

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOCIALES**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN PLANEACIÓN Y DESARROLLO SUSTENTABLE**



**"EVALUACIÓN EN EL TRANSPORTE DE LA CIUDAD DE MEXICALI, DESDE EL  
PARADIGMA DE LA SUSTENTABILIDAD"**

**TESIS**

Para obtener el grado de

**DOCTOR EN PLANEACIÓN Y DESARROLLO SUSTENTABLE**

Presenta

**Francisco Javier Peralta Castillo**

Director de tesis

**Dr. Arturo Ranfla González**

Mexicali, Baja California, Noviembre del 2016

## **Agradecimientos**

A mi madre Margarita por su apoyo incondicional, por su fortaleza espiritual ante las vicisitudes que le presenta la vida, dando ejemplo de valor y entereza, el cual ha transmitido a su familia.

A mi padre Leopoldo por sus enseñanzas, priorizando el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A Guadalupe por su acompañamiento, su paciencia y su optimismo ante los retos que conlleva la formación de una familia. A Diego y Emanuel por su alegría y amor.

A mis hermanos Estela, Aida, Alfonso, Hugo y Alberto que me han compartido en diferentes momentos, su apoyo.

Al Dr. Arturo Ranfla, director de tesis, quien siempre tuvo palabras de aliento para no decaer en el trayecto.

Al comité revisor de tesis; Dra. Rosa Imelda Rojas, Dr. Osvaldo Leyva, Dr. Moisés Galindo, Dr. Elías Páez, quienes con sus observaciones y comentarios permitieron fortalecer esta investigación.

A la Dra. Fabiola Denegri por su valioso apoyo en la orientación brindada para explorar diversos caminos en la búsqueda del conocimiento.

Al CONACYT por dar oportunidad a los jóvenes que se interesan en seguir preparándose para ser mejores que ayer.

A la UABC por ofertar programas incluyentes y comprometidos con la sociedad.

**Mexicali, Baja California      Noviembre del 2016**

## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, Baja California a 6 de Noviembre del 2016

---

Francisco Javier Peralta Castillo

## **Resumen**

El transporte proporciona múltiples beneficios en forma de bienes, acceso a los servicios, en la movilidad de personas y mercancías; sin embargo, también causa un número importante de costos ambientales, económicos y sociales. Las externalidades asociadas con el transporte, incluyen entre otras cosas, las emisiones de contaminación del aire, los gases de efecto invernadero, los accidentes, el ruido y la congestión.

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar una evaluación al sistema de transporte de la ciudad de Mexicali, Baja California, desde el paradigma de la sustentabilidad, a través, de la evaluación multicriterio, en particular del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), por sus siglas en inglés.

Este trabajo aborda el estado del arte del transporte sustentable, definiendo los principios que lo integran, a partir de esto, se realizó la jerarquización de criterios y matrices de comparaciones pareadas, obteniendo las prioridades a instrumentar.

La dificultad para medir los impactos y las interacciones que genera el transporte como una actividad básica de conectividad sobre todo en áreas urbanas, incorporando principios de sustentabilidad, tales como; accesibilidad, movilidad, eficiencia económica, planeación urbana, equidad, hacen posible el poder desarrollar este tipo de evaluación, como instrumento de análisis.

Palabras clave: Transporte Sustentable, evaluación multicriterio, proceso analítico jerárquico (AHP).

## **Abstract**

Transport provides many benefits in the form of goods, access to services, mobility of people and goods; however, it also causes a significant number of environmental, economic and social costs. Externalities associated with transport, include among other things, emissions of air pollution, greenhouse gases, accidents, noise and congestion.

This research aimed to develop an evaluation to the transport system of the city of Mexicali, Baja California, from the paradigm of sustainability, through, the multi-criteria evaluation, including the Analytic Hierarchy Process (AHP), for its acronym in English.

This paper addresses the state of the art of sustainable transport, defining the principles that comprise it, from this, the ranking of criteria and matrices of pairwise comparisons were performed, obtaining the priorities to be implemented.

The difficulty of measuring the impacts and interactions generated by transport as a basic activity of connectivity especially in urban areas, incorporating principles of sustainability, such as; accessibility, mobility, economic efficiency, urban planning, equity, make it possible to develop this type of evaluation, as an analytical tool.

Keywords: Sustainable Transportation, multi-criteria evaluation, analytic hierarchy process (AHP).

## ÍNDICE

Introducción.....	12
<b>Capítulo 1. Objeto de estudio</b>	
1.1 Antecedentes.....	16
1.2 Planteamiento del problema.....	20
1.3 Objetivos.....	24
1.4 Justificación.....	26
<b>Capítulo 2. Marco teórico.....</b>	<b>28</b>
2.1 Economía ambiental y ecológica.....	28
2.2 Valor del medio ambiente.....	36
2.3 Elección social.....	37
2.4 Externalidades.....	39
2.4.1 Congestión.....	42
2.4.2 Accidentes.....	45
2.4.3 Contaminación del aire.....	50
2.5 Desarrollo sustentable y movilidad.....	53
2.5.1 Movilidad y accesibilidad.....	59
2.5.2 Transporte sustentable.....	62
2.6 Medición de la sustentabilidad en el transporte.....	66
2.6.1 Principios e indicadores del transporte sustentable.....	69
2.6.2 Estado del arte.....	80
2.6.3 Casos de evaluación.....	87

2.6.4 Evaluación multicriterio.....	92
<b>Capítulo 3. Estado actual de la movilidad de la ciudad de Mexicali.....</b>	<b>96</b>
3.1 Contexto.....	96
3.2 Estructura urbana.....	98
3.3 Situación del Transporte Público Colectivo.....	100
3.3.1 Equipamiento.....	103
3.3.2 Cierres de circuito.....	103
3.3.3 Equipo.....	105
3.3.4 Estructura de la red.....	108
3.4 Proyecto sistema rápido de transporte.....	109
3.5 Transporte privado.....	112
3.6 Patrones de movilidad y accesibilidad.....	116
<b>Capítulo 4. Metodología.....</b>	<b>120</b>
4.1 Proceso Analítico Jerárquico.....	120
<b>Capítulo 5. Resultados y discusión.....</b>	<b>134</b>
<b>Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>137</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>142</b>
<b>Anexo I.....</b>	<b>151</b>
<b>Anexo II.....</b>	<b>152</b>
<b>Anexo III.....</b>	<b>155</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Accidentes y su relación con el parque vehicular.....	49
Tabla 2	Principios del transporte sustentable.....	71
Tabla 3	Modelo del Victoria Transport Policy Institute.....	75
Tabla 4	Marco analítico de evaluación.....	79
Tabla 5	Estado del arte.....	86
Tabla 6	Empresas transporte público.....	100
Tabla 7	Índice de accesibilidad carretera, 2010.....	118
Tabla 8	Escala de comparaciones pareadas.....	122
Tabla 9	Matriz de comparación de las alternativas en función de la congestión.....	125
Tabla 10	Matriz de comparación de las alternativas en función de la contaminación del aire... ..	126
Tabla 11	Matriz de comparación de las alternativas en función de la movilidad.....	127
Tabla 12	Matriz de comparación de las alternativas en función de la contaminación del aire.....	128
Tabla 13	Matriz de comparación de las alternativas en función de la demanda energética.....	129
Tabla 14	Matriz de comparación de las alternativas en función de los accidentes.....	129
Tabla 15	Matriz de comparación de las alternativas en función de la accesibilidad.....	130
Tabla 16	Índice de aleatorio.....	132
Tabla 17	Ranking de alternativas.....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Antecedentes planes y programas.....	18
Figura 2	Grafica de dispersión de accidentes.....	49
Figura 3	Objetivos del transporte sustentable.....	64
Figura 4	Velocidades en la red de transporte de Mexicali.....	102
Figura 5	Ubicación de cierres de circuito.....	105
Figura 6	Concentración de rutas.....	109
Figura 7	Árbol de jerarquías.....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS

(ACB)	Análisis costo-beneficio
(AHP)	Proceso Analítico Jerárquico
(ANP)	Proceso Analítico de redes
(BAD)	Banco Asiático de Desarrollo
(BANOBRAS)	Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos
(CAF)	Corporación Andina de Fomento
(CARB)	Agencia de Recursos del Aire de California
(CBA)	Análisis costo-beneficio
(CEA)	Análisis de costo-efectividad
(EIA)	Evaluación de impacto ambiental
(EST)	Transporte ambientalmente sostenible
(GNC)	Gas natural comprimido
(ILPES)	Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social
(ITF)	International Transport Forum
(LCA)	Análisis de ciclo de vida
(MAUT)	Teoría de la utilidad multi-atributo
(MCDA)	Análisis de decisiones multicriterio
(MCDA)	Evaluación multicriterio
(OCDE)	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

(OECD)	Organization for Economic cooperation and Development
(PIB)	Producto interno bruto
(RC)	Relación de consistencia
(REIS)	Impacto económico
(SEDATU)	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
(SEMARNAP)	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca
(SLOCAT)	Partnership on Sustainable Low Carbon Transport
(TUMA)	Función de utilidad multiatributo
(USEPA)	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

## **Introducción**

Hoy en día la necesidad de transportarse se ha convertido en uno de los asuntos prioritarios a atender y resolver en las agendas gubernamentales, en todos sus niveles, las estrategias que se han llevado a cabo, en la mayoría de los casos, no han logrado crear las condiciones de bienestar y prosperidad para la población en áreas urbanas (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Esta necesidad surge entre otras cosas, del hecho de que los bienes de consumo y los factores de producción tienen en general una localización distinta, y ningún área es capaz de producir todos los bienes que demanda una sociedad.

El crecimiento económico de las ciudades está condicionado, entre otros aspectos, a la eficiencia del sistema de transporte con el que cuentan, que les permita acceder a los mercados, intercambiar su producción, disminuir sus costos marginales, en un ámbito de competitividad global y de integración económica.

En este sentido, el transporte cobra cada vez mayor importancia debido a que los niveles de bienestar requeridos dependen en gran medida de la especialización productiva. El transporte también, contribuye a aumentar las posibilidades culturales y sociales de los individuos, ya que sin éste las relaciones sociales estarían más restringidas (Thompson, 1974).

La movilidad urbana es uno de los principales retos que enfrentan actualmente las ciudades mexicanas. Para elevar la calidad de vida de sus habitantes y lograr atraer más inversión y talento, las ciudades deben crear redes de movilidad que faciliten el traslado de personas y mercancías.

Sin embargo, durante las dos últimas décadas ha habido una tendencia alarmante en el incremento del uso del automóvil. Los kilómetros - vehículos recorridos (KVR) prácticamente se han triplicado al pasar de 106 millones en 1990, a 339 millones en 20104. Esta tendencia implica un aumento de todos los impactos negativos generados por el automóvil (contaminación, accidentes, enfermedades, congestión, etc.) (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo, ITDP México, 2012).

Esta creciente movilidad de las personas a través de la aceptación social del vehículo privado podría suponer que proseguirá la inversión pública en infraestructura del transporte, con los altos costos que esto conlleva, implicando áreas de baja densidad, y mayor consumo energético, por citar un efecto (Sanabria, 2008).

Esta dualidad provoca, por un lado, la generación de inversión en los sistemas de transporte, infraestructura, etc. para mejorar el crecimiento económico y por otro lado, mayores costos ambientales y sociales, aumentando el debate durante al menos, los últimos 20 años (Banister, 2012).

Diversos autores, Funtowicz, (1998); Shiau, (2012), (2013); López Lamba, (2010); Novačko Hozjan (2008), han incorporado la evaluación del transporte a través de una metodología multicriterio, ya que en algunos casos la información es escasa, incompleta o nula, haciendo posible considerar un número amplio de datos, relaciones, criterios y propósitos.

El presente estudio tiene como objetivo general, desarrollar una evaluación del sistema de transporte de la ciudad de Mexicali, Baja California, desde el paradigma de la sustentabilidad, a través, de la evaluación multicriterio, en particular del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), (por sus siglas en inglés).

Este trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera: el primer capítulo se plantean los propósitos de esta investigación, los antecedentes que involucran distintos esfuerzos por identificar las problemáticas del transporte en la ciudad y, a su vez, el diseñar propuestas para su implementación, a través de planes y programas gubernamentales. Destacando el Plan Maestro de Vialidad y Transporte para el municipio de Mexicali, del 2004, con una actualización en el 2011, el cual, buscaba reestructurar la red vial, así como reordenar el transporte urbano.

El segundo capítulo aborda el estado del arte mediante la revisión teórica del transporte desde el paradigma de la sustentabilidad, la necesidad de incorporar modos más eficientes de moverse y de poder acceder al transporte lo que conlleva el desarrollo de sistemas integrales, incluidos la energía, sistemas multimodales de transporte, sistemas de comunicación en especial de transporte público, combustibles y vehículos limpios, así como la mejora de los sistemas de transporte en las zonas periféricas o periurbanas.

También en este capítulo se revisa la medición de la sustentabilidad en el transporte, los impactos ambientales originados por éste incluyen diversos tipos de contaminación del aire (incluidos los gases que contribuyen al cambio climático), el ruido, el agotamiento de recursos no renovables, existiendo varios métodos que se pueden utilizar para medir estos impactos y cuantificar sus costos ecológicos y humanos, en este sentido se desarrolla la evaluación multicriterio como una herramienta que permita integrar y estructurar la información tanto cualitativa y cuantitativa en una sola evaluación.

En el tercer capítulo se aborda el estado actual de la movilidad de la ciudad de Mexicali, contextualizando las características específicas de la ciudad referente al sistema de transporte, la infraestructura de la red, así como la descripción del proyecto de sistema rápido de transporte.

En este capítulo se establece también, el marco analítico del transporte en la ciudad estableciendo las bases que sustenten la construcción del Proceso Analítico Jerárquico, de acuerdo a las pautas de un transporte sustentable.

En el cuarto capítulo se desarrolla la metodología propuesta, en particular, el proceso analítico jerárquico desarrollado por Saaty (1977), el cual es un método de tres etapas: (i) la construcción de la jerarquía; (ii) la ponderación de los indicadores a través de una comparación por pares, y (iii) el cálculo del valor final para las alternativas. Aquí se seleccionó un panel de expertos en el tema que representaran a los distintos sectores que tienen cierta incidencia en el transporte; gubernamental, empresarial, social, académico, y se calcularon las ponderaciones a través de comparación de criterios y alternativas.

En el quinto capítulo se plantean los resultados obtenidos primeramente respecto a la importancia que tienen los criterios, como lo son, el criterio de contaminación del aire, movilidad, congestión, demanda energética, accesibilidad y accidentes respecto del objetivo.

En el siguiente paso se construyeron las matrices de comparación de las alternativas en función de cada criterio. A partir de estos resultados se discute si están vinculados a los principios de sustentabilidad y, si lo son, cuáles son sus características, o, por otro lado, si en realidad obedecen a dinámicas independientes a estos principios.

En el último capítulo se plantean las conclusiones y las recomendaciones sugeridas a partir de los resultados encontrados, así como las limitantes de las mismas.

## **CAPÍTULO 1. Objeto de estudio**

### **1.1 Antecedentes**

El transporte sustentable emerge desde el informe Brundtland (1987), pero es en 1988 cuando se aborda de manera más profunda en la reunión anual de la Junta de Investigación sobre el transporte, con las "estrategias de transportación sostenible para el mundo en desarrollo", haciendo explícita la relación entre transporte, las necesidades humanas básicas, y los efectos ambientales. Desde entonces, se ha visto cada vez, un mayor número de esfuerzos en busca de definir, diseñar y medir el transporte sostenible (Kennedy et al 2005; Goldman y Gorham, 2006).

Internacionalmente existen algunas iniciativas importantes, entre otras, las siguientes: Desarrollo de indicadores de sostenibilidad por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible (1997), desarrollo de indicadores de sostenibilidad por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OCDE), el Desarrollo de indicadores ambientales por Eurostat, la Comisión Europea y la Agencia Europea del Medio Ambiente (Comunidades Europeas 1998, Jesinghaus 1997). También el Banco Mundial ha realizado trabajos de investigación con el fin de definir y medir el desarrollo sostenible.

Nueve países contribuyeron al proyecto europeo de evaluar al transporte desde la sustentabilidad, con estudios de caso sobre la base de seis criterios: (i) el ruido, (ii) el uso del suelo, (iii) las emisiones de dióxido de carbono, (iv) las emisiones de óxido de nitrógeno; (V) compuestos orgánicos volátiles, y (vi) las partículas. Estos estudios se basaron en un planteamiento hipotético con respecto a las proyecciones para el año de 2030 en relación con las condiciones en 1990 (Yevdokimov, 2004).

En la Conferencia de la OCDE "Hacia un transporte sostenible" en 1996 en Vancouver (Canadá), llamada también "Principios de Vancouver para el transporte sostenible", incluía

criterios como, la igualdad de acceso a las redes de transporte, individual y comunitaria, la responsabilidad, la salud, la seguridad, la educación y la participación del público, la planificación integrada de la tierra y el uso de los recursos, prevención de la contaminación, y el bienestar económico.

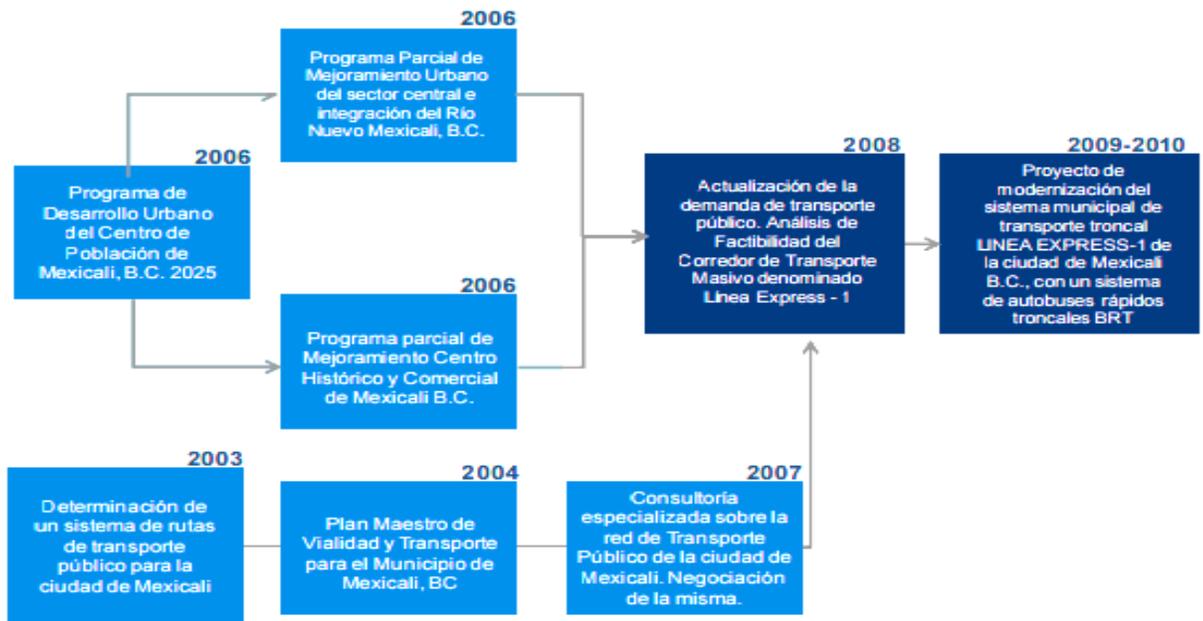
El mensaje final de la Conferencia de Vancouver fue: "...Debe hacerse todo lo posible para alentar e invitar a nuevos trabajos sobre el desarrollo una mayor difusión de este conjunto de principios" (OCDE, 1996).

El transporte sustentable ha sido objeto de investigaciones científicas y de discusiones más intensas sobre todo desde el año 2000. Un estudio reciente en los EE.UU. (DOT) indica que "Sostenibilidad" no se menciona explícitamente en las declaraciones de misión y visión en la mayoría de las agencias gubernamentales, la mayoría de ellas tocan aspectos de sostenibilidad por abordar cuestiones como medio ambiente, las necesidades futuras, y la equidad social.

En México gracias a la influencia internacional, el mecanismo de evaluación de los impactos ambientales (EIA) también ha sido aceptado en diversos ámbitos de acción. En particular, a partir de la formulación de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA) en 1988, se han creado diversas instituciones con sentido de protección ambiental que contemplan la evaluación de impacto y riesgo ambiental dentro de sus tareas, como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología (INE), en el ámbito federal (INE-SEMARNAT, 2000), también la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) y la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal en el nivel estatal.

Sin embargo se encuentra un déficit de estudios que refieran a la evaluación del transporte con un enfoque de sustentabilidad apegado a casos de estudio para ciudades y zonas metropolitanas de nuestro país, más bien se ciñen a planes de desarrollo urbano que integran políticas de movilidad y proyectos de desarrollo orientados al transporte.

En el caso de Mexicali, se han realizado varios estudios que han abordado el problema del transporte en la ciudad, sobre todo lo que se refiere al transporte público, como lo muestra la figura 1, estudio denominado “Determinación de un Sistema de Rutas de Transporte Público para la ciudad de Mexicali” (2003), realizado por la Universidad Autónoma de Baja California, donde, se fijaron las estrategias y líneas de acción encaminadas a reestructurar de manera integral las rutas de transporte mediante la conformación de corredores; fortalecer el ámbito institucional para mejorar la gestión y administración; y acciones encaminadas al control del tránsito y el transporte.



Fuente: Logit, (2012)

Figura 1. Antecedentes planes y programas

El estudio anterior dio sustento a la elaboración del “Plan Maestro de Vialidad y Transporte para el Municipio de Mexicali, B.C”. (2004), el cual establece las acciones que conducen al sistema hacia una reestructuración de rutas del transporte público y la reducción de unidades entre otras cosas; el mismo documento es la referencia técnica citada en el reglamento como elemento normativo hasta la actualidad.

En el 2006, el programa de Desarrollo urbano del centro de población de Mexicali 2025, planteaba repositonar el sector central para la optimización de las condiciones internas de urbanización de la ciudad, fortaleciendo la integración de la estructura vial y de usos de suelo en los proyectos Rio Nuevo, Centro Histórico, a su vez, esto derivó en programas parciales para estas zonas de la ciudad, donde se concentran la mayoría de las rutas del transporte público.

Para el año 2007 se realiza otro estudio cuyo objetivo fue actualizar el diagnóstico del transporte público mediante la “Consultoría Especializada sobre la Red de Transporte Público de la Ciudad de Mexicali, Negociación de la red de transporte público de Mexicali”. Estudio que contempla únicamente el diagnóstico y concluye con recomendaciones preliminares.

Estos planes se centraban básicamente en establecer dos estrategias; la primera dirigida a una estrategia de infraestructura física y la segunda a la operación del propio sistema, destacándose la falta de continuidad y seguimiento a los planes por parte de gobiernos municipales, afines o no, políticamente.

Para el 2008 y 2009 se inicia con el proyecto de modernización del sistema municipal del transporte modal “Línea Exprés 1”, con el análisis de factibilidad de la demanda del transporte público, que implicaba carriles confinados para el transporte público y que constaría de varias

etapas. Este proyecto incluyó fondos del gobierno federal, estatal y municipal, buscaba agilizar los tiempos de traslado, aumentando la velocidad promedio y disminuyendo los puntos de parada. Cabe destacar que dicho proyecto no se ha puesto en operación dado los problemas de origen en su diseño, construcción y financiación.

En el 2011 se actualizó el plan maestro de vialidad y transporte para el municipio, incorporando más rutas troncales y alimentadoras (3), así como un sistema tarifario integrado de prepago con transferencias de usuarios sin pagos adicionales.

En relación con el monitoreo de contaminantes atmosféricos en Mexicali este comenzó a operar en 1996 dentro del Programa Frontera XXI, con financiamiento de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), de la Agencia de Recursos del Aire de California (CARB), y de la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP).

## **1.2 Planteamiento del problema**

El transporte contribuye en gran medida con los gases de efecto invernadero, según estudios del International Transport Forum (ITF) de la OCDE, las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provocadas por el sector transporte, representan el 23 % (a nivel mundial) y el 30% en países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).

El sector representa aproximadamente el 15 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Las emisiones globales de CO<sub>2</sub> procedentes del transporte han crecido un 45 % entre 1990 y 2007 (OCDE, 2010).

Para el caso de la ciudad de Mexicali, de acuerdo con el inventario de emisiones de contaminantes criterio 2005, en Mexicali se liberaron a la atmósfera cerca de 49,000 toneladas de  $PM_{10}$  y poco más de 7,000 toneladas de  $PM_{2.5}$  al año, de las cuales el principal aporte lo representaron las fuentes de móviles y de área (Quintero, et al. 2013).

La ciudad de Mexicali es una zona árida y cuenta con muchas vialidades sin pavimentar; específicamente, la estación Progreso se ubica en una zona de terracería con intenso flujo vehicular y aledaña a campos agrícolas, lo que puede influir en los niveles registrados en la calidad del aire (Corona Zambrano y Rojas Caldelas, 2009).

En este sentido, el Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali (IMIP), en el 2011 estableció que el porcentaje de cobertura en promedio para el área urbana en fue del 50.05%, observándose en la zona céntrica de la ciudad, los porcentajes más altos, 80.72% y los más bajos en la periferia, Santa Isabel y en la estación Progreso, que en promedio tienen una cobertura apenas del 20%.

Los niveles más altos de contaminación atmosférica se presentan hacia el poniente de la zona urbana, en la estación Centro de Salud (Progreso), y disminuyen hacia el centro y el oriente de la red (Instituto Nacional de Ecología, 2011).

