que el 65% de los viajes se llevan a cabo en transporte público (ONU-Hábitat, 2015).

Por otro lado, se puede concluir que la cobertura del sistema de paraderos actuales no atiende de manera adecuada la demanda de movilidad de los usuarios, esto debido al porcentaje de cobertura cercano al 50% respecto al área urbana total, considerando un radio de 300 metros por paradero. Además, el tiempo de caminata por usuario representa el 18.47% del tiempo total del viaje, considerando el clima extremo de la ciudad, permite concluir que es necesario llevar a cabo esfuerzos que disminuya este porcentaje e incentive el uso del transporte público.

Además, se puede deducir que, en promedio un usuario requiere de 22 minutos de traslado, más el tiempo de espera en algún punto de parada para acceder a iniciar su viaje en transporte público, en promedio de viaje en transporte público es de 30 minutos, el cual es bajo comparado con otras zonas metropolitanas, Velandia (2014).

Respecto al periodo de análisis que se utilizó, este representa el intervalo de máxima demanda del transporte público, correspondiente de las 6:00 a las 8:00 AM, periodo el cual corresponde con los principales horarios de entrada a centros laborales y escolares de la ciudad, por ello, se concluye que, al analizar el sistema de transporte público en su periodo más crítico del día, los resultados serán apropiados para analizarse.

Por otro lado, se obtuvieron resultados los cuales pueden considerarse como un insumo valioso, para los tomadores de decisiones relacionados al tema. Además, se muestra una matriz origen-destino actualizada al año 2020, la cual puede ser utilizada como base para futuras investigaciones y permita establecer nuevos criterios que brinden mayor certeza a futuras modificaciones del sistema.

El ejercicio de simulación del estado actual y propuesto, permite concluir que la propuesta de reordenamiento realizada por la Universidad Autónoma de Baja California, entrega beneficios sustanciales, tanto desde el punto de vista de los operadores, así como de los propios usuarios. Lo anterior ya que el análisis comparativo de los resultados de ambas simulaciones exhibe que en la red propuesta el tiempo de viaje total en toda la red de transporte público disminuye aproximadamente 27% en el horario pico, mientras que los transbordos se incrementan en más de 200%. Aunado a esto, la operación del sistema es más eficiente ya que con la red propuesta se logra mantener la cobertura espacial del sistema, aun cuando los kilómetros de red totales disminuyen en un 58%, esto debido a que se reducen los índices de sobrepeso y sinuosidad, con miras en una operación integrada.

El principal objetivo de las modificaciones al sistema, siempre será, satisfacer las necesidades de movilidad de la población, sin embargo, después de analizar los resultados de esta investigación, se observa que una de las principales líneas de acción será el disminuir el uso del automóvil particular para desplazarse, ya que estos presentan un porcentaje considerado en el uso del mismo para desplazarse con índices menores de ocupación. Por ello, las modificaciones futuras tendrían que ir encaminada a captar este sector potencial de usuarios y de este modo, se tendría un doble beneficio. Por un lado, aumentaría la demanda del transporte público, y con ello se obtendrían beneficios económicos y operacionales para los transportistas. Por otro lado, disminuiría el uso del automóvil particular y a su vez, disminuiría la congestión vehicular que se presenta en la ciudad, además, se reduciría la emisión de gases de efecto invernadero, disminuyendo los índices de contaminación ambiental y apuntando hacia una movilidad urbana sustentable. En este sentido, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2011) señala que ciudades más compactas, tienen un menor uso del automóvil, mientras ciudades extendidas y difusas presentan alto uso del mismo, como en el caso de EUA y Canadá.

En relación a la estructura urbana y las dinámicas de movilidad de Mexicali, se puede observar, que existen zonas residenciales dispersas o alejadas, respecto a las principales zonas atractoras de viajes, esto coinciden con los estudios que sugieren que las estructuras dispersas no favorecen la movilidad cuando el lugar de residencia no ha sido elegido en función de los sitios laborales (Giuliano & Small, 1993; Hamilton, 1989), tal como ha sucedido en Mexicali los últimos años, en los que el sector inmobiliario ha determinado el crecimiento urbano

desordenado, buscando adquirir suelos baratos en las periferias de las ciudades (Medina Ramírez & Veloz Rosas, 2012b).

En este sentido, es necesarios proponer esquemas flexibles de rutas y servicios, e incluso redistribuir las paradas del sistema actual, ya que la posibilidad de usarlo se incrementa cinco veces, si la distancia a los paraderos es corta (TCRP, 2004).

Por otro lado, el uso del transporte público se puede asociar a una condición económica desfavorable e incluso el uso del mismo representa poca practicidad de acuerdo a lo expuesto durante esta investigación, por ello, es necesario realizar estrategias que concienticen sobre las externalidades negativas del poco uso del transporte público, pues con ello no solo se generan impactos positivos en el medio ambiente, sino en la calidad de vida de las personas.

Tal como lo mencionan diversos autores, García J. (2006) expone que los problemas de movilidad no podrán resolverse si se continua con un enfoque que considera a la planeación del transporte como algo ajeno a la planeación urbana, en otras palabras, es necesario implementar estrategias de gestión de movilidad integral para lograr un verdadero cambio en el proceso de planeación de ambos fenómenos. Esto permitirá pasar del proceso de tradicional de toma de decisiones, el cual muchas veces termina siendo reactivo, hacia un enfoque integral y holístico que permita avanzar hacia escenarios de movilidad más sustentables.

6.3 Aporte de la investigación

Este modelo de simulación permitió corroborar, que incluso en los casos donde no se cuenta con información detallada sobre la demanda, tal como fue el caso de Mexicali cuando se planteó la propuesta de reorganización en 2018-2019, en una ciudad dispersa, con un sistema de transporte público no integrado, con baja demanda e incluso desorganización entre principales órganos reguladores, una propuesta de reordenamiento desde el punto de vista operacional, que considere corredores troncales, integración entre operadores, rutas alimentadoras, trasbordo gratuito y disminución de índices de sinuosidad y sobrepiso, entregara beneficios sustanciales a operadores y usuarios, por lo que se espera que esta conclusión permita a otras ciudades en condiciones similares realizar propuestas de reordenamiento aun cuando existan datos de demanda limitados.

Esta investigación brinda argumentos válidos y datos específicos sobre la puesta en marcha de la propuesta de reordenamiento del Sistema Integrado de Transporte, realizada por parte de la UABC en 2019. Con ello se espera que los tomadores de decisiones tengan mayor certeza sobre la propuesta y realicen los ajustes necesarios para su puesta en marcha.

Por un lado, los resultados obtenidos en esta investigación, presentan un panorama general sobre las dinámicas de movilidad de la población de Mexicali, a partir de un análisis desagregado de encuestas de movilidad y datos de referencia. Por ello, es de esperarse que el modelo de demanda obtenido en esta investigación, sirva como un insumo de gran importancia

en investigaciones futuras y brinde mayor información que apoye al mejoramiento del sistema actual de transporte y movilidad urbana.

Por otro lado, esta investigación presenta información específica del caso de estudio, al mostrar proyecciones poblacionales desagregadas por zonas, distribución modal y dinámicas de movilidad para cada una de las zonas que comprenden el área de estudio. Así mismo, este análisis menciona diversas áreas de oportunidad que tienen relación con los elementos antes mencionados.

Por último este trabajo muestra condiciones actuales que deberán ser analizadas para resolver las principales problemáticas del transporte público y la planeación de la movilidad urbana de la ciudad, con esto se entrega una investigación que aporta resultados para la toma de decisiones en materia de transporte público.

6.4 Propuestas de líneas de investigación futuras

Derivado de la crisis sanitaria que se suscitó durante la elaboración de esta investigación, se propone profundizar y llevar a cabo trabajos de campo que recaben un mayor número de datos específicos relacionados al origen- destino de los usuarios del transporte público.

Por otro lado, se propone el llevar a cabo la elaboración de un modelo de demanda general, el cual considere la movilidad de todos los usuarios en los diversos modos de transporte que actualmente se emplean en la ciudad, donde se tomen en cuenta el transporte público y privado. Esto con la finalidad de obtener un modelo de demanda que represente la movilidad total que actualmente existe en Mexicali, una ciudad en vías de desarrollo y constante crecimiento disperso.

Al considerar todos los modos de transporte que actualmente son utilizados por la población de Mexicali, se podrán identificar con mayor apego a las condiciones actuales nuevas áreas de oportunidad para analizar y proponer mejoras de la oferta vial e incluso llevar a cabo políticas de transporte que mejoren la eficiencia del estado actual.

CAPITULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Aal, M. M. M. (2014). Calibrating a trip distribution gravity model stratified by the trip purposes for the city of Alexandria. *Alexandria engineering journal*, 53(3), 677-689.
- Ahmad S. & Puppim J. (2016). Determinants of urban mobility in India: Lessons for promoting sustainable and inclusive urban transportation in developing countries. *Transp. Policy*, 50, 106–114.
- Alberto bull. (2003). congestión de tránsito el problema y cómo enfrentarlo. cuadernos de la cepal, 87, 196. 2021, De Cepal.org Base de datos.
- Allen Monge Jaime. (2011). Planificación del Transporte. PITRA, 2, 7.
- Alvarado v. (2018). Corredores de transporte público: Una acción para reducir CO2 dentro de la ZMVM, 2-21 Retrieved from <https://elpoderdelconsumidor.org/wp-content/uploads/2018/04/corredores-tpe-reduccion-co2-final.pdf>
- Anguita Rodríguez Francisca, Beatriz Duarte Monedero, Sandra Flores Ureba. (2013). Situación actual del transporte público urbano: la visión de las empresas operadoras. *Investigaciones Europeas de dirección y Economía de las empresas*, 20, 16-22.
- Antonio Mauttone1, María E. Urquhart. (2007). Diseño óptimo de recorridos y frecuencias para transporte público. 2020, de Universidad de la República, Uruguay.Sitioweb:<https://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0307.pdf>
- Aspilla, Y. & Rey, E. (2012). “La implementación del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de Bogotá y sus retos en el futuro”. *Revista Tecnogestión*, No. 1, Vol 9, pp. 26-40.
- Avellaneda, P. & Dextre, J. (2014). Movilidad en zonas urbanas. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Baaj, MH, Mahmassani, HS, 1995. Algoritmo heurístico de generación de rutas híbridas para el diseño de redes de tránsito. *Investigación de transporte Parte C* 3, 31–50.
- Bachelet, B., Yon, L., 2005. Mejora de las soluciones de optimización teóricas mediante el acoplamiento con la simulación. En: *Actas del primer OICMS*, Clermont-Ferrand, Francia, págs. 331–342.
- Ballén Duque (2007). *Derecho a la movilidad. La experiencia de Bogotá, D.C.* Prolegómenos - Derechos y Valores, 20, 169-181. 2020.
- Barra, A., Carvalho, L., Tey paz, N., Cung, VD, Balassiano, R., 2007. Solución del problema de diseño de la red de tránsito con programación restringida. En: *procedimientos de la 11ª Conferencia Mundial de Investigación del Transporte*, Universidad de California, Berkeley, EE. UU., 24 al 28 de junio.
- Ben-Akiva, Moshe, Jon Bottom, Song Gao, Haris N. Koutsopoulos, and Yang Wen. 2007. “Towards Disaggregate Dynamic Travel Forecasting Models.” *Tsinghua Science and Technology* 12(2):115–30.
- Bielli, M., Caramia, M., Carotenuto, P., 2002. Algoritmos genéticos en la optimización de la red de bus. *Transporte Investigación Parte C* 10 (1), 19–34.
- Bonells, C. & Durán, E. (2012). “Consideraciones sobre el esquema del Sistema Integrado de Transporte Público para Bogotá”. *Épsilon*, Vol. 18, pp. 105-121.
- Borndörfer, R., Grötschel, M., Pfetsch, ME, 2005. Un modelo basado en rutas para la planificación de líneas en el transporte público. Tech. Rep. Informe 05-18, ZIB.