Mexicali es la ciudad con mayor contaminación atmosférica del país, registró desde 2010 una tasa promedio de 30 muertes relacionadas con los efectos de la contaminación en el aire, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Instituto Mexicano para la Competitividad, 2011) y en particular, ocupa uno de los primeros lugares en contaminación por  $PM_{10}$  en el país, lugar que se disputa con la zona metropolitana del Valle de México (Zuk et al., 2007).

El transporte público presenta esquemas de operación tradicionales, los cuales no se ajustan a las nuevas técnicas de programación del servicio y elaboración de roles de trabajo. Los intervalos amplios que se presentan en los itinerarios debido a la baja demanda existente, ocasionan amplios tiempos de espera para el usuario (USTRAN, 2007).

Se observa una disminución considerable de la velocidad de operación, debido a un inadecuado trazo geométrico, malas condiciones de la carpeta asfáltica y sinuosidad en el trazo de las rutas de transporte colectivo (LOGIT, 2008).

El usuario paga una tarifa alta (13 pesos) que junto con ciudades del estado de Nuevo León, son las más altas de México, por un servicio que no cumple cabalmente con sus necesidades asumiendo el pago de doble o hasta triple tarifa por supuestos transbordos impuestos por los propios concesionarios.

Por ejemplo, para el año 2016, en Querétaro la tarifa de transporte público colectivo urbano está en 8 pesos con tarjeta de prepago y 8.50 pesos en pago en efectivo para la capital, mientras que la tarifa para el resto del estado es de 7.50 pesos y para estudiantes y personas de la tercera edad se ubica en 6 pesos.

En San Luis Potosí se cobra entre 7.80 pesos en pago en efectivo y 7.60 en prepago; en Hidalgo, en su zona metropolitana, se cobra 8 pesos en el servicio de ruta fija, mientras que en el caso de Tulancingo, Tula, Tepeji y Tizayuca el costo del pasaje es de 7.50 pesos. En Chihuahua el costo del transporte público está en 8 pesos; en Guerrero el Acabús cobra 10 pesos; en Oaxaca, 7 pesos; en Tamaulipas y Coahuila 9 pesos (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo, ITDP, 2016).

Existe poca infraestructura no motorizada, el 62% de la longitud en corredores urbanos la condición de la vía pública para la movilidad peatonal es mala; escasas ciclovías, existen kilómetros de banquetas con distintas calidades para caminar, así mismo existen banquetas obstruidas por el comercio, falta de señalamiento de protección al peatón o al ciclista en cruces o intersecciones, la intermodalidad ciclista-transporte público prácticamente no existe, también se presenta la obstrucción de las banquetas por parte de automóviles.

Existe un alto número de parque vehicular. El estimado es de 355,813 vehículos registrados en el 2015, (sin contar los americanos e irregulares) (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2016).

En este sentido la alta motorización de las ciudades cercanas a la frontera no se debe sólo al grado de desarrollo económico de la región norte del país, sino también a la importación de vehículos usados de Norteamérica. La importación de estos autos, que sólo puede realizarse legalmente si tienen una antigüedad mayor a 10 años, también ha sido un factor fundamental para el crecimiento del parque vehicular en la última década.

La importación de autos usados de EEUU y Canadá podría representar hasta la mitad del incremento en el parque vehicular nacional desde el 2000 (Instituto Mexicano del Transporte, 2011).

La importación de vehículos usados a menudo supera las ventas de los nuevos: en 2011, siete de cada diez vehículos adicionales en circulación en el país fueron usados importados, en algunas ciudades fronterizas estos vehículos representan casi la totalidad del parque, por ejemplo, en 2007 el 90% de los vehículos en circulación en Ciudad Juárez eran usados importados de Estados Unidos (Centro Mario Molina, 2007).

En cuanto a la demanda de transporte público se observa que ha venido decreciendo, ya que, de 269, 519 viajes por persona al día en transporte público en 1998, decreció a 196,558 para el 2007 (USTRAN, 2007).

El transporte público por otra parte equivale al menos al 1% (1 568 unidades operando, incluyendo taxis y autobuses) del total. Alrededor del 48% es mayor de 10 años, existe alto índice de motorización en promedio 2.5 vehículos por vivienda en la ciudad.

### **1.3 Objetivos**

El presente estudio tiene como objetivo general, desarrollar una evaluación del sistema de transporte de la ciudad de Mexicali, Baja California, desde el paradigma de la sustentabilidad, a través, de la evaluación multicriterio, en particular del Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en ingles).

Los objetivos específicos son los de identificar los principios que deben de integrar un transporte sustentable, jerarquizar criterios a través de matrices de comparaciones pareadas para el establecimiento de alternativas, analizar las externalidades asociadas al sistema de transporte, caracterizar la estructura urbana y el sistema de transporte de la ciudad.

Las preguntas que sustentan esta investigación son: ¿Cuáles son los principios que desde el paradigma de la sustentabilidad debe incorporar el transporte? ¿Qué acciones de gestión deben de implementarse para alcanzar los principios de sustentabilidad en el sistema de transporte?

Este estudio propone establecer la evaluación del transporte como un sistema abierto, es decir considerando las interacciones del sistema de transporte, así como sus efectos no lineales,

que permita integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de diversos actores en un solo marco de análisis para dar una visión integral, que incluya factores de difícil medición.

En la perspectiva de diversos autores (Lloyd 2002; Perrow 1999; Sussman 2002), hay cuatro tipos de complejidad que parecen ser particularmente relevante para un sistema de transporte (Cuscuta et al., 2004; Sussman 2000):

1. Complejidad interna - El número y tipo de subsistemas, componentes y sus interconexiones describen el nivel de complejidad interna;

2. Comportamiento y complejidad - La interacción entre los subsistemas y sistemas es probable que resulte en propiedades 'emergentes' que hacen que el comportamiento de los componentes sea un sistema de difícil o imposible predecir;

3. Complejidad valorativa – Las diferencias de opinión entre los tomadores de decisiones y las partes interesadas de lo que constituye un diseño de un "buen" nivel de servicio / rendimiento conduce a la complejidad de evaluación; y

4. Complejidad anidada - La influencia de organizaciones complejas y el sistema político (es decir, el ámbito institucional) que tiene en los subsistemas físicos complejos. Aquí, los subsistemas físicos son imbuidos dentro del ámbito institucional.

Al utilizar este tipo de evaluaciones podría servir como un marco común para que, los decisores y planificadores comprendan lo que los impactos individuales significan, y cómo éstos podrían ser comparados entre sí, es decir, con entradas, flujos, procesos y salidas, que interactúan sobre el medio ambiente, manifestando ciertas relaciones causales entre los diversos elementos que lo componen, determinando así, sus características específicas, estableciendo jerarquías y

posibles estrategias que permitan integrar los principios de sustentabilidad en el sistema de transporte, a partir del método científico.

Por lo general, un problema de toma de decisiones tiene más de una perspectiva, y siempre hay un intercambio de prioridades entre los diferentes objetivos, defendidos por los diferentes grupos de interés o actores (stakeholders). Dentro de este contexto, la evaluación multicriterio es vista por algunos autores como la herramienta más adecuada a adoptar (Janic, 2003; Macharis, 2004, 2007; Tudela et al., 2006; Macharis et al., 2010).

#### **1.4 Justificación**

La evaluación del transporte como sistema se ha abordado desde varias disciplinas tales como: Ingeniería, Urbanismo, Economía; sin embargo, en la actualidad existen diferentes esfuerzos que pretenden evaluar al transporte desde la sustentabilidad, dada la complejidad que presentan las interacciones, los flujos entre los individuos, el territorio, los bienes, servicios y los recursos naturales.

Para Kolak, Akın, Birbil, Feyzioglu y Noyancla (2011), la evaluación multicriterio está siendo utilizada cada vez más en aspectos ambientales y de transporte en la toma de decisiones, debido a:

- La complejidad de las cuestiones involucradas,
- La necesidad de capturar de manera integral los impactos al medio ambiente, impactos económicos y sociales; y
- Las insuficiencias de herramientas convencionales como costo beneficio, costo eficiencia o la evaluación de impacto ambiental (EIA) para la captura de toda la gama de impactos de una política o de un proyecto.

Se reconoce cada vez más que la política de transporte produce tanto "efectos de red" y beneficios socio-políticos, los cuales son capturados de mejor manera utilizando un enfoque multicriterio (Bristow y Nellthorp, 2000).

Para Lakshmi, et.al, (2011) la importancia de la evaluación de la sustentabilidad del transporte como un proceso, radica en que, el transporte en sí mismo es una necesidad humana muy básica, sobre todo en las zonas urbanas, por ende, a medida que la población crece, también lo hará la demanda de transporte, así la sustentabilidad de los sistemas de transporte pueden contribuir en gran medida al desarrollo sustentable.

Por otro lado, la ventaja de la evaluación multicriterio respecto a la evaluación costo beneficio o, a la evaluación costo eficiencia, es su capacidad para tener en cuenta una amplia gama de diferentes criterios, u objetivos pertinentes, incluso, si estos criterios no se pueden expresar en términos monetarios, como es el caso de las externalidades, las comparaciones todavía, se pueden basar en las prioridades relativas.

Los métodos multicriterio más usados, incluyen:El proceso analíticojerárquico (AHP), la teoría de la utilidad multi-atributo (MAUT), y el método outranking entre otros.

En suma, las condiciones del sistema de transporte en la ciudad, presenta particularidades en su gestión y operación, que a partir de sus complejidades e interacciones, como lo pueden ser; la alta motorización, alta contaminación atmosférica y un transporte público con baja demanda, entre otras, hacen necesario el poder desarrollar metodologías de evaluación que permitan medir de manera integral todos estos aspectos priorizando un transporte eficiente y sustentable.

## **CAPÍTULO 2. Marco teórico**

### **2.1 Economía ambiental y ecológica**

La economía ambiental estudia el efecto que tiene la economía en el medio ambiente, la importancia del entorno ambiental para la economía y la forma apropiada de regular la actividad económica de tal manera que se logre un equilibrio entre los objetivos ambientales, económicos y otros de tipo social.

La esencia del problema ambiental radica en la economía: el comportamiento del productor y los deseos del consumidor.

Kolstad (2000), afirma que la esencia del problema ambiental en el comportamiento de los individuos en la Economía es – como se desarrolla la conducta maximizadora de beneficios de los productores y la conducta maximizadora de utilidad de los consumidores-.

El problema principal de los recursos naturales y ambientales es que todos los flujos de bienes y servicios que proveen a la sociedad tienen de manera parcial o no tienen un mercado donde asignarse. Por esta razón, los bienes ambientales y los recursos naturales, en la mayoría de las veces, son tratados como bienes gratuitos debido a que aparentemente son propiedad de todos (Carpintero, 2005).

La ausencia de los derechos de propiedad bien establecidos sobre los recursos imposibilita la asignación adecuada de un precio para el bien ambiental que haga que los recursos naturales y ambientales sean usados óptimamente (Mendieta, 2000).

En la teoría neoclásica del bienestar, supone que los individuos en una sociedad toman las mejores decisiones en cada situación. El bienestar de los individuos no solamente depende del

consumo de bienes y servicios privados y de los producidos por el sector privado y el gobierno, sino también de cantidades y calidades de flujos de bienes y servicios no mercadeables provistos por el sistema de recursos naturales y ambientales.

Cualquier cambio en la base de recursos naturales y ambientales traerá consigo un cambio en el bienestar de los individuos. Esta será una medida del valor del cambio en el recurso. Este enfoque de valoración económica también incluye la posibilidad de que los individuos asignen un valor a la supervivencia de algunas especies, sin tomar en cuenta el posible uso por parte de otras personas diferentes a ellos sino más bien, basado en motivos de tipo altruistas, éticos y morales.

Para Mendieta (2000) la metodología para la valoración económica de los recursos naturales y ambientales se fundamenta en la teoría económica clásica de medición de cambios en precios y cantidades de bienes comprados en mercados convencionales.

Esta teoría asume que las personas conocen sus preferencias, y que estas preferencias tienen la propiedad de sustituibilidad entre bienes mercadeables y no mercadeables. La sustituibilidad establece una tasa de intercambio (trade off) entre pares de bienes haciendo que esta sea la esencia del concepto económico de valor.

La medición del valor basada en la sustituibilidad puede ser representada por medio de la Disponibilidad a Pagar (DAP) o por medio de la Disponibilidad a Aceptar (DAA) definidas en términos de cualquier otro bien que el individuo esté dispuesto a sustituir por el bien que está siendo valorado.

La estimación del valor económico del medio ambiente, la disponibilidad a pagar marginal es la disponibilidad adicional a pagar de una persona por una unidad más de calidad

ambiental. Por otra parte, la disponibilidad a pagar total es la cantidad de dinero que está dispuesta a pagar una persona por obtener un nivel de consumo específico de calidad ambiental, en vez de no consumir este bien. Lo más común es plantear este pago en términos monetarios y que con esto se evita estimar el valor ambiental a partir del establecimiento de una tasa marginal de sustitución entre el bien ambiental y el resto de bienes de la economía con los cuales se puede producir un intercambio.

En la mayoría de las situaciones uno se encuentra hablando de beneficios, daños, costos ambientales y costos de contaminación de manera intercambiada. Cuando se está hablando de un costo, se refiere al efecto negativo en el bienestar de un cambio que ocurre cuando se destinan recursos para el control de la contaminación o el manejo del recurso. Se podría hablar igualmente de costos de control de contaminación o costos de contaminación (Gowdy, 1998).

Los beneficios ambientales son las ganancias asociadas con una mejora en el ambiente mientras que los términos daño ambiental o costo ambiental requiere de la identificación de un estado inicial de limpieza que sirva de referencia para representar el movimiento de este estado hacia uno con mayor contaminación.

Según Kolstad (2000), existen tres corrientes principales o enfoques base de asignación de valores a los recursos naturales y ambientales. El enfoque antropocéntrico, el enfoque conocido como Biocentrismo y el enfoque de Desarrollo Sostenible.

El enfoque antropocéntrico sigue como premisa fundamental el hecho de que los recursos naturales y ambientales deben tener un valor económico debido a que estos son útiles para los individuos. Esto significa que las personas utilizan estos recursos de manera directa o indirecta y a través del tiempo, y debido a esto es que las personas dan valor a tales recursos.

Esta teoría defendida ampliamente por los utilitaristas supone que los recursos naturales y ambientales generan bienestar a las personas y que debido a esto los individuos pueden asignar valores instrumentales e intrínsecos basados en argumentos espirituales y materiales.

El Biocentrismo según Nash (1989), este enfoque toma en cuenta diferentes puntos de vista filosóficos acerca de las personas y del medio ambiente.

Para Hernández (2008), el valor instrumental tiene que ver con el valor generado por utilizar un recurso natural o ambiental, es decir, el valor derivado de un recurso cuando este sirve como instrumento para alcanzar algún objetivo útil. Mientras que el valor intrínseco de un recurso no está relacionado con su grado de utilidad, al contrario, un recurso puede no ser útil pero si puede tener un valor intrínseco. El beneficio económico (valor instrumental y valor intrínseco) para la sociedad derivada de la existencia de esta especie bajo el enfoque antropocéntrico sería negativo.

Bajo el enfoque Biocentrista, esta especie tendría un valor económico positivo (fundamentalmente porque tiene un valor intrínseco) debido a que esta especie ocupa un lugar en la tierra y, por consiguiente, tiene derecho a existir.

El enfoque de Desarrollo Sostenible según la Comisión Brundtland (1987) lo define como "aquel desarrollo que satisface las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la habilidad de las futuras para satisfacer sus propias necesidades".

Bojo, Maler y Unemo (1990), afirman que el desarrollo económico en un área específica (región, nación, en todo el planeta) es sostenible si la reserva total de recursos – capital humano, capital físico reproducible, recursos ambientales, recursos agotables - no decrece con el tiempo. Si el capital físico o humano puede ser sostenido para un recurso ambiental, entonces dicho

recurso puede ser explotado de tal manera que el mismo sea drásticamente reducido si, y sólo si, las inversiones en las reservas de capital humano y físico son tales que la base total de recursos no sea reducida.

Solow (1992), define sostenibilidad como el hecho de asegurar que se ofrezca un nivel de bienestar a las generaciones futuras tanto como el que tienen las generaciones actuales. El resultado clave en este concepto es el hecho de que los bienes de capital (máquinas, computadoras, edificios) hechos por el hombre y su conocimiento son sustitutos de los bienes de capital natural (recursos naturales y ambientales).

La idea principal de este enfoque consiste en que los problemas ambientales surgen de lo que se es conocido como fallas de mercado. Es decir, situaciones en las que el mercado no funciona como un asignador óptimo de recursos. El medio ambiente en general, y muchos recursos naturales están vinculados con los conceptos de: externalidad, bien público y recursos comunes. La presencia de estas fallas de mercado está generalmente asociada a la ausencia de mercados para estos bienes y servicios ambientales.

El I Informe Meadows al Club de Roma (1971), “subrayaba la evidente inviabilidad del crecimiento permanente de la población y sus consumos: el crecimiento acumulativo continuado – y por tanto exponencial- sólo podía darse de modo transitorio en el mundo físico. ...”

Un antecedente que vincula la Ecología con la Economía es la primera crisis energética (1973) que según Naredo (2006) “indujo a reconsiderar los patrones de vida y de comportamiento de la civilización industrial”, lo que redundó en la búsqueda de alternativas energéticas que afectaron, fundamentalmente, los precios del petróleo.

La Economía Ecológica es un campo de estudio transdisciplinario, definido como la ciencia y gestión de la sustentabilidad. En la Economía Ecológica, se considera la economía como un subsistema incrustado en el ecosistema global del planeta tierra (biosfera), que es dinámico, sistemático y evolutivo y en el cual los seres humanos son un componente. Según Constanza (2003), son tres los problemas básicos sobre los cuales se enfoca la Economía Ecológica: asignación, distribución y escala, siendo esta última una de las diferencias más grandes entre la Economía Ecológica y la estándar.

Los pioneros en la Economía Ecológica -Podolinsky (1880), Geddes (1884) y Soddy (1921)-son autores, dentro del campo de las ciencias sociales y naturales del siglo XIX y principios del siglo XX, que se plantearon ciertos aspectos de la relación entre sistema económico y flujos de energía en la sociedad humana, una vez formuladas las leyes de la termodinámica. En sus escritos se hace notoria la exploración, sobre las implicaciones que la energía y las nociones termodinámicas podían tener para la sociedad y las ciencias sociales. De ahí, su importancia para la ulterior construcción de una Economía Ecológica.

Podolinsky (1850-1891) trabaja sobre la tesis de que, mediante la agricultura, la especie humana lograba ser como una máquina termodinámicamente perfecta. Es decir, que con la energía obtenida mediante el trabajo lograba alimentar su combustión interna, gracias no sólo al trabajo útil de los hombres y de los animales domésticos sino a la fotosíntesis realizada por las plantas encargadas de interceptar la energía proveniente del Sol al planeta.

Patrick Geddes (1854-1932), concebía la ciudad dentro de un marco regional y, desde un punto de vista ecológico, se cuestionaba acerca de los flujos de energía, de agua y de materiales que ingresaban a la ciudad y sobre el destino de los residuos.

Frederick Soddy, (1877-1956) argumenta que la humanidad vive gracias al flujo originario de energía que el Sol emana diariamente. Esta energía, transformada por las plantas en energía vital, es la verdadera riqueza, regida inexorablemente por las leyes de la termodinámica, por lo cual, las leyes de la naturaleza humana, no deben ir en contraposición a las leyes de la naturaleza.

Nicolás Georgescu-Roegen (1906-1994) fue un matemático rumano, estadístico de las Universidades de Bucarest y Sorbona, respectivamente y economista de la Universidad de Harvard, como alumno de Schumpeter. La tesis que Georgescu-Roegen se propone argumentar en su libro y que, es su mayor aportación a la naciente teoría económica, la Economía Ecológica, muestra que la esencia básica del proceso económico es entrópica, y que la Ley de la Entropía rige en grado sumo, este proceso y su evolución.

Según Georgescu-Roegen (1966) el proceso económico está gobernado por las leyes de la entropía, como un proceso irreversible que transforma materia y energía (con baja entropía) en residuos (de alta entropía). De otro lado, el carácter entrópico de los procesos económicos es la raíz de la escasez, pues la materia y la energía son escasas, en la medida en que los recursos accesibles son limitados.

Georgescu aportó nuevos argumentos a la discusión sobre los límites del crecimiento al introducir la ley de la entropía con una connotación económica. De este análisis surge un marco de trabajo que se propone determinar la escala óptima de la economía, tema que hoy está en la agenda de una buena parte de los economistas ecológicos.

Roegen es conocido por establecer la segunda ley de la termodinámica que señala que la entropía explica la degradación de la energía, o bien, su paso de energía útil a no útil. Por tanto,

esta ley termodinámica indica que el aprovechamiento de las cualidades de los recursos naturales, tiene límites.

Esta ley implica que a medida que los recursos naturales son transformados, pasan de un estado de baja entropía a uno de alta entropía. Cuando la entropía es baja, la materia puede transformarse en productos útiles para el ser humano. Ocurre lo contrario con niveles altos de entropía.

En términos económicos convienen niveles bajos de entropía ya que los materiales pueden ser transformados en cosas útiles, con menos inversión de energía. La baja entropía se asocia a una alta calidad de los recursos, y la alta entropía a lo contrario.

Su estudio acerca de la ley de la entropía y los efectos de ésta sobre la producción, lo lleva a concluir que el sistema productivo debe ser tal que, minimice el aumento de la entropía. Su modelo de producción denominado flujo-fondos de servicios, expresa esa intención, ya que se trata de un modelo en estado estacionario, en el cual el objetivo es reducir la tasa de insumos y desperdicios del proceso.

El modelo busca mantener, hasta donde sea posible, intacta la eficiencia de los factores de la producción –en el sentido de mantenerlos en buenas condiciones de funcionamiento–, de manera que los periodos de sustitución de los mismos sean más largos (Manrique, 2009).

El argumento basado en la ley de la entropía para probar la existencia de límites biofísicos, se tradujo en una crítica hacia la manía por el crecimiento. Este planteamiento ha nutrido el debate aún vigente en la economía ecológica en torno a la definición del tamaño óptimo de la economía. En esta discusión se trata de definir las tasas de uso de recursos naturales y los niveles de población compatibles con una capacidad de carga dada de los ecosistemas.

El transporte como una actividad humana que tiene la capacidad de influir sobre otras actividades haciéndolo un sistema complejo con relaciones a diferentes escalas, se hace necesaria la inclusión de herramientas en la valoración de las externalidades ambientales como lo son; la Economía Ambiental y Economía Ecológica, entre otras, para poder establecer los límites al propio sistema, en aras de un crecimiento económico equilibrado y armónico con el medio físico.

Para cuantificar el progreso hacia los objetivos del desarrollo sostenible en el transporte, es fundamental definir indicadores.

## **2.2 Valorizando el medio ambiente**

La valoración ambiental pretende obtener una medición monetaria de la ganancia o pérdida de bienestar o utilidad que una persona, o un determinado colectivo, experimenta a causa de un daño o mejora de un activo ambiental accesible a dicha persona o colectivo.

Según Azqueta (2002 p. 30) se distinguen tres tipos de valor:

*Valor Inmanente, que pertenece a la esencia misma del ser de modo inseparable, y tienen los seres u objetos por sí mismos, con independencia de su reconocimiento por parte de quien puede hacerlo.*

*Valor Intrínseco, que siendo esencial e íntimo al sujeto que lo posee, es otorgado por un ente ajeno al mismo, y es, pues un valor derivado.*

*Valor Extrínseco, que es el que poseen determinados seres u objetos inanimados, sin ser característica esencial de los mismos, porque así tiene a bien otorgárselo quien puede hacerlo.*

La valoración ambiental puede definirse formalmente como un conjunto de métodos y técnicas que permitir medir las expectativas de beneficios y costos derivados de algunas de las siguientes acciones:

- a) Uso de un activo ambiental;
- b) Realización de una mejora ambiental y;
- c) Generación de un daño ambiental.

La escuela de la economía ambiental que defiende que todos los valores son antropocéntricos, instrumentales y utilitarios; es decir, derivan de su utilidad para los seres humanos. El valor económico de un bien ambiental pretende reflejar de alguna manera lo que se sacrifica o a lo que se renuncia para mantener ese activo ambiental.

Hicks (1943) propuso dos conceptos que permiten medir rigurosamente las pérdidas o beneficios de bienestar asociados a un cambio de los precios. Estos conceptos son los de variación compensatoria y variación equivalente.

Además de la renta, hay otros factores que influyen en la diferencia entre la disposición a pagar (WTP) y la disposición a aceptar (WTA): El número y calidad de los sustitutos para el bien en cuestión (Hahnemann, 1991): si no hay buenos sustitutos la diferencia será grande. El concepto de aversión a las pérdidas (Kahneman y Tversky, 1979): en general, los humanos valoran más de lo que ya se tiene, que lo que se podría tener, y por tanto se da más valor a las pérdidas que a las ganancias.

### 2.3 Elección social

Arrow (1963, 1972) reconoce que el mercado, formalmente interpretado a través del modelo de equilibrio general, es un mecanismo de coordinación de la oferta y la demanda de los individuos que actúan de manera descentralizada y se comunican a través de las señales de precios. También admite que el mercado falla. Las falencias del mercado son sintetizadas por Arrow en tres tipos: externalidades y bienes públicos, distribución del ingreso e incertidumbre.

La teoría de la elección social es pertinente, justamente, para encontrar una respuesta a los problemas no resueltos a través del mercado.