- Branza, G., & Cristea, V.-G. (2013). Sustainable transport's indicators. Comparative study: EU-27 and Romania. *Constanta Maritime University Annals*, 14(19), pp 267-270. Retrieved from <http://www2.cmu-edu.eu/annals/on-line-journal/%5Cnhttps://trid.trb.org/view/1310575>
- Brundtland, G. H., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S. & Chidzero, B. J. N. Y. (1987). *Our common future*. New York, 8.
- CAF (2011). *Desarrollo urbano y movilidad en América Latina*. Caracas: CAF. Retrieved from <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/419>.
- Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (2008). *Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y Aplicaciones*. (Alfaomega, Ed.) (8th ed.). México: Cal y Mayor y Asociados
- Carbajal López Eduardo, Lucy Gabriela Aragón Casas, Carmen Blancy Dávila Cajahuanca . (2013). optimización basada en simulación en un sistema de tránsito público masivo. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 110, 10.
- Cárdenas, E. (2015) *Planeación de Sistemas de Transporte [Material del aula]*. Transporte, Universidad Autónoma Del Estado De México.
- Cardona S., Escobar, D. & Moncada, C. (2017). Evolución del número de pasajeros movilizados en los Sistemas estratégicos de transporte público en Colombia, *Análisis Cuantitativo. Rev. Espac.* 2017, 38, 13.
- Carrese, S., Gori, S., 2002. Un procedimiento de diseño de la red de autobuses urbanos. *Optimización aplicada* 64, 177–196.
- Cascetta, E. (2009). *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. Springer. [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(76\)90008-3](https://doi.org/10.1016/0041-1647(76)90008-3)
- Castelli, L., Pesenti, R., Ukovich, W., 2004. Programación de sistemas de transporte multimodal. *European Journal of Operational Research* 155, 603–615.
- Ceder, A., & Israeli, Y. (1998). “*User and operator perspectives in transit network design*”. *Transportation Research Record*, 1623(1), 3-7.
- Ceder, A., 2003. *Horarios de transporte público y programación de vehículos*. Pergamon Imprint / Elsevier Science Ltd .. págs. 31–57.
- Ceder, A., Golany, B., Tal, O., 2001. Creación de horarios de autobuses con sincronización máxima. *Transporte Investigación Parte A* 35, 913–928.
- Ceder, Avishai- Wilson, Nigel. “*Bus network design*”, *Transportation Research Part B: Methodological*. 331-344
- Cervero, R., & Day, J. (2008a). Residential relocation and Commuting behavior in Shanghai, China: The case for transit oriented development. <https://doi.org/UCB-ITS-VWP-2008-4>
- Cervero, R., & Day, J. (2008b). Suburbanization and transit-oriented development in China. *Transport Policy*, 15(5), 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2008.12.011>
- Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 199–219. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00009-6)
- Chakroborty, P., Deb, K., Subrahmanyam, PS, 1995. Programación óptima de los sistemas de tránsito urbano utilizando algoritmos genéticos. *Diario de transporte Ingeniería* 121 (6), 544–553.
- Chakroborty, P., Dwivedi, T., 2002. Diseño de red de ruta óptimo para sistemas de tránsito utilizando algoritmos genéticos. *Optimización de ingeniería* 34 (1), 83–100.
- Chow, A. H. (2007). *Trip Assignment—a literature review*. California PATH, UC Berkeley. http://path.berkeley.edu/topl/reports/071101_AndyChow__DTARReview.pdf. Accessed June, 29, 2010.

- Chowdhury, S., Chien, S., 2001. Optimización de la coordinación de transferencia para redes de tránsito intermodal. En: Actas de la 80ª Reunión Anual, Junta de Investigación del Transporte, Washington, DC, Documento No. 01-0205.
- Chua, TA, 1984. La planificación de rutas y frecuencias de autobuses urbanos: una encuesta. *Transporte* 12 (2), 147-172.
- Ciccarelli Spartaco (2009) Capítulo 7: Vialidad y Transporte, (www.cianz.org.ve/expo2009)
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2018) ‘*movilidad urbana sustentable*’.
- Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, (2016) ‘*Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano*’ DOF. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGAHOTDU_060120.pdf
- Conrado Augusto Serna-Uran, Jorge Alberto García-Castrillón, Ossman Flórez-Londoño. (2016). Análisis de Rutas de Transporte de Pasajeros Mediante la Herramienta. *Ingenierías USBMed*, 7, 7
- Cortés Carrillo, C., Moreno, E., Jara Moroni, P., & Pineda, C. (2013). Modelo de equilibrio estocástico para asignación conjunta de transporte público y privado.
- de Dios Ortúzar, Juan. 2012. Modelos de Demanda de Transporte. Ediciones UC.
- Desaulniers, G., Hickman, M., 2007. Transporte público. *Handbooks in Operation Research and Management Science*, 69–120.\
- Diego Hernández. (2017). Transporte público, bienestar y desigualdad: cobertura y capacidad de pago en la ciudad de Montevideo. *CEPAL*, 122, 21. 2021,
- EC (1992) A community strategy for ‘sustainable mobility’, Green Paper on the Impact of Transport on the Environment, COM 46 Final, Commission of the European Communities, Brussels.
- EC (2001) ‘*Libro Verde de la Energía: Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético*’ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:52000DC076>.
- EC (2002a). “*Libro Blanco — La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad*”. Luxemburgo: oficina de publicaciones oficiales de las comunidades europeas.
- EC (2002b), ‘*VI Programa de Acción en materia de Medio Ambiente*’ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM%3A12802>.
- Eranki, A., 2004. Un modelo para crear horarios de autobuses para lograr la sincronización máxima considerando los tiempos de espera en las paradas de transferencia. Tesis de maestría, Universidad del Sur de Florida.
- Eric Moreno Quintero. (2006). análisis comparativo de la modelación del autotransporte: carga vs pasajeros. *IMT*, 300, 59.
- Estrada, L. (2018). Movilidad Urbana Sustentable: ¿cómo van los estados? De Inteligencia Publica Sitio web: https://inteligenciapublica.org/movilidad-urbana-sustentable-como-van-los-estados/#_edn1.
- Evans, S. P. (1973). A relationship between the gravity model for trip distribution and the transportation problem in linear programming. *Transportation Research*, 7(1), 39-61.
- Fan, W., Machemehl, R., 2004. Problema de diseño de red de ruta de tránsito óptimo: algoritmos, implementaciones y resultados numéricos. Tech. Rep. SWUTC / 04 /167244-1, Centro de Investigación del Transporte, Universidad de Texas.
- Figuroa, O. (2005). “Transporte urbano y globalización. Políticas y efectos en América Latina.” *Eure*, No. 94, Vol. 31, pp. 41-53.