Se pueden considerar varios enfoques para tomar decisiones sociales. El primero se denomina criterio de Pareto y se refiere básicamente a la votación unánime; una variante de este criterio se llama principio de compensación. El problema de Pareto es que muchos paquetes no son susceptibles de ser comparados, lo que conduce a no poder completar el ordenamiento de los paquetes de bienes. El criterio de Pareto es una forma de unanimidad: si nadie se opone a C respecto de B, entonces C es Pareto preferida a B (o tal vez exista indiferencia). La compensación resuelve parcialmente esta dificultad, pero un paquete de compensación es, en realidad, un paquete diferente de uno que carece de ella.

Según Barragán (2006) los valores individuales que la gente asigna al medio ambiente pueden variar mucho, desde el Antropocentrismo entendida como la tendencia en la que el hombre siente su superioridad ante los demás seres vivos, por su inteligencia, voluntad y capacidad de amar libremente, y por el dominio que tiene sobre la naturaleza, que es mayor al que poseen los animales, pues estos están reducidos a las leyes de sus instintos y emociones más o menos desarrollados, al Biocentrismo que establece que la sede del valor son los seres vivos, por

ser portadores de cualidades valiosas. Entre las tendencias que reconocen valor moral a todos los seres vivos, unas están a favor y otras en contra de la jerarquización de dicha valoración.

El ecocentrismo, o gaicentrismo, plantea que la sede del valor son los ecosistemas, o la biosfera como “sistema de ecosistemas”; los individuos no son moralmente relevantes, lo son totalidades, como clases sociales, comunidades étnicas, ecosistemas o la misma biosfera, anteponiendo el mundo biológico en toda su expresión como el centro del sistema de valor.

La meta de la política pública es desarrollar formas de elecciones sociales referentes a la protección ambiental, que sean robustas para cualquier tipo de sistema de valores que la población pueda tener: Biocentrismo, Sustentabilidad, Antropocentrismo o cualquier combinación o mezcla de ellos. Al dar por hecho la forma como la gente valora individualmente el medio ambiente, volvimos a los mecanismos de elección social, formas de traducir los valores individuales a valores y decisiones de grupo.

El mercado juega un papel fundamental en la resolución de como maximizar el beneficio: el mercado es como una inmensa cámara de compensación en la que se procesa toda la información que las personas proporcionamos con respecto a nuestras preferencias y a nuestras posibilidades, y de la que surgen unas señales sobre el valor de las cosas: los precios (Hall, 2006).

## **2.4 Externalidades**

La valoración de externalidades permite, detectar las posibles fuentes de conflicto potencial entre los distintos agentes y colectivos afectados por una medida, la sustitución de la flota de transporte público para introducir vehículos menos contaminantes, por ejemplo, o por la ausencia

de ella, el aumento en la concentración de numerosas sustancias tóxicas en la atmósfera (De la Cámara, 2008).

Una externalidad negativa (o coste externo), ocurre cuando la acción de un individuo resulta en pérdidas de bienestar no compensadas para otro. Esta pérdida de bienestar tiene dos características esenciales: es un efecto unilateral puesto que, quien la padece, no pudo decidir si quería padecerla o no, ni, sobre todo, qué pérdida de bienestar estaba dispuesto a asumir; por otro lado, como se ha apuntado, es una pérdida de bienestar sin compensación. De hecho, si la pérdida fuese compensada, la externalidad, desde un punto de vista económico, no existiría.

Las externalidades causan distorsiones en el uso de los recursos porque la sociedad no paga el precio del bien en cuestión; de ese modo, el problema reside en estimar el precio que debería prevalecer ante el mal funcionamiento del mecanismo de precios del mercado.

Hay varias dificultades que deben tomarse en consideración respecto a la posibilidad de reconocer las externalidades. Una de ellas tiene que ver con el hecho de que debe establecerse un vínculo explícito entre el impacto ambiental en cuestión y la merma del bienestar de una persona o un conjunto de ellas.

La evidencia de la existencia de externalidades asociadas a la mayor parte de las actividades económicas, conduce sistemáticamente a un dilema social: ¿qué pérdida de bienestar está dispuesta a aceptar la sociedad para disfrutar de los bienes y servicios que la generan? Los dilemas sociales son situaciones en que la racionalidad individual conduce a la irracionalidad colectiva, es decir, el comportamiento individual racional (pese a que no parezca razonable – lo razonable forma parte de un juicio de valor), lleva a una situación en la que todo el mundo está peor de lo que podría haber estado.

La combinación de las externalidades, bienes públicos, recursos comunes de libre acceso, impide que los servicios de la biosfera alcancen un precio, y dentro de la racionalidad del sistema de mercado se le trate como si carecieran de valor. Las personas (empresas, consumidores) actúan, de hecho, como si ese recurso tuviera un valor nulo (tiene, a diferencia de lo que se adquiere en un mercado, un precio cero) y, en la medida de lo posible, sustituirán a la adquisición de cualquier cosa por la que se tenga que pagar, por estos servicios gratuitos.

El teorema de Coase afirma que, en ausencia de costos de transacción, el problema causado por las externalidades podría resolverse asignando en favor de una de las partes del derecho de propiedad sobre el medio a través del que se transmite la externalidad: dejando a favor de una de las partes la definición de lo que se puede y no se puede hacer en ese medio.

Cuando el impacto ambiental negativo es inaceptable, porque afecta a alguno de los equilibrios ecológicos básicos del sistema, se ha visto como el valor buscado tomaba la forma del precio sombra de la restricción: es decir, el costo económico de seguir manteniendo el equilibrio en presencia del impacto.

La ausencia de precio para las funciones de la biosfera se debe a la ausencia de un mercado donde poder intercambiarlos, y esta, a su vez, a la inexistencia de derechos de propiedad bien definidos sobre las mismas, se han explorado las posibilidades que ofrece la privatización de la biosfera como medio de solución de los problemas ambientales.

A escala mundial el transporte motorizado contribuye en 25 % al consumo de los combustibles fósiles, en Europa el transporte consume 30 % de la energía. Un alto porcentaje del consumo de combustibles fósiles se realiza en los automóviles particulares. Según estudios del World Watch Institute de Washington, Estados Unidos de América, a finales de 1999 hubo un total

de 520 millones de automóviles en el mundo, un promedio de 11.5 carros por cápita. Pero las densidades de automóviles son muy diferentes, con un promedio de un carro por 2 y 3 personas en América del Norte, Europa y Japón, y un carro por 226 personas en India o 279 personas en China(Möller, 2003).

¿Qué cantidad de contaminación atmosférica se produce en una ciudad?, depende, entre otros factores, de la densidad de la población que vive en ella, quiere decir, la manera como está ocupado el espacio urbano. Cuanto menos densa vive la población, tanto más se debe gastar en la movilidad de los habitantes de las ciudades. La densidad de la población urbana es más alta en Europa que en Australia y Estados Unidos. Los australianos consumen relativamente menos gasolina para su movilidad que los norteamericanos, aunque en ciudades con una baja densidad comparable.

A continuación se describen las principales externalidades originadas por el transporte:

#### **2.4.1 Congestión**

La congestión por el tráfico vehicular es una condición caracterizada por bajas velocidades. Tiene lugar cuando la demanda de espacio vial es más grande que la capacidad en infraestructura. Los impactos son bien conocidos: tiempo de viajes más largos, poco fiables y, en última instancia, efectos económicos negativos como resultado de una distribución ineficiente en la entrega de bienes, servicios y recursos (Santos, et. al, 2009).

En su trabajo seminal sobre la economía de la congestión, Walters (1961) estableció el isomorfismo entre el tiempo de viaje en una longitud dada de la carretera como una función del flujo de tráfico (relación de velocidad- flujo), por un lado, y el costo promedio como una función de flujo, en el otro lado.

Una conversión adecuada del tiempo en costo, combinado con una curva de demanda, hace que todo el análisis se integre desde un punto de vista económico. Los flujos de tráfico más altos causan una reducción de la velocidad media e incrementa los tiempos de viaje y los costos por km. El tráfico adicional impone unos costos externos en todos los demás usuarios de la carretera. Bajo condiciones de congestión, especialmente en las zonas urbanas, y en ausencia de carreteras eficientes en precios, el tráfico será sobrecargado y, por tanto, excesivo.

Litman (2012), señala que el tránsito tiene una demanda creciente de espacio (entre más espacio se le procura más se expanden). Así, al aumentar la oferta de vialidades, el tránsito sólo aumenta. Empíricamente esto ha sido demostrado en diversas ciudades alrededor del mundo. El PNUMA (2011) señala que el aumento de vialidades no está correlacionado con una disminución en los tiempos de traslado en diversas ciudades del mundo.

En el largo plazo, el kilometraje total recorrido por todos los vehículos en una ciudad aumenta en la misma proporción que crece la longitud de su red vial (manteniendo constante todo lo demás). Este principio recibe el nombre de “ley fundamental de la congestión vial” y fue postulado en 2009 por dos economistas norteamericanos, Gilles Duranton y Matthew A. Turner. Aún si el parque vehicular no aumentara, la construcción de vialidades no podría aliviar la congestión porque simplemente incentivaría a que la gente utilizara más sus autos. Este fenómeno se conoce como “demanda inducida”: cuando el aumento en la oferta de un bien ocasiona que aumente su demanda (IMCO, 2012).

Uno de los factores que más alienta el uso del automóvil es la expansión de la ciudad y un modelo de urbanización difuso. Una ciudad entre más expandida y con menor densidad de

población territorialmente fuerza a sus habitantes a utilizar el automóvil para tener acceso a bienes y servicios (Medina, 2012).

La dificultad para trasladarse al interior de una ciudad, ya sea por la congestión o por la ineficiencia del transporte público, se traduce en millones de horas perdidas cada día. Para las personas el tiempo es un bien finito, un insumo que se usa para generar riqueza y realizar las actividades que incrementan su bienestar.

Una forma de estimar el valor del tiempo es considerando la productividad promedio de un trabajador o empresa. Una hora perdida a causa de la mala movilidad es una hora menos para agregar valor a cualquier actividad productiva. Esto es lo que se denomina costo de oportunidad.

Para un trabajador típico, el valor de su tiempo es su productividad, que se aproxima a su salario. Cuando este trabajador se ve forzado a dedicar una mayor proporción de su tiempo a realizar traslados en la ciudad, está pagando un costo más elevado para producir lo mismo y obtener el mismo ingreso. Su tiempo tiene un valor económico, independientemente de cuántas horas decide trabajar y cuántas dedica al ocio y la recreación.

A través de esta lógica, es posible estimar el valor del tiempo que se pierde en una ciudad a partir de la diferencia en los tiempos de traslado respecto a sí misma en el tiempo o bien respecto a otra ciudad similar en tamaño y población (IBM, 2011).

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) el traslado promedio en 2007 era de 53 minutos (Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal, 2007). En el Área Metropolitana de Nueva York -mucho mayor en extensión a la ZMVM, con una población similar - el traslado promedio era de 36 minutos en 2009. (UnitedStatesCensus Bureau, 2010). Si se multiplica la diferencia en tiempos de traslado (17 minutos) por el número de traslados

realizados diariamente en la ZMVM por motivos de trabajo (11.2 millones) se obtiene un número de horas de trabajo perdidas: 3.16 millones al día, u 826 millones al año.(Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal (2007).

Si se multiplica el número de horas por el valor económico de cada una –aproximado con el salario promedio de cotización al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) en la ZMVM, 252 pesos diarios en 2007– se obtiene el valor del tiempo perdido por mala movilidad: 30 mil millones de pesos al año. Dado que la población económicamente activa en la ZMVM ascendía en 2007 a 8.2 millones de personas, se puede estimar que el valor del tiempo que pierde cada trabajador por la mala movilidad fue de 3,625 pesos anuales.

Esta estimación tiene limitaciones importantes, y es inapropiado inferir a partir de ella que una mejora en la movilidad se traducirá automáticamente en mayores ingresos para la población, pero es una aproximación al valor del tiempo que se pierde en la ciudad más grande del país a causa de una movilidad deficiente (IMCO, 2012).

#### **2.4.2 Accidentes**

Los accidentes como externalidades surgen “cuando cada vehículo adicional en la carretera aumenta la probabilidad de que otros usuarios de la carretera estarán involucrados en un accidente” (Newbery, 1990). Aunque es razonable asumir que entre más vehículos en circulación, mayor es la probabilidad de accidentes, hay evidencia de un comportamiento de compensación, los conductores tienden a conducir a velocidades más bajas y los peatones y ciclistas tienden a tener más cuidado en el tráfico pesado (Newbery, 1990 y Parryetal, 2007).

El impacto de un vehículo adicional en el riesgo de accidente es difícil de precisar (Brownfield, et al., 2003). Los costos de los accidentes externos son aquellos costos sociales de

los accidentes de tráfico que no son cubiertos por las primas de seguro en función del riesgo. Por lo tanto, el nivel de los costos no dependen únicamente del nivel de accidentes, sino también del sistema de seguridad (Santos, et.al. 2010).

Las categorías más importantes de costos de accidentes son: los daños materiales, los gastos administrativos, los gastos médicos, pérdidas de producción y los llamados valor del riesgo como una aproximación para estimar el dolor y el sufrimiento causados por accidentes de tráfico en valores monetarios. Sobre todo este último no está cubierto adecuadamente por el sector privado en los sistemas de seguros.

Los factores de costo más importantes en el transporte por carretera son, además de vehículo kilómetros, tipo de carretera, las características de los conductores (cómo conducir, conducta, experiencia, exceso de velocidad), la velocidad y el volumen de tráfico, la hora del día (día / noche) y la interacción con las condiciones climáticas. El nivel de mantenimiento de infraestructura, el grado de utilización de la capacidad de infraestructura y el nivel de separación entre los carriles de carretera juega también una regla importante, junto con desarrollos tecnológicos en vehículos (medidas de seguridad activa y pasiva) así como en la infraestructura (por ejemplo, la gestión del tráfico) (Maibach, 2008).

Hay dos enfoques para medir los costos externos por accidentes a considerar:

- De abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo: el enfoque de abajo hacia arriba (Bottom up): tiene como objetivo estimar los costos marginales de accidentes según los volúmenes de tráfico. La magnitud de los costos depende de la elasticidad riesgo (correlación entre los niveles y accidentes de tráfico) y en el supuesto de valores de riesgo. Este enfoque es coherente con el enfoque del costo social marginal y la fijación de precios eficientes. Teniendo en cuenta el

hecho, sin embargo, que los volúmenes de tráfico y el tipo de infraestructura son sólo dos factores de costo entre muchos otros, no todos aspectos de la externalidad están cubiertos.

- El enfoque de arriba hacia abajo (top-down) estima el total y costos promedio de accidentes teniendo en cuenta las estadísticas nacionales de accidentes y del sistema de seguros. Se centra en los daños materiales y los costos administrativos, las pérdidas de producción y valoración social de los riesgos (por lo general externos).

Se considera principalmente las pérdidas de producción y el valor de la vida humana como externos. Dado que sólo partes de los costos totales de accidentes son considerados, de abajo hacia arriba el enfoque conduce a valores más bajos que el enfoque de arriba hacia abajo.

En México cada año en promedio mueren 16,500 habitantes por accidentes de tránsito. Con base en el Reporte sobre la situación de la seguridad vial 2013 de la Organización Mundial de la Salud, 2013, nuestro país ocupa el lugar número trece entre los países que concentran el 62% del total de fallecimientos. Sin embargo, ocupa la posición 98 entre 198 países al reportar una tasa de 14.4 muertos por cada 100 mil habitantes, esta tasa se ubica por debajo de la tasa promedio para la región de las Américas (16.1) y por encima del promedio de la región europea (10.3).

Según el INEGI (2012), en la ciudad de Mexicali los accidentes para el 2011 fueron de 2570, con 283,741 automóviles registrados para el mismo año.

Los distintos países adoptan diferentes metodologías para estimar costes de los accidentes, el número de accidentes y el número de víctimas son por los indicadores cuantitativos clave (Reino Unido DFT, 2009). En los países desarrollados, estas estadísticas no suelen ser problemáticas

para recolectar. En los países en desarrollo, algunos accidentes se informaron, pero no se registraron correctamente (Pedental, 2004.).

La complicación principal surge en el momento de la monetización de los diferentes costes de los accidentes, tales como daños materiales, varios gastos administrativos, costos en el cuidado de la salud, el dolor, la pena y el sufrimiento impuesto a las víctimas y sus amigos a las familias, el más importante y controversial componente, el valor de la vida.

La metodología de Maibach et al. (2008) establece que el valor económico de accidentes es igual al saldo de accidentes por los costos unitarios (los que asumen directamente los propietarios) por accidentes y los costos externos de accidentes (los que imputan a terceros o a la sociedad).

$$\text{\$EAT}=\text{SAT}\cdot\text{\$U}$$

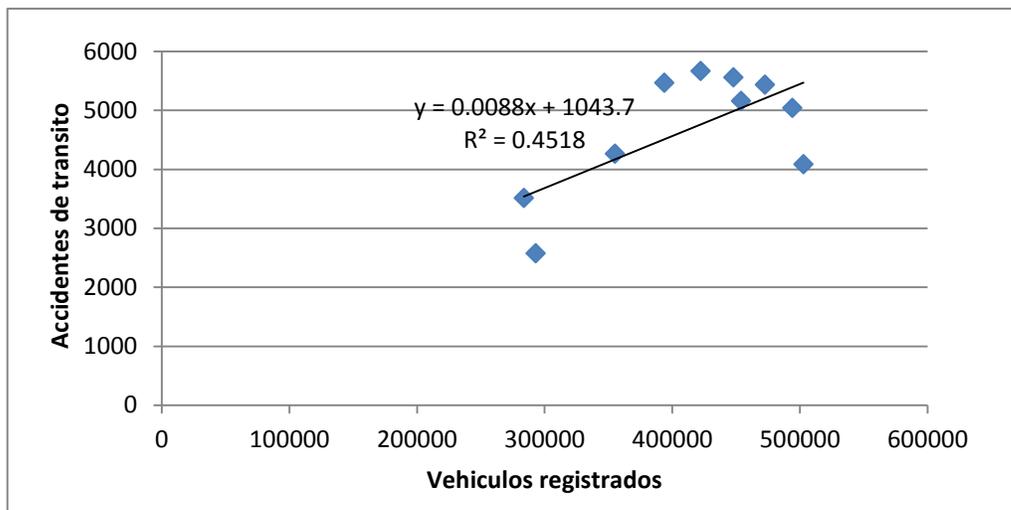
Dónde:  $\text{\$ EAT}$  = Valor económico por accidentes.  $\text{SAT}$ = Saldo de accidentes.  $\text{\$U}$ = Costo del accidente (la magnitud del saldo por su valor unitario).

Para efectos de observar la relación que guarda el parque vehicular con los accidente en la tabla 1, se supone que pudiese haber un efecto de compensación descrito anteriormente, se comprueba una relación directa entre las dos variables a través de un análisis de regresión simple con datos del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI, 2012), donde se tiene como variable independiente los vehículos registrados del 2002 al 2011 y a los accidentes de tránsito como variable dependiente.

Tabla 1. Accidentes y su relación con el parque vehicular

Año	X	Y	Xi-X	Yi-Y	(Xi-X)(Yi-Y)	(Xi-X) <sup>2</sup>	(Yi-Y) <sup>2</sup>
2002	355239	4259	-56774,60	-413,20	23459264,72	3223355205,000	170734,24
2003	453930	5154	41916,40	481,80	20195321,52	1756984859,000	232131,24
2004	393924	5463	-18089,60	790,80	-14305255,68	327233628,200	625364,64
2005	422357	5662	10343,40	989,80	10237897,32	106985923,600	979704,04
2006	448098	5557	36084,40	884,80	31927477,12	1302083923,000	782871,04
2007	472760	5430	60746,40	757,80	46033621,92	3690125113,000	574260,84
2008	494232	5036	82218,40	363,80	29911053,92	6759865299,000	132350,44
2009	502836	4083	90822,40	-589,20	-53512558,08	8248708342,000	347156,64
2010	283741	3508	-128272,60	-1164,20	149334960,90	0,002	1355361,64
2011	293019	2570	-118994,60	-2102,20	250150448,10	0,141	4419244,84
Σ	4120136	46722			493432231,76	25415342292,943	9619179,60

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2013)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2013)

Figura 2. Grafica de dispersión de accidentes.

Por lo tanto al realizar la regresión, así como la gráfica de dispersión (figura 2), se obtiene que:

1. La covarianza nos dice que existe una dependencia directa o positiva.
2. El coeficiente de correlación indica que existe una correlación moderada .
3. El coeficiente de determinación nos muestra que el 45.17% de la variación de los accidentes de tránsito es explicada por la variación de los vehículos registrados, es decir, la variable independiente (VI) explica en un 45.17% a la variable dependiente (VD).
4. Con un 95% de confianza, se puede decir que con cien mil unidades de vehículos en circulación se obtendrán entre 1,016.44 y 3,103.84 accidentes de tránsito.

### **2.4.3 Contaminación del aire**

Los costos de la contaminación del aire son causados por la emisión de contaminantes del aire como partículas PM, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y COV y consisten en los costos de salud, materiales/ construcción, pérdidas de cosechas y costos de otros daños y perjuicios para el ecosistema (biosfera, suelo, agua). Los costos de salud (principalmente causadas por PM, de emisiones por escape o transformación de otros contaminantes) son, con mucho, el costo más importante.

El estado de la investigación sobre estos costos es mucho más avanzado que la de los otros componentes, basados principalmente en las estimaciones realizadas por el ExternE, modelo financiado por varios proyectos de la Unión Europea. Los costos de la contaminación del aire no sólo surgen de las emisiones de contaminantes atmosféricos relacionados con el transporte, pero también de otras fuentes, como la industria, la agricultura y los hogares privados.

La contaminación del aire relacionada al transporte causa daños a los seres humanos, la biosfera, la tierra, agua, edificios y materiales. Los contaminantes más importantes son los siguientes:

- Partículas:  $PM_{10}$   $PM_{2.5}$

- Óxidos de nitrógeno:  $NO_x$ ,  $NO_2$

- Óxidos de Azufre:  $SO_2$ .

- Ozono:  $O_3$ .

- Compuestos orgánicos volátiles: COV

Medina (2012) señala que hay estudios internacionales que muestran estos efectos: En Italia, (Ciccone et al., 1998) se halló que la proximidad a calles con mucho tránsito resulta en aumentos del 70% de bronquitis, 80% de neumonía y 10% de síntomas de asma en niños. Estudios realizados en Austria, Francia y Suiza señalan que 3% de las muertes (20 mil) se asocia con la contaminación del aire proveniente del tránsito vehicular (Kunzli et al., 2000). En Holanda se estimó que el riesgo de morir de una enfermedad cardiovascular y pulmonar es 2 veces más alto para personas viviendo cerca de calles principales (Hoek et al., 2002). Mientras que en Alemania se estudió que en pacientes con infarto cardiaco el riesgo al infarto casi se triplicó al haber estado en el tránsito dos horas previas al infarto (Peters et al., 2004).

Maibach (2008), menciona que los costos de la contaminación del aire es una categoría central de los costos externos. Una cantidad considerable de estudios sobre la metodología, así como estudios sobre los costos totales, medio y marginal de la contaminación están disponible. Dentro de los proyectos de investigación europeos del impacto está el Enfoque Pathway

establecido en el proyecto ExternE (ExternE, 1997; Friedrich y Bickel, 2001) y CAFE CBA, (2005) son de uso común y herramientas ya muy avanzadas.

El método ExternE es un enfoque bottom-up originalmente con el objetivo de estimar los costos marginales para diferentes situaciones de tráfico. La fuerza de este enfoque es su coherencia y la consideración de las diferentes variables de entrada detallados. Sin embargo, es más bien costosa con el fin de derivar promedio (d) y figuras representativas en el nivel nacional. Así simplificados enfoques de arriba hacia abajo se han desarrollado como un alternativa (sobre todo utilizado en Suiza (OSD, 2004)). Aunque los supuestos de respuesta son similares, los valores finales pueden diferir, debido a la utilización de diferentes modelos de concentración de contaminación del aire y las diferentes características de las emisiones (por ejemplo, la consideración de escape y otras partículas debido a la abrasión y re suspensión).

Hidalgo y Huizenga (2013) proponen ciertos valores para las emisiones: Monóxido de Carbono (CO) USD 1000.0/ton; Hidrocarburos (HC) USD 2200.0/ton; Óxido de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)-USD 2500.0/ton; Dióxido de Sulfuro (SO<sub>2</sub>) USD 800.0/ton; Materias Particuladas (PM) USD 30,500.0/ton; Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) USD 20.0/ton. Estimándolo por tonelada/millón de personas /por día.

Para el caso de la ciudad de Mexicali, existen inventarios de emisiones por parte del Instituto Nacional de Ecología (2006, 2008, 2010, 2011) que permiten identificar quiénes son los generadores de emisiones y su aporte de contaminantes a la atmósfera por sector.

Dentro de las fuentes principales de emisiones al aire en la ciudad de Mexicali destacan, en el caso del CO, las generadas por automóviles, fuentes fijas o instalaciones industriales; mientras que en el caso de las PM<sub>10</sub> se encuentran la falta de pavimentación y la presencia de

lotes baldíos, de las anteriores, una fuente principal de emisiones al aire en la ciudad es el transporte vehicular (principalmente los automóviles), por lo que las vialidades y nodos primarios que representan una alta densidad de vehículos constituyen focos principales de emisiones de CO.

Otros puntos importantes de emisiones vehiculares los representan las garitas o puertos transfronterizos donde se presenta un intenso flujo vehicular.

## **2.5 Desarrollo sustentable y movilidad**

La definición más conocida de desarrollo sustentable es la definición Brundtland (WCED, 1987). Si bien esta definición reconoce la importancia de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales y futuras, estas necesidades sólo pueden cumplirse si el medio ambiente es capaz de (soportar) a la población humana. Los principios básicos de que las actividades humanas se mantendrán dentro de la capacidad de carga de la tierra son más claramente articuladas por Herman Daly (1991):

- 1. "El principio fundamental es la de limitar la escala humana (rendimiento) a un nivel que, si no es óptima, está por lo menos dentro de la capacidad de carga y por lo tanto sostenible. Los siguientes principios tienen por objeto traducir esta restricción general de un nivel macro a nivel micro.*
- 2. "El progreso tecnológico para el desarrollo sostenible debe ser creciente eficientemente en vez de rendimiento creciente. ..."*
- 3. "Los recursos renovables, tanto en su origen y funciones de sumidero, deben aprovecharse sobre la base del rendimiento que maximiza el beneficio sostenido y, en general, (independientemente de los dictados de la maximización del valor presente), ya que será cada vez*

*más importante a medida en que se agotan... En concreto este significa que: (a) las tasas de recolección no deben superar las tasas de regeneración, y (b) las emisiones de residuos no debe exceder la capacidad renovable de asimilación del ambiente."*

*4. "Los recursos no renovables deben ser explotados, pero a una tasa igual a la creación de sustitutos renovables."*

La interrelación entre la dimensión económica, social y ambiental respecto al grado de sustitución entre el capital natural y el capital construido, ha estado en el centro del debate en la "sostenibilidad débil" frente a "la sostenibilidad fuerte" (Daly, 1995; Holland 1997; Ekins 2011; Wu 2013).

La "sostenibilidad débil" asume la sustitución ilimitada entre el capital natural (es decir, la biodiversidad y ecosistemas) y el capital construido por el hombre (por ejemplo, máquinas y la infraestructura urbana), para que un sistema sea considerado sostenible, será siempre que su cantidad total de stocks de capital no disminuya, mientras que la "sostenibilidad fuerte" asume que lo construido por el hombre y el capital natural no son sustitutos sino "básicamente complementarios" (Daly 1995).

La sostenibilidad ambiental se indica mediante conceptos tales como, el calentamiento global, efecto invernadero, el agotamiento de la capa de ozono, biodegradación, el cambio en el ecosistema y los ciclos de vida, el agotamiento de la energía y los recursos, etc. (Talbot, 1993. Cooper, 1993).

En 1992, el concepto de transporte sustentable comenzó a tomar forma en la Cumbre de Río de Janeiro, en su programa 21 - el plan de acción de la Declaración de Río – que incluía dos capítulos. Específicamente en el capítulo 7, que cubre asentamientos humanos sostenibles, desde un enfoque integral en la planificación del transporte urbano, se centró en la manera de promover

la "eficiencia y el transporte urbano ambientalmente racional en todos los países "(ONU, 1993).

A cada nación se le pidió:

(a) Integrar el uso del suelo y transporte con miras a fomentar patrones de desarrollo que reduzcan la demanda de transporte;

(b) Adoptar programas de transporte urbano favoreciendo el transporte público de gran capacidad, en los países, según corresponda;

(c) Alentar a los modos no motorizados de transporte, proporcionando ciclovías seguras y aceras en los centros urbanos y suburbanos en los países, según corresponda;

(d) Prestar especial atención a la gestión eficaz del tráfico, la operación eficiente de transporte público y el mantenimiento de la infraestructura de transporte;

(e) Promover el intercambio de información entre los países y los representantes de áreas locales y metropolitanas;

(f) Re-evaluar el consumo actual y los patrones de producción con el fin de reducir el uso de la energía y los recursos nacionales.

En la actualidad las políticas transporte difieren mucho de una ciudad a otra, de un país a otro, al igual que los patrones de viaje de las personas en estas ciudades y países. Pero, a pesar de las diferencias aparentes en sus operaciones y tecnología, están cumpliendo con una exigencia básica para el transporte: la movilidad y la accesibilidad.

La manera de moverse y de poder acceder al transporte influye en la localización de la actividad social y económica, le da forma y tamaño a las ciudades, facilita el comercio, permite

mayores economías de escala, además, hacen que se expanden las conexiones culturales y sociales, aumentando las oportunidades de empleo, educación, así como en salud.

Sin embargo, Según Petrus (2005), en muchas ciudades, especialmente de los países en desarrollo, muchas personas no tienen acceso a la infraestructura de transporte adecuada y de medios para transportarse, ya que estos no están disponibles ni accesibles para ellos.

La política de planeación en el transporte ha cambiado con el tiempo, en respuesta a, por ejemplo, el aumento del rendimiento del vehículo, el aumento de la congestión, así como también el aumento en la conciencia de los problemas ambientales.

Las estrategias y los objetivos han cambiado desde el poder establecer las acciones para satisfacer plenamente la demanda del transporte, a una, donde la planificación del transporte este orientada, por prueba y error, para saber efectivamente lo que se requiere.

A su vez el conocimiento sobre el comportamiento de los viajes de las personas en las zonas urbanas ha mejorado, los tomadores de decisiones, con el apoyo de los modeladores de transporte, están cambiando las políticas de planeación enfocándose en la gestión del espacio vial.

La oferta y demanda de transporte se puede analizar desde una perspectiva sistémica. Primero habría que definir los límites de un sistema, desde este punto de vista hay tres definiciones útiles: sistema, sistema complejo, y un sistema de ingeniería desarrollado por Magee y de Weck (2002):

- Sistema: un conjunto de componentes relacionados que tienen bien definidos (aunque posiblemente mal entendido) el comportamiento o el propósito, el concepto es subjetivo en lo que es un sistema, para una persona puede no parecerse un sistema a otro.

-Sistema Complejo: un sistema con numerosos componentes e interconexiones, interacciones o interdependencias que son difíciles de describir, entender, predecir, gestionar, diseñar y / o cambiar.

-Sistema de ingeniería: un sistema diseñado por los seres humanos que tienen algún propósito, sistemas de ingeniería de escala y complejos... tendrá una gestión o social dimensión así como una técnica”.

El propósito del sistema de transporte es permitir a las personas moverse entre los orígenes y destinos. La demanda de transporte es por lo general una demanda derivada de las actividades sociales (SACTRA 1999). Por ejemplo, la demanda de transporte de carga surge de la de transportar mercancías y materiales entre los compradores y los vendedores. La demanda de transporte de pasajeros es más compleja.

En términos económicos, estos viajes suministran mano de obra a la producción. En segundo lugar están los relacionados a los viajes de consumo, en los que la gente viaja para acceder a las tiendas, ocio, centros de salud o viajes para llegar a un destino turístico, en este grupo, la demanda de transporte se deriva de una necesidad / deseo de adquirir bienes (por ejemplo, alimentos, ropa, etc.) o recibir un servicio o experiencia en el destino. En tercer lugar están los viajes que surgen de la necesidad humana de permanecer en contacto con familiares y amigos. Por último, están los viajes que la gente hace por puro placer de viajar (por ejemplo, montar en moto a lo largo de una carretera abierta) (Gilbert, 2000).

Se puede asumir que existen dos categorías de beneficios económicos - es decir, a corto plazo y largo plazo- que pudiera derivarse de la inversión en transporte (Bata y Drennan, 2003).

A corto plazo los beneficios se relacionan con las ganancias económicas temporales que se pueden atribuir al aumento de la actividad laboral y económica asociada a un proyecto de transporte (por ejemplo, la construcción de una nueva intersección, línea de ferrocarril, o la ruta de bicicleta).

Los beneficios a largo plazo se relacionan a los beneficios económicos que se obtienen después de la finalización de un proyecto de transporte. Las ganancias pueden ser medidas por un aumento de la producción, la productividad (es decir, la producción por unidad de entrada), ingresos, valor de la propiedad, el empleo, los salarios reales, la accesibilidad, la calidad de vida, etc., o por una disminución en los costes de producción y tiempo de viaje no comercial y costos (George, 1996).

Un sistema de transporte puede ser descrito como un sistema abierto - es decir, que interactúa con su medio ambiente. El entorno en que opera el sistema de transporte puede definirse en términos de personas (es decir, la sociedad; gobierno, grupos de interés, y usuarios), los componentes físicos, la economía, y lo natural.

En un sistema de transporte, es posible identificar tres tipos generales de movimiento que están asociados con las entradas y salidas del sistema. En primer lugar es el movimiento de personas y mercancías (incluido el petróleo y el gas transportado a través de gasoductos), que entran en el sistema como origen y dejan el sistema en un destino final. Este tipo de movimiento es el medio por el cual las necesidades humanas fundamentales, tales como la conectividad, la autonomía y sustento se cumplen.

El segundo es el movimiento de la energía y de la materia, que entran en el sistema como combustible, materiales de construcción y productos (tales como vehículos, equipos, etc) y dejan el sistema como emisiones, residuos o material que se recicla. La cantidad y tipo de materia y energía que se suministra al sistema deriva de la demanda de servicios de pasajeros y de transporte de carga.

Finalmente, está el movimiento de la información, que puede mejorar la gestión, operación y funcionamiento del sistema de transporte, o aliviar la necesidad de la gente Por trasladarse (por ejemplo, a través de las TIC, como el teletrabajo, escuela a distancia, etc.).

Dada las complejidades que se presentan en los sistemas de transporte está propuesta de evaluación involucra la utilización de una jerarquización, para describir al sistema permitiendo la el que se puedan considerar cómo los cambios en un sistema pueden afectar a otros subsistemas, con un enfoque sostenible, donde la comprensión de cómo las políticas dirigidas propiamente a mejorar el sistema de transporte podría incidir positivamente por ejemplo, en la reducción de emisiones contaminantes del aire.

### **2.5.1 Movilidad y accesibilidad**

Accesibilidad (o sólo acceso) se refiere a la facilidad de mercancías, servicios, actividades y destinos, que en conjunto se denominan oportunidades. Puede ser definido como el potencial para la interacción y el intercambio (Hansen 1959; Engwicht 1993). Por ejemplo, las tiendas de comestibles proporcionan acceso a los alimentos. Bibliotecas e Internet proporcionan acceso a la información. Caminos, carreteras y aeropuertos facilitan el acceso a los destinos y, por lo tanto las actividades (también llamadas oportunidades).

La accesibilidad puede ser definida en términos de potencial de oportunidades (que podrían ser alcanzados) o, en términos de actividad (oportunidades que se alcanzan). Incluso las personas que no utilizan actualmente una forma particular de acceso pueden valorar tenerlo disponible para su posible uso futuro, llamado valor de opción. Por ejemplo, los automovilistas pueden valorar contar con servicios de transporte público disponible en caso de ser incapaz de conducir en el futuro (Litman, 2012).

La movilidad se define como una medida de acción humana con la que la gente decide moverse a sí mismos y a sus mercancías, depende del rendimiento del sistema de transporte disponible y las características individuales. La accesibilidad indica la proximidad física, o la capacidad y la facilidad de llegar a varios destinos o lugares ofreciendo oportunidades para una actividad deseada. 'Acceso' es una palabra que puede ser confundido en transporte en comparación, para su uso. En los estudios de transporte es en gran parte sinónimo de "accesibilidad", en la literatura tiene un uso mucho más general relacionada con la capacidad de las personas para obtener y utilizar un activo (Bryceson, et al.2003).

La movilidad se refiere al movimiento físico, medido por los viajes, la distancia y la velocidad, como persona-millas o-kilómetro para viajes personales, y las toneladas-milla o de toneladas-kilómetro para los viajes de mercancías. Todo lo demás es igual, mayor movilidad incrementa la accesibilidad: los que más y más rápido pueden viajar, más destinos pueden alcanzar (Litman 2012).

El diccionario American Heritage cuarta edición define la "movilidad" como "la cualidad o estado de ser móvil" y "Móvil" como "capaz de moverse o de moverse fácilmente de un lugar a otro" (Picket et al. 2000). El Diccionario Oxford de Inglés define la "movilidad" como la

"capacidad de moverse o ser movido..... facilidad de movimiento "(OED, 2002). En el contexto de la planificación del transporte, la movilidad ha sido definida como el potencial para el movimiento, la capacidad de ir de un lugar a otros (Hansen 1959; Handy 1994).

La accesibilidad ha sido un tanto más difícil para los planificadores de definir y medir. El diccionario American Heritage cuarta edición define la "accesibilidad" como "fácil de alcanzar " (Picket et al. 2000). El Diccionario Inglés de Oxford define "accesibilidad" como "la calidad de la posibilidad de acceso, o de la admisión de enfoque "(OECD 2002).

Accesibilidad era tal vez más claramente definido para el contexto de la planificación por Hansen (1959) como "el potencial para la interacción." En la mayoría de los casos, las medidas de accesibilidad incluyen tanto un factor de impedimento, lo que refleja el tiempo o el coste de alcanzar un destino, y un factor de atracción, reflejando las cualidades de los destinos potenciales.

Parte de la confusión en el uso de estos términos puede derivar de la relación entre ellos. Movilidad, el potencial de movimiento, está relacionado con el componente de impedimento de la accesibilidad, en otras palabras, lo difícil que es llegar a un destino. Las políticas para aumentar la movilidad generalmente aumentan la accesibilidad y por lo que es más fácil de alcanzar destinos (Deng, 2011).

Es posible tener una buena accesibilidad con poca movilidad. Por ejemplo, una comunidad con congestión grave, pero donde los residentes viven a poca distancia de todo lo necesario y deseado tiene poca movilidad pero una buena accesibilidad. En este caso, la accesibilidad no depende de una buena movilidad (Geurs, 2004).

Es posible tener una buena movilidad pero mala accesibilidad. Por ejemplo, una comunidad con calles amplias y bajos niveles de congestión, pero con relativamente pocos destinos para ir de compras u otras actividades o destinos indeseables o inadecuados, tiene buena movilidad pero poca accesibilidad. Buena movilidad no es una condición suficiente ni una condición necesaria para una buena accesibilidad (Handy, 2002)

Se considera entonces que el debate que se está dando sobre qué aspectos son más relevantes o significativos dentro del campo de la sustentabilidad en el transporte tienen que ver con el enfoque al que se le ha dado predominantemente importancia: la movilidad. Las estrategias de movilidad tienen ciertas limitaciones, un creciente cuerpo de evidencia sugiere que, por ejemplo, la construcción de caminos o de infraestructura, no son sostenibles desde un punto de vista financiero.

Un área que puede ser más significativa o más integral es la accesibilidad, sus estrategias plantean desafíos significativos, incluyendo las divisiones tradicionales entre agencias con responsabilidades en la planificación del transporte y los que tienen la planificación urbanística, así que, para ejercicios de transversalidad en el sistema puede ser una opción a considerar manejar la accesibilidad integrando todos los elementos que permitan evaluar el transporte de la ciudad.

### **2.5.2 Transporte sustentable**

Según Kennedy et al. (2007), una ciudad sustentable puede solamente ser una, en la cual el flujo de entrada de material, energía, y la eliminación de los desechos, no superen en ella la capacidad del entorno circundante de la ciudad.

Para lograr la sustentabilidad del medio ambiente urbano el consumo debe ser igual o por debajo de lo que el medio ambiente natural- como los bosques, el suelo y los océanos – pueden proporcionar, y los contaminantes resultantes no deben ser predominantes a la capacidad del medio ambiente para proveer recursos a los seres humanos y otros miembros del ecosistema (Comisión Europea, 2015).

Así, el concepto del metabolismo urbano, concebido por Wolman(1965), es fundamental para el desarrollo de ciudades y comunidades. El metabolismo urbano puede definirse como "la suma total de los procesos técnicos y socio-económicos que ocurren en las ciudades, lo que resulta en crecimiento, producción de energía y eliminación de residuos " (Kennedy et al., 2007).

En este sentido, a partir de la necesidad de reducir el consumo de recursos naturales, el consumo energético, la reducción de emisiones contaminantes, la necesidad de mejora de la movilidad, de seguridad, se ha venido construyendo el concepto de transporte sustentable, con esfuerzos institucionales principalmente como el de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1996, p.12), que, define inicialmente un sistema de transporte ambientalmente sostenible como aquel en el que:

*"Transporte... no ponga en peligro la salud pública de los ecosistemas y cumpla con la movilidad consistente con (a) la utilización de recursos renovables por debajo de su tasa de regeneración y (b) el uso de los recursos no renovables por debajo de los índices de desarrollo de las energías renovables sustitutos."*

El Consejo de la Unión Europea (2004, p. 10) propuso una definición más compleja:

*"un sistema de transporte sostenible permite el acceso básico y el desarrollo a las necesidades de las personas, empresas y sociedades que, deben cumplirse de forma segura y de una manera consistente con la salud de los ecosistemas, y, la cual, promete equidad intra e inter"*

*generacional, es asequible, opera de manera justa y eficiente, ofrece una elección en los modos de transporte y apoya una economía competitiva, así como al desarrollo regional equilibrado; limita las emisiones y los residuos dentro de la capacidad de absorción del planeta, utiliza recursos renovables en, o, por debajo de sus tasas de generación, y, utiliza los recursos no renovables en, o, por debajo de los índices de desarrollo de sustitutos renovables, reduciendo al mínimo el impacto sobre la tierra y la generación de ruido.”*

El Centro de Transportación Sostenible en Canadá, (2000, p. 5), define el transporte sostenible como aquel, que:

*“Permite el acceso a las necesidades básicas de los individuos y sociedades con seguridad y de manera compatible con la salud humana y de los ecosistemas, con equidad intra e intergeneracional. Es asequible, opera con eficacia, ofrece una elección de modos de transporte y apoya una economía competitiva. Limita las emisiones y los residuos dentro de la capacidad del planeta para absorberlos, minimiza el consumo de los recursos no renovables, el consumo de los límites de los recursos renovables para un nivel de producción sostenible, reutiliza y recicla sus componentes, y reduce al mínimo el uso del suelo y la producción de ruido.”*

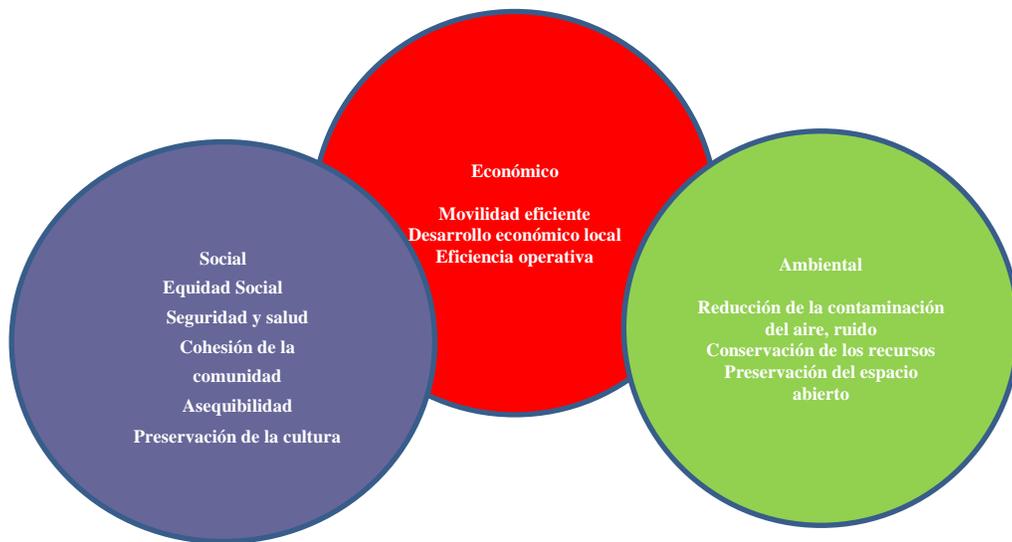


Figura 3. Objetivos del transporte sustentable. Fuente: Litman (2012) Victoria TransportPolicyInstitute

En la figura 3 se muestran los objetivos del transporte sustentable que propone Litman (2012), donde las políticas de planeación deben incluir aspectos integrales que puedan interactuar de forma transversal como lo pueden ser desde el ámbito social; el tema de equidad, seguridad social, cohesión, que permitan un desarrollo económico local a través de la eficiencia del sistema concordando con el aspecto ambiental que va desde la disminución de la contaminación del aire, ruido, preservación de recursos, etc.

A partir de estas definiciones se considera que el concepto que pudiese ser adecuado desde nuestro entorno sería aquel transporte, que de oportunidades de acceder a la movilidad de una forma segura, asequible, eficiente y que limite las externalidades negativas.

El transporte como actividad conlleva el desarrollo de sistemas sostenibles, incluida la energía eficiente, sistemas multimodales de transporte, sistemas de comunicación en especial de transporte público, combustibles y vehículos limpios, así como la mejora de los sistemas de transporte en las zonas rurales (Zhang, 2013).

El transporte sustentable puede impulsar el crecimiento económico y mejorar la accesibilidad, logrando una mejor integración económica, mientras se lleva a cabo el cuidado del medio ambiente, como un medio para mejorar la equidad social, la salud, aumentar la productividad de las zonas rurales (Litman, 2012).

## **2.6 Medición de la sustentabilidad en el transporte**

En el pasado, las decisiones y la evaluación de los sistemas de transporte se basaron en un enfoque limitado, proporcionado por el análisis económico. Otros métodos se han desarrollado durante los últimos años para complementar el análisis costo – beneficio (CBA), (por sus siglas en inglés) convencional. Hoy en día, el concepto de desarrollo sostenible se utiliza para evaluar los efectos que no tienen precio y que son cualitativos (Paix, López, 2011).

Para Rossi, Gastaldi y Gecchele (2012) la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de transporte ha sido abordada por varios métodos, que pueden agruparse en ocho categorías:

1. Análisis del ciclo de vida (LCA) , con aplicaciones limitadas en los sistemas de transporte;
2. Análisis Costo-Beneficio (ACB) y Análisis de Costo-Efectividad (CEA) que consideran el equivalente monetario de los efectos positivos y negativos de las alternativas del proyecto;
3. Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), a veces incluido en el transporte;
4. Modelos de optimización, que se aplican en el contexto del transporte sostenible;
5. Sistema de modelos dinámicos, que describen las relaciones entre los elementos del sistema mediante el examen de los flujos de variables en el tiempo y mecanismos de reacción;
6. Modelos de indicadores de evaluación, que se subdividen según el modelo de índice compuesto (por ejemplo, la huella ecológica o el producto nacional bruto verde), los modelos de índices de varios niveles, y matriz multidimensional de los modelos;
7. El método de análisis de datos, que utiliza técnicas estadísticas para evaluar la sostenibilidad;

8. Análisis de decisiones multicriterio (MCDA) métodos, que incluyen metodologías conocidas como función de utilidad multiatributo, (TUMA), proceso analítico de jerarquías (AHP) y los métodos ELECTRE.

Desde el análisis de costo-beneficio se pretende valorar los impactos esperados de una opción en términos monetarios. Estas valoraciones se basan en una teoría económica bien desarrollada de valoración basada en la disposición a pagar o para aceptar. Esta teoría puede actuar como una guía de cómo se debe lograr valoración y como árbitro en disputas sobre la valoración. Las valoraciones se basan en la voluntad de pago de los potenciales ganadores de los beneficios que reciben como resultado de la opción, y, la disposición de los posibles perdedores a aceptar la indemnización por las pérdidas que tendrá que abonar (Christy, 2007).

Petersen (1995) menciona que la evaluación de los proyectos (CBA) presenta una serie de dificultades, incluyendo la naturaleza de los impactos (a menudo difíciles de cuantificar en términos monetarios), y de la naturaleza de los objetivos propios (no necesariamente siempre relacionados con la eficiencia económica).

El análisis costo efectividad (CEA), se deriva de la investigación en las industrias militares y espaciales, tiene como objetivo seleccionar la alternativa de menor costo que alcanza un nivel predefinido de eficacia. La medida de eficacia refleja la puesta en marcha de un objetivo político específico. Sin embargo, el objetivo de la política en sí, es prefijado, y no está sujeta a una evaluación crítica de su conveniencia (por ejemplo, si los beneficios superan los costos en realidad) (De Brucker, Macharis, Alain Verbeke, 2011).

El estudio (regional) de impacto económico (REIS) tiene algunas similitudes con la visión clásica de la economía de Adam Smith, que se centró en el papel de la producción. Los

intentos de REIS por medir la producción adicional (o valor agregado) causalmente relacionados con un proyecto (Keeney, 1993).

La evaluación de Impacto Ambiental (EIA) se estableció como una herramienta de evaluación en sí misma como Goudzwaard (1970) y las ideas de Huetting (1970) de "nueva escasez" fueron ganando terreno. La EIA describe los posibles impactos que un proyecto pueden tener sobre el medio natural (fauna, flora, aire, suelo, agua, paisaje, etc.) y en la salud humana, para que los tomadores de decisiones pueden tener en cuenta estos efectos al momento de decidir sobre la aceptación, modificación o rechazo de un proyecto.

La planificación de escenarios se acerca esencialmente a incorporar factores de incertidumbre asociados por ejemplo, a la población, el empleo y a la demanda de viajes. El proceso de planificación del transporte puede incorporar el análisis de escenarios que exploran una lista de opciones / escenarios razonables para abordar diversos aspectos de sostenibilidad, como, la integridad del medio ambiente, la seguridad y la movilidad (Christy, 2007).