- Fleurent, C., Lessard, R., Seguin, L., 2004. Sincronización de horarios de tránsito: evaluación y optimización. En: Actas de la Novena Internacional Conferencia sobre programación asistida por computadora del transporte público (CASPT), San Diego, California.
- Fuller, E.P. (2017) ¿Hacia una movilidad sustentable? Desafíos de las políticas de reordenamiento del transporte público en Latinoamérica. El caso de Lima. *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 21, 29. 2020.
- Fusco, G., Gori, S., Petrelli, M., 2002. Algoritmo de diseño de red de tránsito heurístico para ciudades medianas. En: Actas del 13° Mini-EURO Conferencia, Bari, Italia.
- Gao, Z., Sun, H., Shan, L., 2003. Un modelo y algoritmo de diseño de red de equilibrio continuo para sistemas de tránsito. *Investigación de transporte Parte B* 38, 235–250
- García Palomares, Juan Carlos. 2008. “Incidencia En La Movilidad de Los Principales Factores de Un Modelo Metropolitano Cambiante.” *EURE (Santiago)* 34(101):5–24.
- Ghorbanzadeh, O., Moslem, S., Blaschke, T. & Duleba, S. (2018). *Sustainable urban transport planning considering different stakeholder groups by an interval-AHP decision support model*. *Sustainability*, 11, 9.
- Giuliano, G., & Small, K. A. (1993). Is the Journey to Work Explained by Urban Structure? *Urban Studies*, 30(9), 1485–1500. <https://doi.org/10.1080/00420989320081461>
- Guihaire Valérie, Jin-Kao Hao. (2008). *Transportation Research Part A*. Elsevier, -, 23. 2019, De ScienceDirect Base de datos.
- Hamilton, B. W. (1989). Wasteful Commuting Again. *Journal of Political Economy*, 97(6), 1497–1504.
- Handy S. (2002). Accessibility- Vs. Mobility-Enhancing Strategies for Addressing Automobile Dependence in the U.S. European Conference of Ministers of Transport. Recuperado de http://www.des.ucdavis.edu/faculty/handy/ECMT_report.pdf.
- Henry, Etienne (1998), "Regards sur la mobilité urbaine a Amerique latine", *Espaces et Sociétés*, 2, Toulouse, pp. 52-58.
- Holden, E., Banister, D., Gössling, S., Gilpin, G., & Linnerud, K. (2020). Grand Narratives for sustainable mobility: A conceptual review. *Energy Research & Social Science*, 65, 101454.
- Horváth, B. (2012). A Simple Method to Forecast Travel Demand in Urban Public Transport. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 9, No. 4, 165-176.
- IDAE (2006). *PMUS: Guía práctica para la elaboración e implantación de planes de movilidad urbana sustentable*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Iles R. (2005) *Public Transport in Developing Countries* Elsevier Amsterdam
- IMIP, & SIMUTRA. (2011). *Plan Maestro de Vialidad y Transporte de Mexicali*, B.C. Mexicali.
- Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México [ITDP] (2012a). “Guía de estrategias para la reducción del uso del auto en ciudades mexicanas”.
- Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México [ITDP] (2012b). “Planes Integrales de Movilidad Lineamientos para una movilidad urbana sustentable”.
- Iracheta, A. (2011). La necesidad de una política pública para el desarrollo de sistemas integrados de transporte en grandes ciudades mexicanas. *Revista INVI*, 26(71), 133–142. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582011000100006>
- Ittyerah (2004). The crisis of public transport in India: Overwhelming needs but limited resources. *J. Public Transp.* 2004, 7, 20.
- Jans B. (2009). *Movilidad urbana: en camino a sistemas de transporte colectivo integrados*. *Revista AUS*, (6),6-11. ISSN: 0718-204X.

- Jiménez-Jiménez, José de Jesús; de Hoyos-Martínez, Jesús Enrique; Álvarez-Vallejo, Alberto. (2014). Transporte urbano y movilidad, hacia una dinámica urbana sustentable y competitiva. Quivera, 16, 39-53. 2021, De Redalyc Base de datos.
- Juan José Arrué, (2009). "Movilidad urbana: problemas y posibles soluciones". Ciudad nuestra. From: <http://movilidad6-2012.blogspot.com/2012/08/movilidad-urbana-problemas-y-posibles.html>
- KAF (2018) "Desafíos para la integración de sistemas de transporte masivo: Manual de Buenas Prácticas"
- Krylatov, A., Zakharov, V., & Tuovinen, T. (2020). Optimization models and methods for equilibrium traffic assignment. Springer International Publishing.
- Kunieda M. & Gauthier, A. (2007). Género y Transporte Urbano: Inteligente y Asequible; *Federal Ministry for Economic Cooperation and Development: Eschborn, Germany.*
- Lah, O., Alveano, S., Arioli, M., Chesterton, V., & Sdoukopoulos, L. (2019). Chapter 2 - Sustainable Urban Mobility Solutions for Asia, Latin America and the Mediterranean Region. *Sustainable Urban Mobility Pathways*, Elsevier, ISBN 9780128148976, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814897-6.00002-8>
- Leo A., Morillón D. & Silva R. (2017). Review and analysis of urban mobility strategies in Mexico. *Case Stud. Transp. Policy*, 2017, 5, 299–305.
- Li, J., Lv, Y., Ma, J. & Ren, Y. (2019). Factor analysis of customized bus attraction to commuters with different travel modes. *Sustainability* 2019, 11, 7065.
- Lieberman E., & Rathi A.K. (1997). Traffic simulation. Revised monograph on traffic flow theory. Transportation research board special report, 268-270.
- Lindau, L.A., Hidalgo, D., & Facchini, D. (2010). "Curitiba, the cradle of bus rapid transit". *Built Environment*, No. 3, Vol. 36, pp. 274-282.
- Litman, T. (2012). Gestión de la movilidad para México. Beneficios para su desarrollo económico. Mexicali. Retrieved from <http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Gestion-de-la-movilidad-Todd-Litman.pdf>
- LOGIT. (2009). Proyecto de modernización, Línea Express, BRT Mexicali. Mexicali
- Loyola M., Shiftan Y., Aviram H. & Monderde-i-Bort H. (2019) Impact of public transport context situation and culture on mode choice. *Soc. Sci.*, 8(2), 40.
- Manheim M. (1979) Fundamentals of transportation systems analysis MIT USA
- Medina Ramírez, S. (2012). La Importancia De Reducción Del Uso Del Automóvil En México. Mexicali
- Medina Ramírez, S., & Veloz Rosas, J. (2012a). Guía de estrategias para la reducción del uso del auto en ciudades mexicanas. México.
- Medina Ramírez, S., & Veloz Rosas, J. (2012b). Planes Integrales de Movilidad. Lineamientos para una movilidad urbana sustentable. México. Retrieved from <http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Planes-integrales-de-movilidad-lineamientos.pdf>
- Medina Ramírez, S., & Veloz Rosas, J. (2013). Desarrollo orientado al transporte: Regenerar las ciudades mexicanas para mejorar la movilidad (Vol. 1). México.
- Michael Meyer y Eric Miller (2000), Planificación del Transporte Urbano. 2da. Ed. 2000
- Molina, O. (2017a, March 29). Lanzarán licitación para completar proyecto del BRT. La Crónica. Retrieved from <http://www.lacronica.com/EdicionEnLinea/Notas/Noticias/29032017/1195684-Lanzaran-licitacion-para-completar-proyecto-del-BRT.html>