Modelos de sostenibilidad cuantitativos se han aplicado en varios estudios europeos, incluyendo modelos como: Sistemas de Planificación e Investigación de Centros y Ciudades para la Sostenibilidad Urbana, (SPARTACUS)(por sus siglas en ingles), y la Evaluación económica de la sostenibilidad y políticas de transporte, (ESCOT). El estudio SPARTACUS utiliza un sistema integrado del transporte y un modelo de uso del suelo, (MEPLAN), con el fin de evaluar la sostenibilidad de los escenarios de uso de la tierra y del transporte. El modelo que incluye la interacción del transporte y la interacción de usos del suelo capta cómo el grado de acceso (accesibilidad) que, proporciona el sistema de transporte, puede influir en la distribución del

territorio, y, a su vez, cómo el desarrollo del espacio puede influir en gran medida en los patrones de viajes regionales (Brucker et.al, 2011).

Glaister (1999) y Price (1999) han utilizado un nuevo enfoque de evaluación (NATA), el cual representa un cambio significativo respecto a los tradicionales análisis de coste-beneficio (CBA). NATA evalúa los impactos en cinco objetivos generales: Economía, Medio Ambiente, Seguridad, Accesibilidad e Integración y, al hacerlo incluye y expande el enfoque de CBA. También, divide a los cinco objetivos en sub-objetivos (por ejemplo, en medio ambiente se considera el ruido, la contaminación del aire, paisaje urbano, biodiversidad, patrimonio, el agua y los gases de efecto invernadero).

### **2.6.1 Principios indicadores en el transporte sustentable**

Los principios son conceptos generales de organización que ayudan a definir las metas, objetivos, prácticas e indicadores.

Zheng, et al. (2011) discuten formas de seleccionar los principios para el funcionamiento de un transporte sustentable, proponiendo:

1. Asequibilidad. El transporte es asequible para los individuos.
2. Movilidad. El transporte proporciona movimiento eficiente de personas y mercancías por razones de actividad económica, social y educativa.
3. Equidad Financiera. El transporte se financia de manera equitativa.
4. Resiliencia. El transporte es resistente a las fluctuaciones económicas.

En este sentido el Ministerio de medio ambiente de Canadá desarrollo ciertos principios hacia la consecución de un transporte sustentable:

- Accesibilidad: Mejorar el acceso a las personas, bienes y servicios, pero reduciendo la demanda para el movimiento físico de personas y mercancías.
- Toma de decisiones: Hacer que las decisiones del transporte sean de una manera abierta e inclusiva, que tenga en cuenta todos los efectos y las posibilidades razonables.
- La planificación urbana: la expansión del límite, asegúrese de mezclas locales de usos de suelo.
- Fortalecer el transporte público.
- Facilitar el caminar y andar en bicicleta.
- Proteger los ecosistemas, el patrimonio, los servicios de recreación, y racionalizar el transporte de mercancías.
- Protección del medio ambiente: Reducir al mínimo las emisiones y reducir los residuos de la actividad del transporte, reducir el ruido y el uso de los recursos no renovables, en particular los combustibles fósiles, y, garantizar una capacidad adecuada para responder a derrames y otros accidentes.
- Viabilidad económica: Internalizar los costes externos del transporte, incluidos los subsidios. Considerar los beneficios económicos incluyendo el aumento del empleo que podría ser el resultado de la reestructuración del transporte.
- Formar alianzas con los países desarrollados y en vías de desarrollo con el fin de crear e implementar nuevos enfoques para el transporte sostenible.

Como se observa en la tabla 2, Litman (2014), a su vez, propone algunos principios retomando el principio de individualización de las acciones y los costos que se puedan asumir al tomar decisiones en relación con la necesidad de moverse considerando el medio ambiente, protegiendo la salud física y mental de las personas, haciendo un uso eficiente de los recursos.

Tabla 2. Principios de transporte sustentable

<b>Principios</b>	<b>Concepto</b>
Accesibilidad	Las personas tienen derecho a un acceso razonable a otras personas, lugares, bienes y servicios.
Equidad	La satisfacción de las necesidades básicas relacionadas con el transporte de todas las personas, incluyendo a las mujeres, los pobres, a las zonas rurales y los discapacitados.
Salud y Seguridad	Los sistemas de transporte deben ser diseñados y operados de manera que se proteja la salud (física, mental) y la seguridad de todas las personas, y mejore la calidad de vida de las comunidades.
Responsabilidad individual	Todos los individuos tienen la responsabilidad de actuar como protectores del medio ambiente natural, la elección de tomar decisiones sostenibles en relación con sus movimientos y el consumo personal.
Planeación integral	Los tomadores de decisiones de transporte tienen la responsabilidad de adoptar enfoques más integradores para su planificación.
Prevención de la contaminación	Las necesidades de transporte se deben cumplir sin generar emisiones que amenacen la salud pública, la diversidad biológica o la integridad de los procesos ecológicos esenciales.
Uso de Suelo, recursos	Los sistemas de transporte deben hacer un uso eficiente de la tierra y otros recursos naturales, mientras que, garantizan la conservación de los hábitats vitales y otros requisitos para el mantenimiento de la biodiversidad.
Viabilidad económica	Los sistemas de transporte sostenibles deben ser rentables. Si los costos de ajuste al que incurren en la transición a los sistemas de transporte más sostenibles deberían también, compartirse equitativamente.
Contabilidad de costos	Los tomadores de decisiones de transporte deben avanzar lo más rápidamente posible hacia costos más representativos, lo que refleja los verdaderos costos sociales, económicos y ambientales, con el fin de garantizar que los usuarios pagan una parte equitativa de los costos.

Fuente: Litman (2014)

Los indicadores por su parte, pueden ser definidos como la selección de las variables específicas y conscriptas, que reflejen preocupaciones públicas y, que sean de utilidad para los tomadores de decisiones. Es entonces, posible construir índices compuestos por la agregación de un conjunto de indicadores seleccionados.

Los indicadores son las cosas que medimos para evaluar el progreso hacia las metas y objetivos. Los indicadores deben ser cuidadosamente seleccionados para proporcionar información útil (USEPA, 2008).

En la mayoría de situaciones, un solo indicador no es adecuado, por lo que un conjunto de indicadores deben ser seleccionados. Este conjunto debe reflejar una amplia gama de metas y objetivos de planificación. Las personas que usan indicadores deben comprender sus perspectivas y limitaciones. Es deseable que los datos sean adecuados para la comparación con otras jurisdicciones, tiempos y organizaciones (Litman, 2005).

En la órbita de actuación europea, una amplia línea de investigación y desarrollo en materia de sistemas de indicadores de transporte y sostenibilidad, para la consideración en la toma de decisiones de los responsables de la política de transporte, procede de proyectos incluidos en los Programas Marco Comunitarios financiados por la Comisión Europea.

Para Rahman y Van Groos (2015) los casos más ilustrativos en este sentido son, entre otros, Sustainable Mobility, Policy Measures and Assessment, (SUMMA), Procedures for Recommending Optimal Sustainable Planning of European City Transport Systems, (PROSPECTS) y Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability, (PROPOLIS), financiados por el Quinto Programa Marco 1998 – 2002, Refinement and Test of Sustainable Indicators and Tools with Regard to European Transport,

(REFIT), Scientific Forum on Transport Forecast Validation and Policy Assessment, (TRANSFORUM) y Tools for Transport Forecasting and Scenario Testing, (TRANS-TOOLS), financiados por el Sexto Programa Marco 2002 – 2006.

Dentro de estos indicadores existen desde, económicos, sociales, ambientales, etc. a continuación se describen algunos de ellos:

- a) Indicadores económicos. El desarrollo económico se refiere al progreso de la comunidad hacia los objetivos económicos como el aumento de los ingresos, la riqueza, el empleo, la productividad y el bienestar social. El término bienestar (como el usado por los economistas) se refiere al total de bienestar y la felicidad humana. Las políticas económicas son generalmente destinadas a maximizar el bienestar, aunque esto es, difícil de medir directamente, por lo que los indicadores tales como el ingreso, la riqueza y la productividad (por ejemplo, el Producto Interno Bruto [PIB]) se utilizan. Estos indicadores pueden ser criticados por diversos motivos (Cobb, Halstead y Rowe 1999; Dixon 2004; Schepelmann, Goossens y Mäkipää 2010);

Ellos sólo miden los bienes de mercado y por lo tanto pasan por alto otros factores que contribuyen al bienestar como la salud, la amistad, la comunidad, el orgullo, la calidad del medio ambiente, etc.

Estos indicadores dan un valor positivo a las actividades destructivas que reducen la salud de las personas y la autosuficiencia, y, por lo tanto aumentan el consumo de los servicios médicos, en detrimento de los alimentos, y del transporte motorizado. A medida que se utilizan normalmente estos indicadores, no reflejan la distribución de la riqueza (aunque pueden ser utilizados para comparar la riqueza entre diferentes grupos) (Browne, 2010).

Los indicadores económicos del transporte sostenible deben reflejar los beneficios y costos del uso del automóvil, y la posibilidad de que más movilidad motorizada refleje una reducción en la accesibilidad global y de la diversidad de transporte, en lugar de una ganancia neta de bienestar social. El aumento de la movilidad que proporciona beneficios netos pequeños o negativos para la sociedad puede ser considerada para reducir la sostenibilidad, mientras que las políticas que aumentan los beneficios netos de cada unidad de movilidad se puede considerar para aumentar la sostenibilidad (Litman, 2012).

b) Indicadores sociales. Los impactos sociales incluyen la equidad, la salud humana, la habitabilidad en la comunidad (calidad ambiental local experimentada por los residentes y visitantes) y la cohesión de la comunidad (la calidad de las interacciones entre los miembros de la comunidad), los impactos sobre los recursos históricos y culturales (tales como sitios históricos y actividades tradicionales de la comunidad) y la estética. Varios métodos se pueden utilizar para cuantificar estos impactos (Forckenbrock y Weisbrod 2001; Litman 2009; Mendes, Mochrie y Holden 2007), incluyendo:

- Índice de Desarrollo Humano del Programa de las Naciones Unidas
- Índice de Calidad de Vida
- Índice de Prosperidad del Instituto Legatum
- Encuesta de Calidad de Vida Mercer

c) Indicadores Ambientales

Los impactos ambientales incluyen diversos tipos de contaminación del aire (incluidos los gases que contribuyen al cambio climático), el ruido, la contaminación del agua, el

agotamiento de recursos no renovables, la degradación del paisaje (incluyendo pavimento o daños a las tierras ecológicamente productivos, la fragmentación del hábitat, trastornos hidrológicos debido a la acera), efecto isla de calor (aumento de la temperatura ambiente como resultado de pavimento), y las muertes de la fauna por las colisiones. Varios métodos se pueden utilizar para medir estos impactos y cuantificar sus costos ecológicos y humanos (EEA, 2001; Litman, 2009; FHWA, 2004; Joumard y Gudmundsson, 2010).

Por su parte Litman (2006), establece que para seleccionar indicadores, muchos impactos se pueden evaluar mejor utilizando indicadores relativos, tales como tendencias en el tiempo, comparaciones entre diferentes grupos o actividades dentro de la jurisdicción, o comparaciones con otras jurisdicciones. Los indicadores pueden reflejar si las tendencias son positivas o negativas respecto a los objetivos.

En este sentido Litman propone la integración de indicadores para evaluar al transporte sustentable a través del modelo Victoria Transport Policy Institute (VTPI), (ver tabla 3).

La selección de criterios puede ser apropiada utilizando un conjunto limitado de indicadores que reflejen la escala, los recursos y responsabilidades de un sector, jurisdicción o agencia particular, por lo tanto, es importante seleccionar cuidadosamente indicadores que reflejen los objetivos generales, siendo realistas al seleccionar estos, teniendo en cuenta la disponibilidad de datos, su comprensión y utilidad en la toma de decisiones.

Tabla 3. Modelo Victoria Transport Policy Institute (VTPI)

Objetivo	Indicador	Direccion	Datos
<i>Económico</i>			
Accesibilidad-desplazamiento.	Tiempo promedio de viaje conmutado.	Menos es mejor	3
Accesibilidad - uso del suelo.	Número de oportunidades de empleo y servicios comerciales dentro de la distancia de viaje de 30 minutos de sus hogares.	Mas es mejor	1
Accesibilidad - crecimiento inteligente.	Aplicación de políticas y Prácticas de planificación que busquen la accesibilidad, densidad, desarrollo multimodal.	Mas es mejor	1
Diversidad de transporte	Porcentaje de viajes realizados de forma pedestre, andar en bicicleta, viajes compartidos, transporte público y teletrabajo.	Mas es mejor	2
Asequibilidad	Porcentaje de gastos del hogar dedicado al transporte en un 20% de los hogares de menores ingresos.	Menos es mejor	2
Costos de la infraestructura	Los gastos per cápita en carreteras, Servicios de tráfico y aparcamientos.	Menos es mejor	3
Eficiencia de carga	Velocidad y asequibilidad de vehículos de carga y transporte comercial	Mas es mejor	1
Planeación	Grado en que las instituciones reflejan menores costos en la Planeación y en las prácticas de inversión.	Más es mejor	1
<i>Social</i>			
Seguridad	Accidentes percápita que provocan discapacidades y Fatalidades.	Menos es mejor	3
Salud	Porcentaje de población que regularmente camina y anda en bicicleta.	Más es mejor	1
Habitabilidad de la comunidad	Grado en que las actividades de transporte aumentan la habitabilidad de la comunidad (Calidad ambiental local).	Mas es mejor	1
Equidad-Justicia	Grado en que los precios reflejan plenamente todos los costos a menos que una subvención sea Justificada.	Mas es mejor	1
Equidad - no conductores	Calidad de la accesibilidad en los	Más es mejor	1

	servicios de transporte para los no conductores.		
Equidad - discapacidad	Calidad de los medios y servicios de transporte para personas con discapacidad. (Por ejemplo, usuarios de sillas de ruedas, personas con impedimentos visuales).	Más es mejor	2
Planeación Transporte no motorizado	Grado en que los impactos del Transporte no motorizado Son considerados en la planeación y modelación.	Más es mejor	1
Participación ciudadana	Participación pública en el proceso de planeación del transporte.	Más es mejor	1
<b>Ambiental</b>			
Emissiones que contribuyen al cambio climático	El consumo per cápita de combustibles fósiles, Emisiones de CO <sub>2</sub> y otras emisiones.	Menos es mejor	3
Otras contaminaciones atmosféricas	Emisiones per cápita de contaminantes atmosféricos "convencionales" (CO, VOC, NOx , Partículas, etc.)	Menos es mejor	3
Contaminación acústica	Parte de la población expuesta a altos niveles de ruido por el tráfico	Menos es mejor	2
Contaminación del agua	Pérdida de fluidos por vehículo per cápita	Menos es mejor	1
Impactos del uso de suelo	Superficie per cápita dedicada a medios de transporte	Menos es mejor	1
Protección del hábitat	Conservación del hábitat de vida silvestre (humedales, bosques, etc.)	Más es mejor	1
Eficiencia en los recursos no renovables	Consumo de recursos no renovables en la producción y el uso de vehículos	Menos es mejor	2

---

Disponibilidad de datos: 1: limitados, puede requerir recolección de datos especiales; 2: a menudo disponibles pero no estandarizados; 3: normalmente disponibles en forma estandarizada.

---

Fuente: Litman, (2006).

De lo anterior se propone establecer como modelo analítico de referencia para identificar las externalidades e indicadores para esta evaluación al transporte de la ciudad, el siguiente:

Tabla 4. Marco analítico de evaluación

<b>Modelo VTPI</b>	<b>Factores propuestos para la evaluación multicriterio</b>	<b>Estrategias</b>
Social: Equidad social Seguridad y salud Cohesión de la comunidad Asequibilidad Preservación de la cultura	Social: Accesibilidad Accidentes	Mejorar la accesibilidad al transporte no motorizado
Económico: Movilidad eficiente Desarrollo económico local Eficiencia operativa	Económico: Congestión Movilidad	Reducir los niveles de congestión Mejorar los servicios de tránsito
Ambiental: Reducción de la contaminación del aire, del ruido Conservación de los recursos Preservación del espacio abierto	Ambiental Calidad del aire Demanda energética	Reducir los niveles de uso del vehículo privado Reducir el consumo energético Mejorar la calidad del aire

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 4, se retoman solo algunos de los factores propuestos por el Victoria Transport Policy Institute, ya que se consideran los impactos más importantes de interpretar con la información disponible, seguramente se podrán incluir más elementos indicadores de medición, conforme se disponga de mayor y mejor información, como lo pueden ser, la contaminación acústica, la movilidad del transporte de carga, viajes pedestres o en bicicleta por persona al año, el uso de autos eléctrico, híbridos, el uso del biodiesel, etc.

## 2.6.2 Estado del arte

El transporte como factor de sustentabilidad ha sido abordado con gran interés recientemente, sobre todo a nivel internacional, con el fin, de conocer con más detalle las particularidades que conllevan para el desarrollo de las sociedades.

En la tabla 5, se presentan diversos estudios que han centrado su interés en la necesidad de evaluar las externalidades del transporte e integrarlas en el paradigma de la sustentabilidad; Verhoef (2000), manifiesta que los costos externos, como el ruido del tráfico y la contaminación atmosférica proporcionan una grave subestimación de los costos externos brutos, es decir, no se toman en cuenta en la mayoría de los casos para la toma de decisiones.

Establece que la reducción de los costos externos se puede ver por tres vías: una reducción en el nivel de actividad, ó, el aumento en los gastos de reducción y medidas de defensa. Las cifras citadas por Quinet en su importante papel de encuestas sobre los costos externos del transporte asignan el valor de 0,1% del producto interno bruto (PIB) para el ruido y para la contaminación del aire 0,4 % para los países de la OCDE.

Estos valores sugieren que se pueden multiplicar por 8 para el ruido y por 2 o 3 para la contaminación del aire en un mercado hipotético.

A su vez las técnicas de evaluación empleadas a menudo pueden producir estimaciones sesgadas. La valoración o estimaciones de los costos ecológicos y sociales sumados hasta donde se sabe, no se han realizado hasta la fecha. La determinación de accidentes como externalidades encuentra dificultades metodológicas.

Para Parry, Walls y Harrington (2007), el gravar al transporte de una manera más severa podría mitigar las externalidades negativas que genera y ayudar a la sostenibilidad, pocos productos de consumo como el transporte requieren una infraestructura pública gigantesca con el fin de ser útiles; cuesta más de \$ 100 mil millones al año mantener y crear carreteras y puentes (EE.UU. Departamento de Transporte, Oficina de Estadísticas de Transporte).

Los Estados Unidos de América consumen 21 millones de barriles de petróleo al día, de los cuales casi el 60 por ciento se importa (por encima del 27 por ciento en 1985); la gasolina es la más importante fuente de consumo de petróleo, representa el 45 por ciento de productos derivados del petróleo (EE.UU. Departamento de Energy, Information Administration, 2006).

Aunque la tarifa de congestión que, consiste en cargar a los conductores la diferencia entre los costos marginales de todos los conductores y un costo medio de una persona en un punto en el tiempo, en gran medida ha sido ignorado por políticas de transporte, la confluencia de varios factores hace que en la actualidad sea especialmente favorable para poder establecerla.

Uno de estos factores es la creciente dificultad de construcción de nuevas carreteras, debido al aumento de valor de propiedad urbana y la oposición de grupos vecinales y grupos ambientales.

La mayor parte en propuestas de esquemas de precios o impuestos sobre congestión depende de la hora del día (en lugar de en tiempo real las condiciones del tráfico), y se limitan a las principales autopistas urbanas, o cordones de peajes, con un enfoque fragmentario, limita la eficiencia en las ganancias en parte, a la peor congestión resultante en otras partes de la red.

Por otro lado organismos internacionales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), los sistemas de transporte utilizados en los países integrantes de

esta organización y algunos otros países son insostenibles. Mejoras sustanciales en la tecnología han sido implementados, pero su impacto ha sido más que compensado por el crecimiento en los distintos patrones de movilidad y movimiento de mercancías.

El logro de un transporte sostenible probablemente implicará mejoras en vehículos, combustibles, e infraestructura, por un lado, y la reducción de la movilidad personal y en el movimiento de mercancías, por otro.

El pensamiento actual se centra en las medidas relativas a la utilización de vehículos, en contraposición a la propiedad, diseñado para asegurar el progreso. El análisis se orienta hacia el ciclo de vida, la contabilidad del costo total, y el total de los costos. Los precios son componentes deseables de las estrategias para lograr un desarrollo sostenible en el transporte.

Otros componentes clave de las estrategias para avanzar hacia el transporte sostenible son las medidas destinadas a aumentar la densidad urbana y suburbana de uso de suelo y el establecimiento y aplicación de los objetivos.

En la mayoría de los países, las tendencias actuales apuntan lejos de la sostenibilidad, nuestro sistema de transporte actual no está en una senda sostenible. Los logros en términos de movilidad han llegado con algún daño ambiental considerable, así como sociales y económicos. El reto es encontrar formas de satisfacer las necesidades de transporte que sean ecológicamente racionales, socialmente equitativas y económicamente viables. La accesibilidad, no la movilidad, sería la cuestión fundamental.

Govinda (2009) destaca que el aspecto regulatorio es trascendental en relación a las normas de economía de combustible para reducir la demanda de combustible del sector transporte, a través de mejoras de eficiencia del combustible del vehículo. Varios países tienen

introducidas normas de economía de combustible, que ayudan a reducir algunos tipos de emisiones, como el CO<sub>2</sub>.

Encuentra que las normas de economía de combustible en todos los países europeos y en los Estados Unidos varían considerablemente. La mayoría de los países en desarrollo se encuentran reacios a introducir estrictas normas de regulación debido a sus recursos limitados para hacer cumplir las normas estrictas

Para el caso de México, Casado (2008), encuentra que la movilidad cotidiana de la población es uno de los ámbitos todavía escasamente abordados. Causa fundamental de este abandono relativo es la escasez y dificultad de generación (costo) de información sobre este tema, inclusive plantea por ejemplo, que son nulas las investigaciones que abordan de manera exclusiva los desplazamientos residencia-lugar de estudio, considerados a nivel estadístico los segundos más relevantes después de los desplazamientos residencia-trabajo.

Otros estudios destacan las bondades de implementar políticas que ayuden a la reducción de la congestión y la contaminación del aire, así como también, políticas que mejoren la seguridad vial, pueden producir ahorros económicos equivalentes a varios puntos porcentuales del Producto Interno Bruto (PIB).

Por ejemplo, para Timilsina y Dulal(basados en un estudio de fondo de CO y de las emisiones de HC- Guenther et al. (1994)- más de 200.000 vehículos en EE.UU., Canadá, México, Reino Unido, y Suecia, ese encontró que menos del 10 % de la flota, que se les conoce como "grandes contaminadores", son responsables de la mitad de las emisiones totales.

Del mismo modo, en torno al 10-12 % del parque de vehículos existente representaron aproximadamente el 50 ciento de las emisiones de CO del sector transporte en Nepal desde 2001-2002 (Faiz et al., 2006).

Por lo tanto, el problema de un pequeño porcentaje de vehículos mal mantenidos ha diluido los logros alcanzados a través de mayores costos de combustible, las emisiones y las normas de economía de combustible (Linares, 2008).

Para estos autores no es un problema de países desarrollados o en desarrollo, sino que es un problema mundial que requiere formas innovadoras para disuadir a los contaminadores "brutos".

La selección de un instrumento no garantiza su eficacia. El éxito del instrumento seleccionado depende de factores tales como: (i) los costos generales de control de emisiones; (ii) la amplitud de la ley / reglamento con respecto al nivel de desarrollo de la sociedad, (iii) la capacidad de la industria en cuestión a tener el control, y (iv) las medidas punitivas en el lugar y las posibilidades de detección de las violaciones (Priyadarshini y Gupta, 2003).

Las normas reguladoras varían considerablemente de un país a otro, dependiendo del nivel de motorización, la dependencia de los vehículos privados y conciencia ambiental. Las normas de economía de combustible en todos los países europeos y los Estados Unidos varían considerablemente. La mayoría de los países en desarrollo se encuentran reacios a introducir estrictas normas de regulación debido a sus recursos limitados para hacer cumplir las normas estrictas (Cohen y Kamienicki, 1991; Priyadarshini y Gupta, 2003; Delfin, 2004).

Una de las principales dificultades asociadas con los programas de control de emisiones, es que impone costos sociales y económicos significativos (Gwalliam, 2004) y los beneficiarios reales son difíciles de identificar (Faizetal, 1999).

En Estados Unidos, las normas de economía del combustible se introdujeron por primera vez en la década de 1970 en un esfuerzo para disminuir los efectos de la primera crisis del petróleo. En la actualidad, la política también sirve para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Pero los resultados en el ahorro de combustible no han mejorado.

La aplicación de las normas de economía de combustible de la Unión Europea resulto en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de vehículos de 186 g / Km en 1995 a 140 g / Km en 2008. Es decir políticas más severas en cuanto al nivel impositivo y de regulación pueden tener efectos positivos al medio ambiente.

En suma, a través de esta revisión, se permite avanzar en la sistematización y articulación del fenómeno abordado, delimitando el estado en el que se encuentra el desarrollo teórico del transporte sustentable, para servir luego, como base conceptual posibilitando el desarrollo de la evaluación propuesta.