- Molina, O. (2017b, June 20). Aprueba Cabildo invertir 70 MDP en BRT. La Crónica. Retrieved from <http://www.lacronica.com/EdicionEnLinea/Notas/Noticias/20062017/1227411-Aprueba-Cabildo-invertir-70-MDP-en-BRT.html>
- Molinero, Á., Sánchez, L. (1997). Transporte Público: Planeación, diseño, operación y administración. Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México, editores.
- Muñoz Miguel, J. P., Simón de Blas, C., & Jiménez Barandalla, I. C. (2014a). Estudio empírico sobre la utilización del transporte público en la Comunidad de Madrid como factor clave de movilidad sostenible. Cuadernos de Economía (Spain), 37(104), 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.cesjef.2013.12.001>
- Muñoz, J.C, Batarce, M. & Hidalgo, D. (2014b). “Transantiago, five years after its launch.” Research in Transportation Economics, Vol. 48, pp. 184-193.
- Murray, AT, 2003. Un modelo de cobertura para mejorar la accesibilidad del sistema de transporte público y ampliar el acceso. Annals of Operations Research 123, 143-156.
- Ngamchai, S., Lovell, D., 2003. Transferencia de tiempo óptima en el diseño de la red de rutas de tránsito de autobuses utilizando un algoritmo genético. Revista de Ingeniería de Transporte 129 (5), 510-521.
- Okraszewska, R., Romanowska, A., Wołek, M., Oskarbski, J., Birr, K., & Jamroz, K. (2018). Integration of a multilevel transport system model into sustainable urban mobility planning. *Sustainability*, 10(2), 479.
- ONU (1987): Reporte “Nuestro Futuro Común”, también conocido como “Reporte Brundtland” preparado por Gro Harlem Brundland, Noruega, ONU.
- ONU-HABITAT (2013). Planificación y diseño de una movilidad urbana sostenible: orientaciones para políticas. Informe mundial sobre asentamientos humanos. <https://www.imu.org.mx/p/wp-content/uploads/2015/02/Informe-Mundial-Asentamientos-Humanos-ONU-2013.pdf>
- ONU-Hábitat. (2015). Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015. Reporte Global en Asentamientos Humanos. México. Retrieved from <http://www.onuhabitat.org/Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015 - Final.pdf>
- Ortúzar, J. & Willumsen, L. (2011). Modelling Transport. John Wiley & Sons, Ltd.
- Otero, M. (2015). Movilidad Urbana Sustentable: conceptos internacionales. Centro de Estudios Jurídicos y Ambientales Sitio web: http://ceja.org.mx/IMG/Movilidad_Urbana_Sustentable.pdf.
- Papacostas, C.S. and Prevedouros, P.D. (1993). Transportation Engineering and Planning. Second Edition. Prentice-Hall International. pp.279-301.
- Pardo, C.F. (2009). Los cambios en los sistemas integrados de transporte masivo en las principales ciudades de América Latina. *Santiago de Chile: Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina (CEPAL)*. <http://www.cepal.org/es/publicaciones/3641-los-cambios-en-los-sistemasintegrados-de-transporte-masivo-en-las-principales>
- Paredes, A. y Velázquez, M. (2018). Nivel de satisfacción de los usuarios de Transporte público colectivo en la Ciudad de México aplicando el enfoque agregado. En Administración y Organizaciones, 21 (40), 119-135.
- Ramos Campos, Q., Paz Flores, L. F., & Pardo Vélez, C. F. (2015). Instrumentos Para El Desarrollo Orientado Al Transporte. Hacia ciudades bajas en emisiones. México. Retrieved from <http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Instrumentos-para-el-Desarrollo-Orientado-al-Transporte.pdf>
- Rehovot, (2009) “Proyecto de Movilidad Urbana FASE II de Sistema Tronco Alimentador de Transporte BRT Macrobus en Zona Metropolitana de Guadalajara”

- Richard Darbéra. (1982). Una metodología para la planificación del transporte urbano. *Revista EURE*, 24, 61-73.
- Rivera, Víctor M. Islas, César Rivera Trujillo, and Guillermo Torres Vargas. 2002. “Estudio de La Demanda de Transporte.” *Publicación Técnica* (213):146.
- Rodríguez y vergel, (2013). *Sistemas de transporte público masivo tipo BRT (Bus Rapid Transit) y desarrollo urbano en América Latina*
- Rodríguez, P. & Sánchez, H. (2015). “El SITP y su falta de uso.” *Revista Agenda de Calidad*, 25(10), pp. 109-135.
- Sager, J., Apte, J. S., Lemoine, D. M., & Kammen, D. M. (2011). *Reduce growth rate of light-duty vehicle travel to meet 2050 global climate goals*. *Environmental Research Letters*, 6(2), 024018.
- Salon. D. & Gulyani, S. (2019). Commuting in urban Kenya: Unpacking travel demand in large and small kenyan cities. *Sustainability*, 11(14), 3823.
- Sánchez-Atondo, A., García, L., Calderón-Ramírez, J., Gutiérrez-Moreno, J.M., Mungaray-Moctezuma, A., 2020. “*Understanding Public Transport Ridership in Developing Countries to Promote Sustainable Urban Mobility: A Case Study of Mexicali, México*”. *Sustainability* 12 (3266),1–21. <https://doi.org/10.3390/su12083266>.
- Saúl Antonio Obregón-Biosca, Eduardo Betanzo-Quezada. (2013). Urban mobility analysis of a mexican middle city, case study: Santiago de Querétaro. *ciudad y Territorio*, vol. xv, núm. 47, 2, XV, 61-98. 2021, De scielo Base de datos.
- SEDATU (2014). “*Estrategia Nacional de Movilidad Urbana Sustentable*” <http://ceci.itdp.mx/assets/downloads/Sedatu-EMUS.pdf>
- Simon H. (2006) *Las ciencias de lo artificial* editorial comares Granada España
- Stopher, P. R., & McDonald, K. G. (1983). Trip generation by cross-classification: an alternative methodology. *Transportation Research Record*, 944, 84-91.
- Sussman J. (2000) *Introduction to Transportation Systems* Artech House USA
- Suzuki, H., Cervero, R., & Luchi, K. (2014). *Transformando las ciudades con el transporte público: integración del transporte público y el uso del suelo para un desarrollo urbano sostenible*. Bogotá: Findeter. Financiera del Desarrollo Territorial S.
- Szeto, W. Y. and Hong K. Lo. 2004. “A Cell-Based Simultaneous Route and Departure Time Choice Model with Elastic Demand.” 38:593–612.
- Texas Department of Transportation. (2014) *Texas Trip Generation Manual*. Volumes 1-4. Austin, TX United States 78763-5080. <http://tti.tamu.edu/documents/0-6760-P1.pdf>
- TCRP. (2004). *Transit-Oriented Development in the United States: Experiences, Challenges, and Prospectes*. (Transportation Research Board, Ed.). Washington: Federal Transit Administration. Retrieved from <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/154989.aspx>
- Tom, VM, Mohan, S., 2003. Diseño de red de ruta de tránsito utilizando algoritmo genético codificado en frecuencia. *Revista de ingeniería de transporte* 129 (2), 186-195.
- TRB. (2010) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1207.
- UABC & CDEM, 2011. *Plan estratégico del Municipio de Mexicali 2015-2029*. <http://www.mexicaligranvision.com/pdf/plan%20estrategico%20del%20municipio%20de%20mexicali/Plan%20Estrategico%20del%20Municipio%20de%20Mexicali%202015-2029.pdf>
- UABC (2019) “Asesoría para el diseño de red de paraderos del sistema de transporte público colectivo de Mexicali, B.C.”