Tabla 5. Estado del arte

<b>Tema</b>	<i>Efectos externos y los costos sociales del transporte</i>	<i>Las externalidades de automóviles y Políticas</i>
<b>Autor (es)</b>	Erick Verhoef	Ian Parry, Walls Margaret y Winston Harrington
<b>Objetivo</b>	Evaluar empíricamente las externalidades ambientales existentes sobre el transporte	Analizar la naturaleza y magnitud de las externalidades asociadas con el uso del automóvil, incluida la contaminación local y global, la dependencia del petróleo, la congestión de tráfico y los accidentes de tráfico.
<b>Tema</b>	<i>Informe de Transporte sustentable</i>	<i>Hacia un desarrollo sostenible</i>
<b>Autor (es)</b>	Partnership on Sustainable Low Carbon Transport (SLOCAT)	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD)
<b>Objetivo</b>	Destacar que el sector transporte juega un papel importante en la transición hacia una economía verde y al desarrollo sostenible.	Documentar las preocupaciones que los gobiernos encuentran en el transporte, lo que plantea graves desafíos para el desarrollo sostenible.
<b>Tema</b>	<i>Los instrumentos reguladores para controlar las externalidades en el medio ambiente del sector del transporte.</i>	<i>Estudios sobre movilidad cotidiana en México</i>
<b>Autor (es)</b>	Govinda R. Timilsina , Hari B. Dulal	Casado José
<b>Objetivo</b>	Revisar los instrumentos normativos diseñados para reducir las externalidades ambientales del sector transporte tanto en países en desarrollo como en los países industrializados, analizando los factores que afectan la selección de estos instrumentos, tales como las prioridades ambientales de los países y sus capacidades institucionales.	Analizar en México la movilidad cotidiana de la población al constituir uno de los ámbitos todavía escasamente abordados. Causa fundamental de este abandono relativo es la escasez y dificultad de generación (costo) de información sobre este tema.

Fuente: Elaboración propia

### **2.6.3 Casos de evaluación en el transporte sustentable**

La evaluación del transporte se hace un tema complejo ya que en algunos casos la información es escasa, incompleta o nula, una de las tendencias para evaluar al transporte es a través de una metodología multicriterio. Esta metodología posee ciertas ventajas al ser comparada con las herramientas de decisión unidimensionales en la medida en que hace posible considerar un número amplio de datos, relaciones, criterios y propósitos, los cuales se presentan dentro de un problema de decisión dado, que se estudia según un modelo multidimensional (Funtowicz et al., 1998 citados por Uribe, 2001).

La determinación de estrategias a partir de la información disponible, y de los costos para generarla, han permitido recurrir a evaluaciones no tradicionales para poder establecer las prioridades que cada estudio amerita.

Para NovačkoHozjan (2008), la mejora en la demanda del transporte a través del transporte intermodal, es la alternativa pertinente. Se centra en la elección de una estrategia para la gestión óptima de demanda de transporte, usando el análisis multicriterio en la ciudad de Zagreb.

El hecho de que la Unión Europea esté implicada en la solución de los problemas de tráfico básicamente, por medio de diversas directrices y proyectos de investigación científica, señala la gravedad del problema.

La solución para los problemas de tráfico últimamente se ha buscado en la gestión de la demanda de transporte (TDM).

Individualmente, el transporte intermodal o de tránsito ha demostrado ser la mejor solución para la gestión de la demanda de transporte en la ciudad de Zagreb.

En el caso de los condados de Taiwán, Shiau (2013), el propósito de este estudio fue evaluar las estrategias de transporte sostenible para los 23 condados de Taiwán.

Las tres estrategias mejor clasificadas fueron: promover el uso de las motocicletas eléctricas, la mejora de los servicios DRTS, y la mejora de la accesibilidad de los modos no motorizados. Los resultados analíticos de este estudio justifica la aplicación del principio: medidas adaptadas a las circunstancias locales. Señala que las mejores estrategias son intensificar el transporte en motocicletas eléctricas, la mejora en los servicios de demanda de transporte, así como la accesibilidad en los modos no motorizados (bicicletas, pedestre), donde enfatiza el adaptar medidas o alternativas generales a las condiciones que prevalezcan localmente.

Shiau (2012) realiza la misma evaluación pero para la ciudad de Taipéi donde se examinan ciertas estrategias: ordenamiento territorial, modos de desplazamiento, y el uso de energías limpias, construyéndose un índice compuesto de sostenibilidad que incluya los aspectos de sociedad, la economía, el medio ambiente.

Las cinco estrategias favorecidas por la muestra de los tomadores de decisiones son: la mejora de la accesibilidad de los modos no motorizados, promoviendo el uso de biodiesel, la mejora de los servicios DRTS, promoviendo el uso de biogasolina, y la mejora de la accesibilidad del transporte para las personas mayores y discapacitadas. estableciendo que las mejores estrategias a instrumentar mejora de la accesibilidad de los modos no motorizados,

promoviendo el uso de biodiesel, la mejora de los servicios de demanda del transporte, promoviendo el uso de biogasolina, y la mejora de la accesibilidad del transporte para las personas mayores y discapacitadas.

Para López Lamba (2010) por ejemplo el principal problema de los proyectos europeos es la falta de seguimiento una vez terminados. Los indicadores científicos se ven mayormente afectados de forma negativa por la ausencia de publicaciones importantes, lo cual junto a la falta de eventos de publicación y grupos de trabajo, desemboca en una falta de conocimiento de los resultados por parte de la comunidad científica.

En este sentido describe los métodos de utilización del análisis costo beneficio (CBA), el Regime análisis (método discreto cualitativo de análisis multicriterio basado en dos tipos de datos de entrada: una matriz de evaluación y un conjunto de pesos). FlagModel, el cual se basa en la comparación de las puntuaciones con unos valores de referencia. Una vez calculadas las puntuaciones se asigna un color según la escala.

De acuerdo a Bocarejo (2009) en su estudio de la movilidad bogotana en el largo plazo y las políticas que garanticen su sostenibilidad, señala que la integración de las políticas de movilidad con las de usos del suelo es urgente. Sólo de esta manera se logrará contener la expansión de la ciudad, el crecimiento de los tiempos de viaje, el mayor uso del vehículo y sus consecuencias en mayor congestión y contaminación.

El fuerte aumento de la motorización y la movilidad individual implicará un aumento significativo de los recursos destinados al sector, así como estrategias de gestión de la demanda.

Existe una relación entre el PIB per cápita y la tasa de motorización, a partir de la evolución de la distribución de ingresos país.

Por otra parte Racero (2008), realiza un estudio sobre la diagnosis energética y medioambiental debida al transporte, donde determina la intensidad de tráfico y velocidad media de circulación. Estimación del consumo y emisiones por tramo o calle y categoría de vehículo. Métodos Bottom-up o microescala, Métodos Top-Down o macroescala,

Los modelos de estimación del consumo de combustible, mediante la metodología de inventario de emisiones contaminantes se contribuye en la descripción de que pasos se deben seguir en la realización de inventarios de emisiones en grandes áreas de España, el diseño de una herramienta integrada que puede ser empleada por las autoridades locales como soporte y ayuda a la evaluación de alternativas.

El Instituto de Políticas para el transporte y el desarrollo (2012), en su estudio: Transformando la movilidad urbana en México: Hacia ciudades accesibles con menor uso del automóvil, refiere que las políticas de transporte pueden tener un impacto significativo en el desarrollo económico del país y por ende en la calidad de vida de los mexicanos.

El transporte es crítico para las actividades económicas (transporte de bienes y mercancías, transporte al trabajo, transporte de turistas, compras, entre otros), por lo que sistemas de transporte eficientes impulsan el desarrollo económico y social de México. Si son eficientes, reducen las externalidades o costos negativos generados a la sociedad por el automóvil, como: pérdidas económicas por congestión, costos de salud, accidentes y daños ambientales, entre otros.

Se estima que en 2050 México podría estar entre las economías más grandes del mundo (Goldstone, 2011 y Hawksworth & Gordon, 2008). Para que esto suceda la movilidad de las ciudades es un punto clave.

El transporte urbano se vuelve crítico para las actividades económicas y para la calidad de vida de millones de personas. El enfoque de privilegiar al automóvil particular como centro de la movilidad urbana está generando grandes costos sociales, económicos y ambientales que pueden impedir que México se convierta en una gran economía.

#### **2.6.4 Evaluación Multicriterio**

Los tomadores de decisiones deben tener en cuenta los diferentes impactos (económicos, sociales y ambientales) resultantes de proyectos de transporte. Las políticas en el transporte urbano deben entregar beneficios en todas estas dimensiones; mientras que, en tiempos de presupuestos limitados, la viabilidad económica de proyectos es a menudo un factor decisivo. Los tomadores de decisiones necesitan información sobre los posibles costos, beneficios e impactos globales de las medidas o proyectos a implementar en el transporte (Hüging et al, 2014).

Para Beria (2011) en la actualidad, no existe un método estandarizado para la evaluación de todos los costos, beneficios e impactos globales en la evaluación del transporte, lo que podría afectar la fiabilidad de las evaluaciones existentes, la comparabilidad de los resultados y la transferibilidad de las medidas.

Los proyectos de evaluación a gran escala a menudo son evaluados utilizando el método CBA, que es el mandato de algunas regulaciones nacionales de financiación. Sin embargo, no existe tal regulación para los proyectos de evaluación más pequeños, pero potencialmente muy rentables. Esto deja a estas medidas con una desventaja competitiva en el proceso de toma de decisiones en comparación con los proyectos a gran escala. Además, las metodologías de CBA son tan buenas como los datos disponibles y los factores evaluados.

Como metodología, la evaluación costo-beneficio muy intensiva en recursos, con lo cual no siempre es adecuada para medidas innovadoras a pequeña escala, donde la evaluación multicriterio (en el que los datos cualitativos y cuantitativos son igualmente importantes) a veces se aplica en su lugar ((Hüging et al, 2014)..

La falta de un enfoque más estandarizado y holístico para la evaluación de los costos, beneficios e impactos globales en el transporte pueden afectar a la adopción de medidas pequeñas e innovadoras, con considerables efectos de sostenibilidad.

La evaluación multicriterio (MCDA) por sus siglas en inglés, es una herramienta para llegar a un objetivo específico a través de la selección de proyectos alternativos, que, permite tener en cuenta varios criterios y opiniones de las partes interesadas. Los proyectos alternativos siempre tienen una significancia social importante, económica, y de impacto ambiental (Walker, 2000).

Dentro de la MCDA, los objetivos a alcanzar deben ser especificados y los correspondientes atributos o indicadores deben ser identificados. La medida real de los indicadores no necesita ser explícitamente en términos monetarios, pero a menudo se basan en la puntuación, clasificación y ponderación de una amplia gama de efectos cualitativos, de categorías y criterios (Brucker, 2011).

La adopción de técnicas de ayuda pueden ser utilizadas para integrar información cualitativa e información cuantitativa en una sola evaluación. Tales técnicas incluyen (i) un conjunto dado de alternativas proporcionadas para la toma de decisiones, (ii) un conjunto de criterios para la comparación de las alternativas; (iii) la asignación de pesos y criterios, cuando sea posible, y (iv) un método para la clasificación de las alternativas sobre la base de qué tan bien se cumplen los criterios (Annandale y Lantzke, 2001; Buselich, 2002).

Hay varios métodos que podrían aplicarse para el transporte de la evaluación, los más adecuados son: (i) Proceso analítico jerárquico (AHP), (ii) Proceso analítico de redes (ANP), (iii) régimen, (iv) Familia ELECTRE, (v) Multi enfoque utilitario de atributos (Chauhan, 2011).

El AHP y ANP son dos de los más utilizados, El AHP, desarrollado por Saaty (1977), es un método de tres etapas: (i) la construcción de la jerarquía; (ii) la ponderación de los indicadores a través de una comparación por pares, y (iii) el cálculo del valor final para las alternativas. El AHP, de hecho, consiste en descomponer un proceso de toma de decisiones en una compleja estructura jerárquica. El objetivo que debe ser alcanzado está en la parte superior de la jerarquía; los criterios primarios se establecen en el segundo nivel, y son seguidos por los subcriterios en el tercer nivel (Tudela, 2006).

Una vez que los criterios y subcriterios se han resuelto, se requiere un conjunto de pesos para continuar con el análisis. Estos pesos representan la importancia relativa de los criterios, subcriterios y atributos que pertenece a un específico nido en la jerarquía. De acuerdo con el procedimiento original desarrollado por Saaty, estos pesos son obtenidos a partir de matrices de comparación por pares, para cada nido en la jerarquía. Una vez que los pesos están disponibles, la estructura jerárquica se colapsa, tras un procedimiento de repliegue. Para cada opción en estudio, será un peso final. Estos pesos finales se utilizan para clasificar las opciones (Diappi et al., 2010).

Otro procedimiento que está ampliamente adoptado es el Proceso Analítico de Redes (ANP). La ANP proporciona un marco general útil para hacer frente a las decisiones sin hacer suposiciones sobre la independencia del nivel superior a partir de elementos de nivel inferior y sobre la independencia de los elementos dentro de un nivel. De hecho, el ANP utiliza una red sin la necesidad de especificar los niveles como en una jerarquía. La influencia es un concepto central en la ANP. La ANP es una herramienta útil para la predicción ya que representa una

variedad de competidores con sus interacciones y sus fortalezas relativas a ejercer influencia en la toma de una decisión (Dempster, 1968).

El método RÉGIMEN utiliza la comparación por pares (Hinloopen y Nijkamp, 1986 y Nijkamp y Blaas, 1993) sobre la base de los cuales se calcula un índice sintético. El índice define una clasificación entre las opciones alternativas: el más índice más alto es, la opción más preferible. En este caso, el índice sintético expresa el nivel de desempeño de los diferentes indicadores seleccionados, con respecto al criterio se refiere a cada uno las experiencias analizadas, y los hechos son explicados en la 'matriz de información'.

En el análisis de Régimen el foco principal es el signo de las diferencias entre los impactos de las alternativas. En términos generales, se da y se compone de una tabla de evaluación de las puntuaciones de un número "n" de opciones alternativas con respecto a los criterios de 'M'. En el caso de la información ordinal el peso se puede representar por medio de órdenes de rangos en un vector de peso: a mayor el valor del peso, mejor el criterio correspondiente. Las alternativas serán en comparación por pares de todos los criterios y por dos opciones de elección de alternativas, (Beria, Maltese, Mariotti, 2011).

Retomando este capítulo, se plantea la importancia de la valoración del medio ambiente a través de las externalidades que genera y la dificultad que se encuentra para generar la suficiente información para la mejor toma de decisiones, implicando la integración de diversas herramientas que permitan el establecimiento de principios e indicadores que incorporen la sustentabilidad.

## **CAPÍTULO 3. Estado actual de la movilidad de la ciudad de Mexicali**

### **3.1 Contexto**

El municipio de Mexicali está ubicado en la región del Valle de Mexicali en el extremo noreste del estado de Baja California, y colinda al norte y noreste con los Estados Unidos, al norte con el Condado de Imperial del estado de California y al noreste con el Condado de Yuma del estado de Arizona. De acuerdo a los resultados del Censo de Población y Vivienda realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010), la población total del municipio de Mexicali es de 936,826 habitantes.

El clima de Mexicali, por su escasa precipitación anual presenta un clima desértico cálido, de acuerdo con los criterios de la clasificación climática de Köppen. La temperatura raramente es inferior a 3 °C (37 °F) o superior a 45 °C (113 °F). La temperatura mínima extrema desde que se tiene registros es de -8 °C (15 de diciembre de 1972), la máxima es de 52 °C (28 de julio de 1995). El verano es extremadamente caluroso, las temperaturas diurnas superan los 35 grados prácticamente todos los días de la estación, y pueden alcanzar valores térmicos de hasta 46 °C e índice de calor superior a 60 °C cada año. Las noches son cálidas y en ocasiones calurosas llegando a superar los 30 °C. El invierno es suave y fresco, muy rara vez se presentan heladas (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Mexicali 2015-2050).

Los sistemas frontales generan la mayor parte de la escasa lluvia que cae en la ciudad, y salvo por una ocasión (13 de diciembre de 1932), nunca nieva. Las temperaturas nocturnas no suelen bajar de 3 °C, a la vez que las diurnas no suelen superar los 25 °C.

Según el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali 2025, la ciudad de Mexicali presenta las siguientes características en cuanto a sus comunicaciones

terrestres: se comunica por la Carretera Federal número 2 al Este con el vecino estado de Sonora y con el centro del país, al Oeste con las también ciudades fronterizas de Tecate y Tijuana. La comunicación con el Valle de Mexicali se realiza a través de una red de caminos estatales. De esto resulta una mezcla de los flujos vehiculares regionales que presionan la movilidad urbana local.

La traza vial de la ciudad de Mexicali, se define como una gran retícula plana y regular, seccionada por algunas limitantes físicas como son el Río Nuevo o la vía del ferrocarril, así como por la discontinuidad de la traza urbana desarrollada en diferentes etapas de crecimiento.

Las vialidades regionales de mayor importancia son la Carretera Federal N° 2 en sus tramos Mexicali-San Luis Río Colorado, Sonora, y Mexicali-Tijuana. El tramo carretero Mexicali-San Luis R. C. con una longitud de 67 Km. representa la única vía de comunicación carretera del estado con el resto del país y en la que más se realizan trabajos de ampliación y modernización.

El tramo carretero Mexicali-Tijuana, es la principal vía de comunicación para el resto del estado, y comunica además a la Ciudad de Mexicali con las colonias Zaragoza, Progreso, Santa Isabel, Heriberto Jara y la Rosita.

La carretera Mexicali-San Felipe, de jurisdicción federal, es la única vía de comunicación terrestre de penetración al Mar de Cortes para atender el flujo de turistas procedentes de California y de la porción Noroeste de la entidad.

A partir del 12 de septiembre de 1997, el Sistema Municipal del Transporte de Mexicali, es la dependencia encargada de llevar a cabo la planeación, programación, reglamentación,

supervisión y operación del transporte público de pasajeros y de carga en el municipio de Mexicali (Periódico oficial del estado de Baja California, 1997).

Desde el 2004 se cuenta con un Plan Maestro de Vialidad y Transporte para el municipio se observan modificaciones relevantes en las tendencias del proceso de urbanización con un crecimiento cercano a las 3,000 hectáreas de las cuales un alto porcentaje no está previsto en ese plan (Mexicali Gran Visión, 2014).

El sistema de transporte tiene su centro y origen en el Centro Histórico de Mexicali, convirtiéndose en el punto de intercomunicación y trasbordo. En este sector urbano se ubican y concentran las terminales de autobuses y taxis las cuales invaden las vías públicas. (Ustran, 2007)

Por el seccionamiento de rutas, más del 25% de los usuarios del transporte tienen que realizar desplazamientos innecesarios, ya que para llegar a su destino utilizan de 2 a 3 rutas, siendo el centro urbano el punto en donde se generan más de 22,000 transbordos diarios (Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali, 2025).

### **3.2 Estructura urbana**

De acuerdo al Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali, B.C. (2010), considerando criterios de homogeneidad, el uso de suelo predominante, densidades, tipo de construcción, niveles de urbanización y aspectos socioeconómicos, así como la estructura vial primaria y las barreras físicas naturales o de elementos urbanos, en el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali, B.C. 1993-2007, se dividió a la ciudad en nueve Sectores (los cuales se mantienen), que a su vez albergaban cantidades variables de Distritos, con

el fin de facilitar la organización de la ciudad y distribución de servicios y equipamiento, así como la identificación de las densidades de población de cada zona, para lograr un crecimiento más ordenado y equilibrado.

El Sector “A” por citar un ejemplo, comprende del Río Nuevo al Oeste, hasta el límite del área urbana, el uso dominante es habitacional tipo popular, con excepción de los fraccionamientos Villafontana (Residencial), San Marcos y Jardines del Lago (tipo medio).

En los últimos cuatro años este sector ha experimentado crecimiento en cuanto al uso habitacional popular, en la zona del Ejido Orizaba, donde el FIDUM ha desarrollado algunos fraccionamientos de dotación progresiva de servicios como el Fracc. Colosio, Aztecas y Mayos; también al norte de Huertas de la Progreso (de acuerdo con el anterior PDUCP-M 1993-2007 esta zona se encontraba fuera del sector “A”, e incluso de la mancha urbana), en donde se han desarrollado colonias populares como Fracc. Las Palmeras, Hacienda de Orizaba y Palmar de Orizaba; con dicho crecimiento las zonas destinadas como reserva tienen una saturación de aproximadamente el 50%.

Las características que predominan en la mayoría de los sectores van desde asentamientos humanos irregulares; deficiencia en alumbrado público y pavimentación. Debido a la baja ocupación del suelo, el acceso a transporte es ineficiente. Se observan patrones monocéntricos, más que policéntricos de concentración espacial en servicios y actividades, lo que incide directamente en el transporte.

### 3.3 Situación del Transporte Público Colectivo

El modelo de organización actual de los concesionarios que prestan el servicio público de transporte se distribuye en: 44 rutas urbanas con 457 unidades (empresas o unidades operacionales con permisos y concesiones, que realmente operan 444 unidades), la cantidad de rutas de autobuses ha variado con el tiempo; actualmente existen un total de 16 agrupaciones que operan el servicio urbano (12) y suburbano (4) (véase tabla 16).

Estas empresas tienen en su conjunto 61 rutas autorizadas, de las cuales 16 se encuentran suspendidas, es decir no ofrecen el servicio; 1 ruta ofrece servicio de manera eventual y las restantes 45 rutas operan regularmente. En su conjunto atienden una demanda diaria estimada en 146,168 viajes persona día y su red de servicio es de 4,612 km.

Tabla 6. Empresas transporte público

Empresa rutas urbanas	Empresa rutas suburbanas
Soc.Coop. de Autotransportes "Amarillo y Blanco", S.C.L	Autotransportes Mixtos del Valle de Mexicali, S.A. de C.V.
Autotransportes Urbanos de Pasajeros de Microbuses	Transportes Especiales de la Baja California, S.A. de C.V.
Autotransportes urbanos, S.A de C.V.	Transportes Miguel Gutiérrez Bañaga, S.A. de C.V.
Soc. Coop. Transporte "Azul y Blanco", S.C.L.	Transportes Miguel Siga, S.A. de C.V.
Transportes Urbanos y Suburbanos "Cachanilla" S.A.de C.V.	
Soc. Coop. de Transportes Estrella del Norte, S.C.L.	
Soc. Coop. Transportes "Fausto Vásquez", S.C.L.	

Autotransportes Fernando Amilpa, S.A. de C.V.	
Soc. Coop de Autotransportes "Malpica del Norte", S.C.L.	
Autotransportes Misioneros de la Baja, S.A. de C.V.	
Transportes Modernos de Mexicali, S.A de C.V	

Fuente: Sistema Municipal del Transporte (2013)

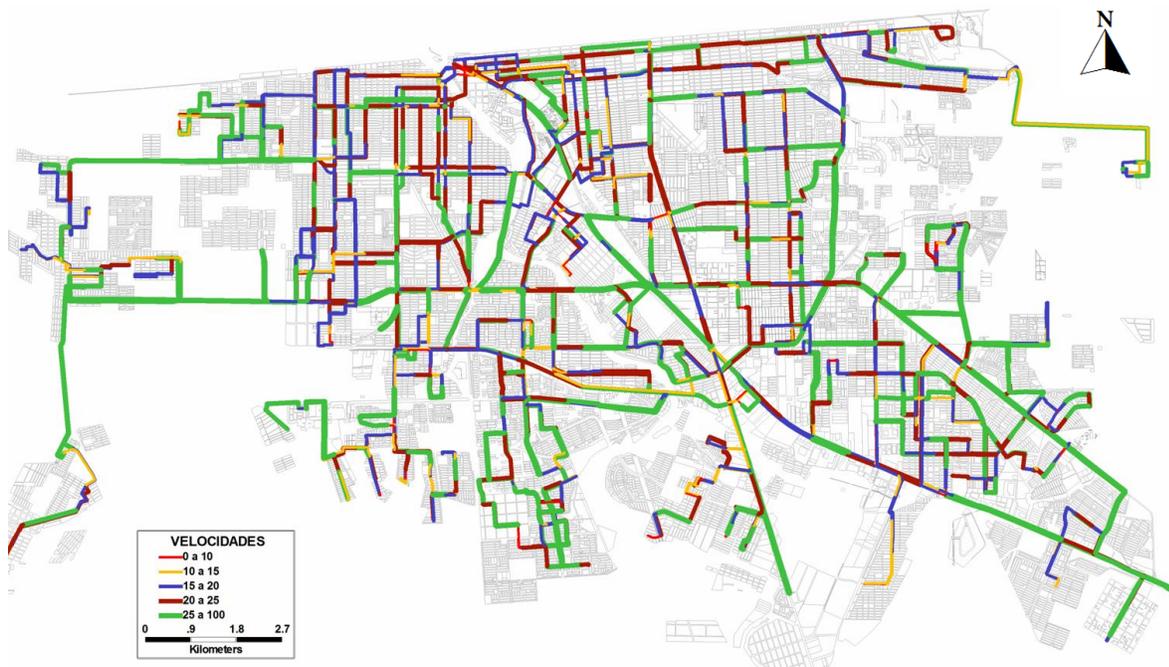
Se opera primordialmente en siete corredores, haciendo que se presente un elevado nivel de empalme de rutas en un mismo tramo de la red en el 76% del total, situación que se traduce en una extremada competencia por una misma demanda en los corredores. Estos corredores son: Blvd. Adolfo López Mateos, Blvd. Lázaro Cárdenas, Blvd. Justo Sierra – Benito Juárez, Av. Reforma, Calzada Héctor Terán Terán, Calzada Manuel Gómez Morín y Calzada Anáhuac.

Dos de las rutas de transporte público presentan recorridos con duración de 60 minutos o menos mientras que otras dos de las rutas presentan viajes con duración mayor a los 100 minutos. Asimismo, se tiene que dos de las rutas presentan un tiempo de recorrido en un sentido igual o menor a los 35 minutos.

Por otra parte es importante considerar el tiempo de viaje que el usuario invierte en transportarse de su origen a su destino en el 53% de las rutas es de 26 minutos, tiempo que se ha incrementado en 3 minutos en los últimos tres años si se compara con los 23 minutos registrados en 2003.