- UABC. (2018) “Asesoría técnica para proyecto de eficientar las rutas de transporte público existentes y reorientación de rutas alimentadoras de la línea exprés 1 de la ciudad de Mexicali, Baja California.”
- UITP. (2003). Quality as a means of reconciling individual needs with the collective challenges of sustainable development. Focus, (January), 1–4.
- UNEP. (2011). Technologies for Climate Change Mitigation - Transport Sector. Transport Policy. Roskilde, Denmark: UNEP.
- Velandia, C. (2014). Accesibilidad y Movilidad Urbana en el Centro de la Ciudad de Mexicali, Baja California, México: Propuesta de Intervención para el Mejoramiento de la Movilidad Peatonal hacia el Cruce Fronterizo con Estados Unidos. Universidad Iberoamericana del Noroeste. <https://doi.org/10.13140/2.1.3756.3689>
- Wang, L., Waddell, P., & Outwater, M. L. (2011). Incremental Integration of Land Use and Activity-Based Travel Modeling: Workplace Choices and Travel Demand. Transportation research record, 2255(1), 1-10.
- Wardrop, J. G. (1952). Road paper. Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the institution of civil engineers, 1(3), 325-362
- Wren, A., & Kwan, R. S. (1999). “Installing an urban transport scheduling system”. Journal of Scheduling, 2(1), 3-17.
- Yu, B., Yang, Z., Cheng, C., Liu, C., 2005. Optimización de la red de tránsito de autobuses con algoritmo paralelo de colonias de hormigas. En: Actas de la Sociedad de Asia Oriental para Estudios de transporte, vol. 5, págs. 374–389.
- Žak J., Fierek S., Kruszyński M. (2007). Evaluation of different transportation solutions with the application of macro simulation tools and multiple criteria, Procedia –Social and Behavioral Sciences 111, 340 –349
- Zak, & Zack, (2014). - Integration of the Urban Public Transportation System with the Application of Traffic Simulation. Transportation Research Procedia. Vol. 03
- Zaragoza, Martha Lelis and Victor Islas. 2007. “Análisis de Los Sistemas de Transporte.” 1(307):1–61.
- Zegras, C. (2006). Sustainable Transport Indicators and Assessment Methodologies. In Biannual Conference and Exhibit of the Clean Air Initiative for Latin American Cities (p. 17). São Paulo, Brazi. Retrieved from http://web.mit.edu/czegras/www/Zegras_LAC-CAI_Bkgd.pdf
- Zenina, N., & Borisov, A. (2012). Regression Analysis for Transport Trip Generation Evaluation. Information Technology & Management Science (Sciendo), 16(1).
- Zhao, F., Gan, A., (2003). Optimización de la red de tránsito para minimizar las transferencias. Tech. Rep. BD015-02, Departamento de Transporte de Florida, Centro para Investigación de transporte, Universidad Internacional de Florida.