En la figura 4 se puede observar que el rango de las velocidades de operación fluctúa entre los 15.08 y 30.29 km/hr. a su vez, 36 de las rutas muestran velocidades de operación entre

15 y 20 km/h y 8 de las rutas se ubican en el rango de los 20 a los 25 km/h, rango razonable para una operación con autobuses. La ruta TC08 (Ejido. Puebla - Lázaro Cárdenas - Los Virreyes) presenta una velocidad de operación por arriba de los 30 km/h, el cual resulta un valor excelente. La velocidad de operación promedio del sistema es de 19.86 km/hr (velocidad mínima aceptable).



Fuente: SIMUTRA (2015)

Figura 4. Velocidades en la red de transporte de Mexicali

### **3.3.1 Equipamiento**

El equipamiento instalado en la red vial de la Ciudad de Mexicali es compartido por las 16 empresas, mismo que ha sido colocado por la autoridad o bien, bajo los esquemas de concesionamiento de los espacios para publicidad a cambio de la instalación de cobertizos.

Al sumar las paradas individualmente por ruta integra un total de 3,748 paradas, muchas de estas paradas son compartidas por dos o más rutas, lo cual da un total de 1,610 paradas efectivas.

De estas paradas, solo el 11% cuenta con cobertizos los cuales permiten identificar el punto de ascenso y descenso. En el 89% restante no cuenta con ningún tipo de infraestructura, resultando insuficiente para una red de transporte público con estas características ya que este valor debiera situarse al menos entre un 15 y un 30% del total de las paradas. Para una ciudad como la de Mexicali donde el clima extremoso con temperaturas por arriba de los 40°, resultaría pertinente la ubicación de dicho equipamiento.

### **3.3.2 Cierres de circuito**

En la red de transporte público de la Ciudad de Mexicali, (véase figura 5) se identifican 62 cierres de circuito que operan en el sistema de transporte, generalmente los que se localizan en la periferia operan de manera individual y los que se ubican en la zona centro de la ciudad convergen a nivel empresa en un cierre de circuito común.

Si bien el 36% de los cierres de circuito cuentan con superficies de rodamiento pavimentadas que se encuentran en buen estado, el 8% de los cierres presentan pavimento regular y 5% se encuentra en mal estado (Sistema Municipal del Transporte, 2015).

Se tiene que de los 435.4Km de red vial por donde circulan las rutas de transporte, en promedio el 65% de las trayectorias se hacen sobre pavimento en buen estado; el 16% acusa un estado regular y el 4% restante sobre pavimentos en malas condiciones.

Esto puede establecer la prioridad a la pavimentación de 47.10 Km de empedrados y terracerías así como a las acciones de mantenimiento vial sobre las vialidades donde opera el transporte público, y que incluyen los 22.69 Km de la actual red vial que tienen pavimento en mal estado y los 48.09 Km de pavimento en condiciones regular y que en el corto plazo requerirán de mantenimiento.

Los beneficios que conllevarían estas acciones serian por igual al ciudadano de zonas marginadas como al transportista, al reducir sus costos de mantenimiento e incrementan las velocidades, reduciéndose los tiempos de recorrido. Más aún, traen beneficios de índole ambiental al eliminar las polvaredas.



Fuente: SIMUTRA (2015)

Figura 5. Ubicación de cierres de circuito en la red de transporte público.

### 3.3.3 Equipo

La apariencia del vehículo, el efecto en el medio ambiente y la comodidad que se brinde al pasajero son algunos atributos que promueven la aceptación y utilización del transporte público por todos los sectores de la población. Desde el 2004 se ha iniciado un proceso de modernización de las unidades de transporte público, para sustituir su parque vehicular acorde con las necesidades de sus usuarios (unidades nuevas con refrigeración) siendo una de las primeras en las ciudades fronterizas, en este proceso.

11 unidades son tipo microbuses adaptados (2%) con capacidad de hasta 20 pasajeros. Las restantes se componen por 179 autobuses con refrigeración de fabricación nacional y los restantes 329 por autobuses tipo escolar grande (trompudos) que sólo se usan para el transporte de personal de la industria maquiladora en una contraprestación entre privados, de diversas marcas y cuentan con una capacidad promedio de 50 lugares.

En el caso de los autobuses escolares por lo general la distribución de los asientos ha sido modificada para colocar los asientos en forma de herradura, ofreciendo al usuario un mayor espacio.

Para el caso de los autobuses de reciente adquisición son autobuses diseñados para el servicio urbano normalmente una configuración de asientos 2 + 2 ó 2 + 1 y cuentan con refrigeración pero lo que se observa es que no están adaptados a las necesidades de las personas con capacidades diferentes. La distribución de los autobuses cumple con la normatividad establecida, con un número de 50 plazas, en promedio, distribuidas en 37 asientos y 13 de pie.

La norma internacional señala una elipse de comodidad al estar de pie de 0.25 m<sup>2</sup> por pasajero, lo que sugiere que los vehículos que operan en la ciudad pueden transportar, dentro de cierto grado de comodidad a 23 pasajeros de pie para el caso de autobuses y un máximo de 16 pasajeros de pie en el caso de microbuses.

En este sentido, se consideraría que el 40% de la ruta es deseable contar con unidades de 20 asientos mientras que solo en 57% de las rutas son realmente necesarias las unidades de 37 a 41 asientos y finalmente, en 3% de las rutas podrían operar adecuadamente con unidades de 12 asientos para acomodar la demanda. Esto se contrapone con la composición basada en el Plan

Maestro de un 100% de unidades de 37 ó más asientos y con la que actualmente existente, de 98% con 37 - 41 asientos y 2% con 20 asientos.

En cuanto a la distribución de edades para los autobuses de 37 o más plazas se puede estimar que la edad promedio es de 14 años. La edad promedio ha bajado de 16 a 14 años, dado el esfuerzo de los actores involucrados en este proceso de modernización.

Actualmente el 20% del parque vehicular registrado cumple con las especificaciones de calidad y refrigeración buscadas y representa a su vez el 37% (194 unidades) del parque vehicular en operación. Asimismo, se detecta que el 77% de las unidades registradas superan los 10 años de antigüedad, y solo el 23% cumple con la normatividad de edad máxima permisible de 10 años. Es notorio destacar el impulso que se ha tenido en estos últimos años en la adquisición de unidades de 37 o más plazas, para mantener el uso del autobús como tipo de unidad principal, pese a las bajas ocupaciones que se obtienen.

El efecto de la edad del parque vehicular en los costos por kilómetro de diferentes tipos de unidades. Una edad de 15 años representa incrementos en los costos de operación entre un 30 y un 40% si se le compara con una unidad de 7 años, edad promedio recomendable en la literatura. Para aquéllas unidades con edades superiores a los 18 años, los incrementos en los costos de operación por kilómetro recorrido, se pueden ver incrementados entre un 70 y un 90%, dependiendo del tipo de unidad. Naturalmente, esto repercute en la rentabilidad de las empresas y en consecuencia, en los requerimientos tarifarios, así como los aspectos ambientales.

### 3.3.4 Estructura de la red

La red de transporte de la Ciudad de Mexicali presenta las siguientes características:

- Es una red que trae los movimientos hacia el centro de la Ciudad de Mexicali a través de siete corredores principales, que son: Blvd. Adolfo López Mateos, Av. Lázaro Cárdenas, Reforma y Justo Sierra – Benito Juárez y con terminales de 42 rutas en la zona centro de la Ciudad, además de otros corredores de menor importancia como son, Av. Héctor Terán Terán, Av. Gómez Morín y Blvd. Anáhuac.
- Es una red, que cuenta con puntos de conexión principalmente en el centro de la Ciudad Mexicali, Plaza Cachanilla, Centro Cívico, al cruce con la Av. Lázaro Cárdenas.
- Es una red que al oriente de la Ciudad de Mexicali genera los viajes que se producen en las diferentes zonas del área de estudio y tienen como destino la zona industrial de Mexicali.
- La red cuenta con una amplia cobertura del servicio, aun cuando esta se considera a partir de un radio de 300 metros de cada parada.

Esta red representada gráficamente en la figura 6 muestra que los viajes en transporte público son esencialmente hacia el centro de la ciudad, lo que ocasiona mayores tiempos de traslado y saturación de unidades en el mismo espacio físico.



Fuente: Sistema Municipal del Transporte (2013)

Figura 6. Concentración de rutas

### **3.4 Proyecto de Sistema Rápido de Transporte (BRT)**

Desde el 2010 se instrumentó un proyecto de construcción de carriles de confinamiento para camiones y autobuses para mejorar la infraestructura y agilizar el tráfico en la ciudad, a partir de líneas “expres” que, comunicarían la zona sur con la zona norte de la ciudad, interconectando las principales zonas de atracción y generación de viajes, frontera y sur de la ciudad, lo que lleva implícito el mejorar la infraestructura, reduciendo los tiempos de traslado, usuarios, con

financiamiento de los tres órdenes de gobierno, principalmente del gobierno federal a través del Banco Nacional de Obras y Servicios (BANOBRAS).

El proyecto de transporte urbano forma parte de una estrategia integral, conformada por corredores de transporte con alimentación; rutas auxiliares; rutas integradoras y rutas remanentes, acordes a las acciones marcadas en los estudios y programas específicos en la materia. Se pretende con este proyecto:

- Privilegiar al transporte colectivo, proporcionando infraestructura especializada por medio del confinamiento para la libre circulación de los vehículos, aumentando las velocidades de operación para las rutas exprés y acondicionando el acceso a colonias populares para rutas alimentadoras.

- Configurar el sistema ordinario (rutas residuales no consideradas en el sistema), en función del trazo y cobertura de los corredores que respondan al comportamiento de los patrones de movilidad de los usuarios y que sirva de soporte alimentador del sistema, reestructurando las rutas, con una jerarquización que disminuya los recorridos muertos para los operadores y usuarios además del congestionamiento con el tránsito general.

- Crear la integración, física, operacional y tarifaria, terminales de alimentación, paraderos de integración, en tiempo justo acorde al comportamiento de los usuarios y penalizaciones mínimas para los transbordos, motivando el ahorro de tiempo de transportación para los usuarios.

- Definir un modelo tarifario con precios justos, atendiendo a los sectores más necesitados, instrumentando una política tarifaria con opciones distintas y tarifa preferencial para estudiantes, tercera edad y personas con discapacidad.

- Instrumentar un sistema de prepago integrado, con tarjeta inteligente que administre las distintas opciones y compensaciones mediante una cámara de compensación tarifaria.

- Creación de un órgano gestor para control del sistema tronco-alimentador que regule el transporte construyendo parámetros de gestión, operación y supervisión del servicio con tecnología de punta para coordinar y dirigir un nuevo sistema de transporte.

- Redefinir el modelo actual de explotación del servicio, proponiendo un esquema de rentabilidad y bajos costos de operación de los concesionarios, integrándolos en asociaciones de participación con un modelo de negocio empresarial, con el propósito de disminuir los costos de operación actual en beneficio de los usuarios.

- La negociación con concesionarios incluye la organización y regularización del transporte, para conformar los modelos de participación que tengan el propósito de definir un modelo de negocio de alta rentabilidad

La infraestructura consta de un corredor segregado para transporte público (19.4 Km) con carriles de rebase en el tramo "Palaco" (11 Km), 32 paraderos dobles abiertos, 6 paraderos dobles cerrados (con aire acondicionado), 1 Terminal con áreas de talleres y encierros (parte sur de la ciudad), 34 autobuses inicialmente operando de nueva adquisición (más uno de reserva), Sistema de prepago (tanto para troncal como rutas alimentadoras), 1 Centro de Control Operacional (ubicado en la misma terminal). La inversión estimada es de 831 millones de pesos.

Dentro del proyecto se prevé en la parte de la evaluación ambiental, que los impactos benéficos sobresalientes serían:

- La reducción de emisiones contaminantes como el CO<sub>2</sub> que es un gas de efecto invernadero.
- El aprovechamiento de energías renovables (paneles fotovoltaicos en paraderos).
- Fortalecimiento de la economía local.

Referente a los impactos negativos que se identifican serían:

- La afectación de la calidad del aire, por las emisiones de contaminantes producto de la combustión de maquinaria en la etapa de construcción.
- La generación de residuos municipales, peligrosos y de manejo especial (residuos de obra).

Se observa que este proyecto podría coadyuvar en mejorar la oferta del transporte colectivo, sin embargo ha tenido problemas; en la planeación, gestión y negociación política, impidiendo que se lleve a cabo.

### **3.5 Transporte privado**

De los 23 millones de automóviles particulares en México, el 72% se encuentra en las zonas metropolitanas, donde destacan las del Valle de México, Monterrey y Guadalajara con un 40% del total de automóviles privados (un promedio de 300 autos por cada 1,000 habitantes). En estas zonas, el transporte privado es el medio por el que se realizan el 29%, 42% y 40% de los viajes, respectivamente; siendo éstas ciudades las que presentan serios problemas de movilidad que se

manifiestan en más viajes, mayores distancias, congestión vial, bajas velocidades y pérdidas económicas (ONU, 2012).

Según el Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015, que realizó la Organización de las Naciones Unidas, el automóvil ha sido señalado como la causa número uno de los problemas de movilidad, por ser el principal medio de transporte en las vialidades, ya que para trasladar a 35 personas se requieren 30 autos (considerando que la tasa de ocupación promedio por auto es de 1.2 personas), que utilizan una superficie de rodamiento de 500m<sup>2</sup>; en comparación desventajosa contra los 30m<sup>2</sup> que requiere un autobús urbano para trasladar el mismo número de personas.

La eficiencia de la movilidad estará dada por la calidad de los viajes en transporte público, la accesibilidad universal, la intermodalidad y la sustentabilidad. Las limitaciones en la movilidad afectan en mayor proporción a los grupos de menores ingresos que habitan en asentamientos o desarrollos habitacionales periféricos alejados (Eibenschutz, 2009).

El gasto en transporte es la segunda variable en la que los hogares ocupan sus ingresos, sólo por debajo del rubro de alimentos, bebidas y tabaco, representando en promedio el 18.5% del ingreso neto total monetario. Los hogares con ingresos más bajos gastan más en transporte en términos porcentuales; aunque en monto absoluto, los sectores de mayor ingreso gastan más del doble que el decil de menor ingreso, esto debido al efecto de inversión en la adquisición, uso y mantenimiento del automóvil.

Según el Instituto Nacional de Ecología (2011) en Mexicali se obtuvo que los autos consumen en promedio 42 litros de gasolina por semana, las pick up /estaquitas 63 litros por semana, las van de 56 litros y los vehículos tipo SUV 55 litros de gasolina por semana.

El 84% de los propietarios de un vehículo lo usan 7 días a la semana y 6% solamente durante seis días. El restante 10% lo usan principalmente durante 3 o 4 días a la semana.

El 88% de los vehículos tiene un uso personal y el 12% lo usan para negocios. El 73% de los automóviles y el 67% de los pick-up son vehículos de 4 cilindros, en tanto que la mayoría de las van y SUV son de 6 cilindros (73% y 59% respectivamente).

El 85% de los vehículos son importados, lo que implica vehículos de segunda mano, que no cuentan con los requisitos necesarios para circular en Estados Unidos, pero que son accesibles para el mercado en México, en particular en las ciudades fronterizas.

Cabe destacar que la legislación en materia federal respecto a la regulación hacia el transporte privado es casi nula, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 115 establece la facultad de los municipios de coordinarse y asociarse para la prestación de servicios de calidad, sin embargo, en la fracción III, no menciona al transporte entre las funciones y servicios públicos que tienen a su cargo, sino que son las legislaciones estatales quienes lo regulan y por lo tanto los ayuntamientos habrán de expedir reglamentos.

La Ley General de Asentamientos Humanos asignada la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) como la instancia que tiene el mandato de mejorar el nivel y calidad de vida de la población mediante la creación y mejoramiento de condiciones favorables

para la relación adecuada entre diversas zonas de vivienda, trabajo, recreación, equipamientos, dotación de infraestructura y servicios urbanos.

Es atribución de la SEDATU, de acuerdo con la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, ser la instancia encargada de los asuntos de desarrollo urbano con criterios de planeación para la calidad en las ciudades y zonas metropolitanas, así como su respectiva infraestructura de comunicaciones y de servicios, en coordinación con las autoridades estatales y municipales.

La Ley General de Cambio Climático se orienta al derecho a un medio ambiente sano, a través de la elaboración de políticas públicas para mitigar emisiones de gases de efecto invernadero y mencionando al desarrollo urbano como una de las principales áreas para instrumentar acciones (reconoce al transporte entre las categorías de fuentes emisoras). Por lo que se refiere a las atribuciones de estados y municipios, establece el formular e instrumentar acciones en materia de infraestructura y transporte eficiente y sustentable. Corresponde al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático emitir recomendaciones sobre políticas de mitigación y/o adaptación al cambio climático y realizar investigaciones sobre transporte eficiente y sustentable.

Resumiendo, en la legislación federal no existe una ley específica de movilidad y transporte urbano y suburbano, por lo tanto, no hay un organismo encargado de coordinar y regular las políticas, inversiones y proyectos de movilidad y transporte en los tres órdenes de gobierno.

### 3.6 Patrones de movilidad y accesibilidad

Para el caso de la ciudad de Mexicali de acuerdo a los datos de la Dirección de Administración Urbana de Mexicali (2008), a finales del 2004 existían en Mexicali 20 fraccionamientos cerrados y para el 2008 el número de estos ascendió a 45, lo que representó un incremento del 225% en solo cuatro años.

Pérez Brambila (2009), destaca entre los problemas más notorios que presentan dichos fraccionamientos vinculados a la movilidad, los siguientes:

- En la zona con fraccionamientos cerrados existen muy pocos comercios ubicados casi exclusivamente sobre vialidades primarias. En consecuencia lo anterior dificulta el acceso a estos comercios, incentivando la utilización del vehículo privado, desincentivando el tránsito peatonal y la interacción comunitaria.
- La falta de diversificación en medios de transporte, ya que al utilizar los vehículos particulares se genera más contaminación de aire, mayor congestión de las vialidades primarias, mayor número de accidentes en los cruceros principales de esta zona, así como un mayor consumo de combustibles.
- En esta zona los fraccionamientos tienen en promedio un solo acceso. Por su parte en la zona de fraccionamientos abiertos, estos cuentan en promedio con once accesos por colonia.
- Estas zonas cuentan con muy pocas áreas escolares, situación que motiva a que la mayoría de los estudiantes tengan que ser transportados en vehículo a escuelas ubicadas fuera de la zona.

- En toda el área de estudio, el 70% de los vehículos eran tripulados solamente por el conductor, esto evidencia como la cultura y el arraigo en el uso del vehículo privado es muy alto y se incentiva más en la zona con estos fraccionamientos cerrados.

Para la ciudad de Mexicali Corona y Rojas Caldelas (2009) proponen mediante la regulación del uso del suelo un patrón compacto de ciudad con mayor densidad de población, que tienda a su vez a reducir las distancias entre espacios habitacionales y de trabajo, acompañado por un incremento en la infraestructura vial primaria y mejores coberturas de pavimentación.

Dentro del Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Mexicali 2015-2050 se plantea que para medir el índice de accesibilidad carretera se toman en cuenta dos factores: el índice de accesibilidad del territorio y el índice de accesibilidad de las personas.

Como se observa en la tabla 7, en cuanto al índice de accesibilidad territorial se refiere, con accesibilidad baja se observa que 171,699.40 Has., tienen el 0.12 de accesibilidad, con accesibilidad media se tienen 196,302.27 Has., que representa el 0.28 de accesibilidad, con accesibilidad alta 72,522.39 Has., que tienen el 0.16 de accesibilidad, mientras que sin accesibilidad se tiene una gran cantidad de territorio que representa 953,037.23 has, lo cual muestra un déficit al tener en conjunto solo un 0.56 de accesibilidad lo que representa una porción importante del territorio que no cuenta con accesibilidad adecuada. Claro esto incluyendo zonas rurales.

En cuanto al índice de accesibilidad poblacional, con accesibilidad baja son 8,830 personas lo que representa el 0.01 de accesibilidad, con accesibilidad media 28,135 personas que

representa el 0.06 de accesibilidad, con accesibilidad alta se tienen 897,018 personas lo cual implica el 2.87 de accesibilidad, mientras que sin accesibilidad solo 2,843 personas, lo cual muestra una alta accesibilidad poblacional al tener en conjunto un 2.94 de accesibilidad lo que representa que la mayoría de la población cuenta con una accesibilidad adecuada.

Tabla 7. Índice de accesibilidad carretera, 2010

ID	Tipo de Accesibilidad		Superficie		Índice de	Población		Índice de
	Nombre	Valor	Has	%	accesibilidad territorial	Hab	%	accesibilidad población
1	Alto	3	72,522.39	5.20%	0.16	897,018	95.75%	2.87
2	Medio	2	196,302.27	14.09%	0.28	28,135	3.00%	0.06
3	Bajo	1	171,699.40	12.32%	0.12	8,830	0.94%	0.01
4	NA	0	953,037.23	68.39%	0.00	2,843	0.30%	0.00
			<b>1,393,561.30</b>	<b>100.00%</b>	<b>0.56</b>	<b>936,826</b>	<b>100.00%</b>	<b>2.94</b>

Fuente: Instituto de Investigaciones Sociales, UABC (2013)

Referente a la movilidad según el estudio de Logit (2012), en el área urbana de la Ciudad de Mexicali concentra el 95.2 % de los movimientos de transporte público. El 2.1% de los movimientos son del área urbana hacia el valle, mientras que el 2.7% son del valle hacia el área urbana de Mexicali, y el 0.1% corresponde a los viajes externos – externos. .

- El centro histórico de la ciudad de Mexicali genera 9,498 viajes persona día y representa por mucho los mayores movimientos con el 6.17%, seguido del Centro Cívico (6,208 vpd).
- Los movimientos internos (dentro de cada zona colonia) son mínimos ya que solo representan el 0.1%, seguramente estos viajes corresponden a aquellas colonias que tienen un área mayor.

De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología (2007), el 84% de los propietarios de un vehículo en la ciudad de Mexicali, indican usarlo los 7 días de la semana, el 6% solamente 6 días a la semana y el restante 10% entre 3 y 4 días a la semana. El 88% lo usan para uso personal, el restante para negocio. Lo que implica la dependencia del vehículo privado en su uso cotidiano.

El 67% de los propietarios de vehículos indico no saber cuál es el recorrido semanal promedio que efectúa con su vehículo. El restante implicó un recorrido de 266 Km. por semana, los pick up 389 Km. las van 307 Km. las SUV 292 Km. por semana promedio.

Con esta información se obtiene los litros por semana promedio, siendo 55 litros, que debido al precio homologado en zonas fronterizas con ciudades de E.U.A. puede oscilar el costo de combustible por semana en promedio de 600 a 800 pesos.

En este sentido se observa que el gasto energético representa un elemento representativo del transporte en la ciudad.

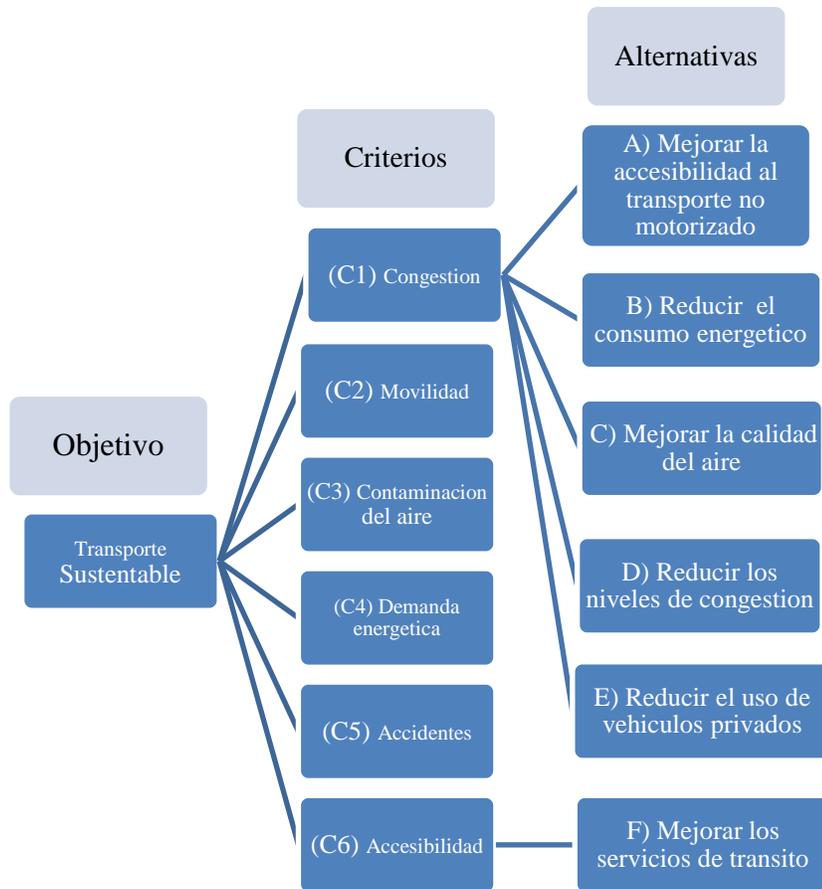
En suma estado actual de la movilidad de la ciudad de Mexicali presenta dificultades desde la estructura urbana, en la oferta y demanda del transporte colectivo, en la falta de instrumentos de planeación urbana, así como en la prevalencia del uso de transporte privado en relación al público.

## **CAPÍTULO 4. Metodología**

### **4.1 Proceso Analítico Jerárquico**

La metodología que se propuso para evaluar los principios de la sustentabilidad en el sistema de transporte de la ciudad de Mexicali, Baja California, utilizando la evaluación multicriterio; en particular, el proceso analítico jerárquico (AHP), a partir del modelo del Victoria Transport Policy Institute (2014), Beria (2011), Diappi (2010), Tudela (2006), Ju (2012), Munda (1993), así como del Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos (2008) del Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), se describe en los siguientes pasos:

1. Principio de la construcción de jerarquías. El esquema jerárquico está compuesto por: objetivo o foco, criterios, subcriterios, alternativas. A continuación en la figura 7, se presenta el árbol de jerarquías propuesto donde se integran los elementos referidos en el marco analítico de evaluación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Árbol de jerarquías

## 2. Establecimiento de prioridades. La escala “AHP”

De acuerdo con Barba (2007) la escala que estableció Thomas L. Saaty, no es de manera arbitraria sino como producto de todo un estudio de base experimental, donde se ha confirmado que una escala de nueve (9) elementos es razonable, mencionados en la tabla 8, reflejando de manera suficiente los distintos grados o niveles en los cuales una persona puede discriminar la intensidad de la relación entre elementos de un conjunto dado, de esta manera, todas las

comparaciones, y por ende las mediciones, cuando se usa esta técnica se hacen en la misma escala; por ello, la técnica se ajusta al principio de homogenización de la teoría de mediciones, en particular, cuando se trabaja con factores o variables de gran variedad y diversidad en el estudio que se está realizando.

Tabla 8. Escala de comparaciones pareadas

<b>Intensidad</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al cumplimiento del objetivo
3	Moderada importancia de uno sobre otro	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Fuerte o esencial importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrable importancia	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la practica
9	Extremada importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra, es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Valores intermedios o de compromiso	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	Para comparación inversa	

Fuente: Saaty (2006)

2.1 Asignación de pesos. Los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado a los criterios, se asigna un vector de pesos  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  siendo n el número de criterios.

2.2 Panel de expertos. Se seleccionaron expertos en el tema que representaran a los distintos sectores que tienen incidencia en el transporte; gubernamental, empresarial, social, académico.

- Ing. Jaime Navarro Celaya. Consejo Municipal del transporte.
- Arq. Benjamín Garza Fernández. Director de la Alianza del transporte público en Mexicali.
- Arq. Diego Alejandro de Arco Vélez. Jefe de Planeación del Sistema Municipal del transporte XXI Ayuntamiento de Mexicali.
- Dr. Moisés Galindo Duarte. Jefe de Laboratorio de Planeación Urbana y Desarrollo Sustentable, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California.
- Ing. Francisco Javier Paredes Rodríguez. Integrante de la mesa de transporte, proyecto "Mexicali, ciudad de gran visión".
- Ing. Ramón Maciel. Integrante de la mesa de transporte, proyecto "Mexicali, ciudad de gran visión".
- Ing. Temóc Ávila. Integrante del movimiento en contra del alza a la tarifa en el transporte público de Mexicali.

2.3 Método de asignación directa. A través de un panel de expertos el decisor asigna directamente valores a los pesos. Se pueden asignar de diferentes formas: por ordenación simple, por tasación simple o por comparaciones sucesivas. El método de tasación simple, consiste en pedir al decisor que dé una valoración de cada peso en una cierta escala. El primer paso es normalizar la matriz de comparaciones pareadas de la que se quiere medir su consistencia (Jiménez, 2015).

El procedimiento que se utiliza en el AHP para normalizar la matriz es por suma y consiste en que dada una matriz definida se sustituya cada elemento:  $a_{ij}$  por el cociente entre ese elemento y la suma de todos los elementos de la columna donde está situado  $a_{ij} / \sum a_{kj}$ . Luego de normalizada la matriz de comparaciones pareadas se suman sus filas y se promedia cada suma para obtener el vector media de sumas o de prioridades globales (Dempster, 1967).

Después se realiza el producto de la matriz original por el vector de prioridades globales o media de sumas y se obtiene el vector fila total, este vector fila se divide por el vector de prioridades globales o media de sumas calculado anteriormente, obteniendo de este cociente una matriz columna. Se suman todos los elementos de esta matriz columna y se promedia. El número promedio obtenido es:

$$\lambda \text{ max.}$$

En este sentido se estableció la escala de comparaciones pareadas donde se define la importancia que tiene cada criterio (definidos previamente), primeramente respecto al objetivo, (véase tabla 8), definiéndose los valores a través del Proceso Analítico Jerárquico (Munda, 1993), (i) considerando factores de tipo cualitativo y cuantitativo; y (ii) considerando la pluralidad de percepciones de los expertos involucrados en el problema de decisión.

Tabla 9. Comparaciones pareadas de criterios con respecto al objetivo

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	$\Sigma$
Criterio 1	1	1	1/2	1	1/2	1	4
Criterio 2	1	1	1	1	2	1/2	6.5
Criterio 3	2	1	1	3	1/2	2	9.5
Criterio 4	1	2	1/3	1	1	1	6.33
Criterio 5	2	1/3	1	1	2	1/2	6.83
Criterio 6	1	2	1/2	1	1/2	2	7
Total							40.16

Fuente: Elaboración propia a partir del panel de expertos

Una vez realizadas las comparaciones se estableció calcular el vector propio de la matriz de criterios que representa la importancia relativa de los criterios comparados en cada una de las matrices;

$$A * w = \lambda * w$$

Dónde:

A= Matriz recíproca de comparaciones a pares (Juicios de importancia/ preferencia de un criterio sobre otro).

w= Vector propio que representa el ranking u orden de prioridad.

$\lambda$ = Máximo valor propio que representa una medida de la consistencia de los juicios.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0.5 \\ 2 & 1 & 1 & 3 & 0.5 & 2 \\ 1 & 2 & 0.33 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0.33 & 1 & 1 & 2 & 0.5 \\ 1 & 2 & 0.5 & 1 & 0.5 & 2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} C1= 0.10 \\ C2= 0.16 \\ C3= 0.24 \\ C4= 0.16 \\ C5= 0.17 \\ C6= 0.17 \end{bmatrix}$$

De esta forma se estableció el orden de las prioridades o ponderación de las variables. En primer lugar se encuentra el criterio de contaminación del aire, segundo el criterio de movilidad, tercero el criterio de congestión, cuarto el criterio de demanda energética, en penúltimo el criterio de accesibilidad y finalmente el criterio de accidentes.

En el siguiente paso se construyó las matrices de comparación de las alternativas en función de cada criterio, en estas matrices la escala de valores será la misma usada anteriormente, de forma que al valorar una alternativa respecto a otra se otorga más valor a aquella que sea prioritaria respecto al criterio considerado.

Tabla 10. Matriz de comparación de las alternativas en función de la congestión

Criterio 1 (Congestión)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D	Alternativa E	Alternativa F	$\Sigma$
Alternativa A	1	9	5	1	1	2	19
Alternativa B	1/9	1	7	1	2	1	12.11
Alternativa C	1/5	1/7	1	3	3	1	16.34
Alternativa D	1	1	1/3	1	1	1	5.33
Alternativa E	1	1/2	7	7	1	9	25.5
Alternativa F	1/2	1	1	1	1/9	1	4.61
Total							82.89

Fuente: Elaboración propiaa partir del panel de expertos

$$\begin{bmatrix} 1 & 9 & 5 & 1 & 1 & 2 \\ 0.11 & 1 & 7 & 1 & 2 & 1 \\ 0.2 & 0.14 & 1 & 3 & 3 & 9 \\ 1 & 1 & 0.33 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.5 & 7 & 7 & 1 & 9 \\ 0.5 & 1 & 1 & 1 & 0.1 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A= 0.23 \\ B= 0.15 \\ C= 0.20 \\ D= 0.05 \\ E= 0.31 \\ F= 0.06 \end{bmatrix}$$

Para conocer la jerarquía de las alternativas se multiplica la matriz formada por los autovectores  $W_{ij}$  de las alternativas bajo cada criterio, por la matriz de autovectores  $W$  obtenido para los criterios. El resultado de esta multiplicación es la matriz  $P$ , la cual expone los pesos finales para cada alternativa n:

Tabla 11. Matriz de comparación de las alternativas en función de la movilidad

Criterio 2 (Movilidad)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D	Alternativa E	Alternativa F	$\Sigma$
Alternativa A	1	5	7	1	1/3	3	17.33
Alternativa B	1/5	1	2	1	1/5	2	6.4
Alternativa C	1/7	1/2	1	4	1/6	2	7.5
Alternativa D	1	1	1/4	1	1/2	2	5.75
Alternativa E	3	5	6	2	1	2	19
Alternativa F	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1	3.03
Total							59.01

Fuente: Elaboración propiaa partir del panel de expertos

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 1 & 0.33 & 3 \\ 0.2 & 1 & 2 & 1 & 0.2 & 2 \\ 0.14 & 0.2 & 1 & 4 & 0.16 & 2 \\ 1 & 1 & 0.25 & 1 & 0.5 & 2 \\ 3 & 5 & 6 & 2 & 1 & 2 \\ 0.33 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A= 0.29 \\ B= 0.11 \\ C= 0.13 \\ D= 0.09 \\ E= 0.32 \\ F= 0.05 \end{bmatrix}$$

Tabla 12. Matriz de comparación de las alternativas en función de la contaminación del aire

Criterio 3 (Contaminación del aire)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D	Alternativa E	Alternativa F	$\Sigma$
Alternativa A	1	5	1	3	1	1/5	11.2
Alternativa B	1/5	1	1/3	1	1/2	2	5.03
Alternativa C	1	3	1	5	7	9	26
Alternativa D	3	1	1/5	1	2	3	10.2
Alternativa E	1	2	1/7	1/2	1	1	5.64
Alternativa F	5	1/2	1/9	1/3	1	1	7.94
Total							66.01

Fuente: Elaboración propia a partir del panel de expertos

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 & 3 & 1 & 0.2 \\ 0.2 & 1 & 0.33 & 1 & 0.5 & 2 \\ 1 & 3 & 1 & 5 & 7 & 9 \\ 3 & 1 & 0.2 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 0.14 & 0.5 & 1 & 1 \\ 5 & 0.5 & 0.11 & 0.33 & 1 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A= 0.17 \\ B= 0.08 \\ C= 0.39 \\ D= 0.15 \\ E= 0.09 \\ F= 0.12 \end{bmatrix}$$

Tabla 13. Matriz de comparación de las alternativas en función de la demanda energética

Criterio 4 (Demanda energética)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D	Alternativa E	Alternativa F	$\Sigma$
Alternativa A	1	1/5	1/2	1/5	1/3	1/4	2.48
Alternativa B	4	1	3	5	5	7	25
Alternativa C	2	1/3	1	1/5	4	6	13.53
Alternativa D	5	1/5	5	1	1/2	1/7	11.84
Alternativa E	3	1/5	1/4	2	1	7	13.45
Alternativa F	4	1/7	1/6	7	1/7	1	12.44
Total							78.74

Fuente: Elaboración propiaa partir del panel de expertos

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.33 & 0.25 \\ 4 & 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ 2 & 0.33 & 1 & 0.2 & 4 & 6 \\ 5 & 0.2 & 5 & 1 & 0.5 & 0.14 \\ 3 & 0.2 & 0.25 & 2 & 1 & 7 \\ 4 & 0.14 & 0.16 & 7 & 0.14 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} A= 0.03 \\ B= 0.32 \\ C= 0.17 \\ D= 0.15 \\ E= 0.17 \\ F= 0.16 \end{cases}$$

Tabla 14. Matriz de comparación de las alternativas en función de los accidentes

Criterio 5 (Accidentes)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D	Alternativa E	Alternativa F	$\Sigma$
Alternativa A	1	4	3	1/2	1/4	1	9.75
Alternativa B	1/4	1	5	1/3	1/3	1	7.91
Alternativa C	1/3	1/5	1	2	1/2	3	7.03
Alternativa D	2	3	1/2	1	1	3	10.5
Alternativa E	4	3	2	1	1	3	14
Alternativa F	1	1	1/3	1/3	1/3	1	3.99
Total							53.18

Fuente: Elaboración propiaa partir del panel de expertos

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 & 0.5 & 0.25 & 1 \\ 0.25 & 1 & 5 & 0.33 & 0.33 & 1 \\ 0.33 & 0.2 & 1 & 2 & 0.5 & 3 \\ 2 & 3 & 0.5 & 1 & 1 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A= 0.18 \\ B= 0.15 \\ C= 0.13 \\ D= 0.20 \\ E= 0.26 \\ F= 0.08 \end{bmatrix}$$

Tabla 15. Matriz de comparación de las alternativas en función de la accesibilidad

Criterio 6 (Accesibilidad)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D	Alternativa E	Alternativa F	$\Sigma$
Alternativa A	1	2	1/4	1	1/5	1/2	4.95
Alternativa B	1/2	1	1/3	1/2	1/4	1/6	2.74
Alternativa C	4	3	1	1/5	1/3	1/4	8.78
Alternativa D	1	2	5	1	1/4	3	12.25
Alternativa E	5	4	3	4	1	5	22
Alternativa F	2	6	4	1/3	1/5	1	13.53
Total							64.25

Fuente: Elaboración propia a partir del panel de expertos

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0.25 & 1 & 0.2 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0.33 & 0.5 & 0.25 & 0.16 \\ 4 & 3 & 1 & 0.2 & 0.33 & 0.25 \\ 1 & 2 & 5 & 1 & 0.25 & 3 \\ 5 & 4 & 3 & 4 & 1 & 5 \\ 2 & 6 & 4 & 0.33 & 0.2 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A= 0.08 \\ B= 0.04 \\ C= 0.14 \\ D= 0.19 \\ E= 0.34 \\ F= 0.21 \end{bmatrix}$$

Una vez calculado el vector propio de alternativas de cada matriz respecto a cada criterio se multiplican ambas matrices, el resultado implicara la ponderación o pesos de las alternativas en función de todos los criterios y su importancia.

$$\begin{bmatrix} 0.23 & 0.29 & 0.17 & 0.03 & 0.18 & 0.08 \\ 0.15 & 0.11 & 0.08 & 0.32 & 0.15 & 0.04 \\ 0.20 & 0.13 & 0.39 & 0.17 & 0.13 & 0.14 \\ 0.06 & 0.09 & 0.15 & 0.15 & 0.20 & 0.19 \\ 0.31 & 0.32 & 0.09 & 0.17 & 0.26 & 0.34 \\ 0.06 & 0.05 & 0.12 & 0.16 & 0.08 & 0.21 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C1= 0.10 \\ C2= 0.16 \\ C3= 0.24 \\ C4= 0.16 \\ C5= 0.17 \\ C6 =0.17 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.16 \\ 0.14 \\ 0.21 \\ 0.15 \\ 0.23 \\ 0.12 \end{bmatrix}$$

### 3. Principio de consistencia lógica

El tercer principio de consistencia implica dos cosas: transitividad y proporcionalidad; la primera es que deben respetarse las relaciones de orden entre los elementos, es decir, si A es mayor que C y C es mayor que B entonces la lógica dice que A es mayor que B. La segunda es que las proporciones entre los órdenes de magnitud de estas preferencias también deben cumplirse con un rango de error permitido. Por ejemplo si A es 3 veces mayor que C y C es dos mayor que B entonces A debe ser 6 veces mayor que B, este sería un juicio 100% consistente (se cumple la relación de transitividad y de proporcionalidad).

Saaty definió un índice de que ofrece el cálculo de la relación de consistencia (RC):

$$\lambda \text{ Max} = V * B$$

Dónde:  $\lambda \text{ Max}$ : es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares.

V: es el vector de prioridades o vectores propios, que ya se obtuvo, de la matriz de comparaciones.

B: es una matriz fila, correspondiente a la suma de los elementos de cada columna de la matriz de comparaciones a pares. Es una matriz de  $m \times 1$ , donde  $m$  es el número de columnas de la matriz de comparaciones.

Entonces calculado  $\lambda$  max y teniendo en cuenta el número de variables utilizadas ( $n$ ) en la matriz, se calcula el coeficiente de inconsistencia (CI).

$$CI = (\lambda \text{ max} - n) / (n-1)$$

$$(8 \ 7.33 \ 4.33 \ 8 \ 6.5 \ 7) \left\{ \begin{array}{c} 0.10 \\ 0.16 \\ 0.24 \\ 0.16 \\ 0.17 \\ 0.17 \end{array} \right\}$$

Con este resultado se puede calcular el índice de consistencia:

$$CI = \lambda \text{ Max} - n / n - 1 = 6.587 - 6 / 5 = 0.11$$

Finalmente se obtiene la relación de consistencia, se necesita el índice aleatorio. Para este existe una tabla elaborada por Saaty que muestra los índices de consistencia para una serie de matrices aleatorias con recíprocos forzados:

Tabla 16. Índice aleatorio

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índices aleatorios por tamaño de matriz	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fuente: Thomas Saaty, 1997. Toma de decisiones para líderes.

Entonces se define y resuelve la relación de consistencia como:

$$RC = CI/RI = 0.11/1.24 = 0.088$$

- Si  $RC = 0$ , la matriz es consistente.
- Si  $RC \leq 0,10$ , la matriz R tiene una inconsistencia admisible, lo que significa que se la considera consistente y el vector de pesos obtenidos se admite como válido.
- En caso de que  $RC > 0,10$ , la inconsistencia es inadmisibles y se aconseja revisar los juicios.

## **CAPÍTULO 5. Resultados y discusión**

De acuerdo con el desarrollo de esta investigación se encontró con la dificultad de evaluar al sistema de transporte de la ciudad desde el paradigma de la sustentabilidad ya que no existe suficiente información para medir la totalidad de indicadores ambientales, económicos y sociales a través de los impactos o externalidades que genera.

Los principios de un transporte sustentable que incorpora el sistema de transporte de la ciudad son muy limitados en cuanto a la eficiencia que representa la integración de todos los factores que inciden dentro del mismo, ya que se privilegian estrategias convencionales, como lo es el incremento de infraestructura carretera, con lo cual se incentiva la mayor utilización del vehículo automotor.

En este sentido, los resultados obtenidos se observa que la alternativa mejor posicionada para lograr el objetivo de tender hacia un transporte más sustentable es la (e) de reducir el uso vehículo privado, como se muestra en la tabla 17, con un índice de consistencia admisible (0.088), admitiéndose como válida. Sin embargo, esta alternativa (e), permitiría explorar modos alternos no motorizados de transporte, y un cambio, o, reorientación en los patrones y estilos de vida de los usuarios y un diseño de políticas públicas en este sentido.

Esto implicaría que el establecimiento de la opción mejor posicionada, no excluiría a las demás, instrumentándolas de forma transversal derivando en subestrategias o bien, creando escenarios posibles, que, permitan la consecución del objetivo.

Otra de las limitantes de la aplicación de este modelo de sustentabilidad para el transporte en la ciudad radica en sus propios actores, como lo pueden ser los concesionarios del transporte público, que operan bajo esquemas tradicionales y sesgados, con lo cual generan poco valor hacia la comunidad.

Respecto al modelo del Victoria Transport Policy Institute (VTPI) se observa que el transporte de la ciudad tiende más a visiones unidimensionales o parciales, más que a la planificación coordinada entre diferentes sectores, grupos y dependencias gubernamentales, desvinculando objetivos a corto plazo con los objetivos estratégicos a largo plazo que pudiesen mejorar al sistema.

El modelo VTPI implica contar con diversidad en el sistema transporte, donde los viajeros puedan elegir entre varios modos, ubicación y opciones de precios, en particular que sean asequibles, saludables, eficientes, en sentido contrario, se encuentra que una de las principales debilidades del sistema de transporte es la dependencia por un único modo de transportarse, que es la del vehículo privado, siendo marginal la utilización de otros modos alternos, como el transporte público o colectivo, por ejemplo.

La planeación urbana necesita herramientas que incorporen estas redes de relaciones y efectos en la realidad actual, los modos convencionales de diseñar planes e instrumentar políticas públicas para el transporte sin vincular criterios como la movilidad, la accesibilidad, la contaminación del aire, el consumo energético, están siendo rebasados en su capacidad de respuesta ante las necesidades presentes, y, sobre todo ante los retos venideros. El establecimiento de esta jerarquización o "ranking" de alternativas podría coadyuvar en la integración de una planeación más eficiente que propicie un desarrollo más sostenible.

En el último lugar en el "ranking" de alternativas se obtuvo la mejora en los servicios de tránsito, esto tendría que ver con la intensidad de recursos que implicaría, desde el punto de vista de eficiencia podría no tener impactos para la búsqueda del objetivo.

Tabla 17. Ranking de alternativas

Estrategia	Criterio Congestión	Criterio Movilidad	Criterio Contaminación del aire	Criterio Demanda energética	Criterio Accidentes	Criterio Accesibilidad	Promedio	Prioridad Ranking
Mejorar la accesibilidad al transporte no motorizado	0.23(2)	0.29 (2)	0.17 (2)	0.03(5)	0.18(3)	0.08 (5)	0.16	3
Reducir el consumo energético	0.15(4)	0.11 (4)	0.08 (6)	0.32(1)	0.15 (4)	0.04 (6)	0.14	5
Mejorar la calidad del aire	0.20 (3)	0.13 (3)	0.39 (1)	0.17(2)	0.13 (5)	0.14	0.21	2
Reducir los niveles de congestión	0.05(6)	0.09 (5)	0.15 (3)	0.15(4)	0.20 (2)	0.19(3)	0.15	4
Reducir el uso de vehículos privados	0.31(1)	0.32 (1)	0.09 (5)	0.17(2)	0.26 (1)	0.34 (1)	0.23	1
Mejorar los servicios de tránsito	0.06(5)	0.05 (6)	0.12 (4)	0.16(3)	0.08 (6)	0.21(2)	0.12	6

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO 6. Conclusiones y recomendaciones**

A partir del desarrollo de esta investigación se concluye que no existe un proceso de evaluación para el transporte sustentable suficientemente acabado o estandarizado que permita una medición más integral e inclusiva, aunque en ciertas regiones, sobre todo en países desarrollados, se están estableciendo programas de evaluación cada vez con mayor aplicabilidad para la planeación.

Actualmente no hay lineamientos normativos que sustenten este proceso y, en muchos de los casos los datos básicos necesarios para realizar este proceso son escasos, especialmente en las regiones en desarrollo, como en este caso, lo cual limita este tipo de ejercicios.

El poder establecer evaluaciones para un transporte sustentable puede ayudar a determinar cómo se definen los problemas y cuáles son los impactos que generan. Una alternativa u opción puede parecer buena y deseable cuando se evalúa usando un conjunto de indicadores, pero perjudicial cuando se evalúa con otro. Por lo tanto, se considero importante ser realista al momento de seleccionar los indicadores para este trabajo, teniendo en cuenta la disponibilidad de datos, su comprensión y utilidad.

Los aspectos que se consideraron para contar con un marco integral de evaluación, para a la planeación y la gestión del transporte en Mexicali bajo los principios de sustentabilidad, deben estar

En particular, la evaluación multicriterio al instrumentarse en varias regiones de países sobre todo europeos y asiáticos (Croacia, Taiwán, Rusia, etc.) como una forma alterna a los procesos de evaluación tradicional, representa un instrumento apropiado para la incorporación de variables ambientales, que les permita a los tomadores de decisiones

comprender mejor las relaciones e interacciones en un entorno complejo y hasta cierto punto conflictivo.

El reducir el uso de vehículos privados como prioridad es un aspecto que debe implementarse a través de la adopción de políticas públicas que impongan o restrinjan su utilización, pero no debe de condicionarse a una política exclusiva, sino además, por ejemplo, el de mejorar la oferta en los servicios de transporte, como lo pueden ser, los espacios confinados para modos alternos de transporte masivo, esto, llevaría a producir un cambio en el paradigma de acuerdo a los propios actores del sistema (usuarios, concesionarios, autoridades) hacia uno más sustentable.

Las características propias de la ciudad, como su ubicación geográfica, tipo de clima, cultura del vehículo, desincentiva la utilización de formas alternas para la movilidad, sin embargo el adecuar algunas estrategias de las que se señalan en este estudio podrían incidir positivamente en el sistema, contribuyendo a la búsqueda de un transporte más sustentable.

Los principios de sustentabilidad en el sistema de transporte de la ciudad no se cumplen en distintos aspectos; asequibilidad, hay espacios sobre todo en la periferia urbana que no están cubiertas por el transporte colectivo, resultando en una ineficiente movilidad, incrementando los costos sociales y económicos, no se privilegia la pertinencia de los modos alternos de transporte, al no existir políticas de fomento a la reducción del uso de vehículo privado.

La tendencia de la ciudad a expandirse provoca una dependencia al vehículo automotor privado, lo cual ocurre por la falta de alternativas en su origen.

La capacidad institucional es muy limitada, al no contar con recursos financieros, humanos, jurídicos y técnicos en el Sistema Municipal del Transporte, circunscribiéndose a verificar solamente normas reglamentarias.

Hay una disociación entre la planificación urbana y el transporte, existen políticas contrapuestas, como es el mantenimiento de rutas de transporte público desde hace más de 20 años sin la adecuación con las nuevas dinámicas en los asentamientos.

Como propuesta de integración de algunos principios a partir de los resultados que se obtuvieron a partir de la evaluación realizada, se encuentran:

- Incrementar los costos asociados a dar de alta o revalidar el uso de vehículos particulares, desincentivándolo, a través de impuestos progresivos, (ya que grava en mayor medida a los automóviles más caros, los que tienen menor rendimiento, los ineficientes y los que producen mayores emisiones de NO<sub>x</sub>). En el caso contrario incentivar la renovación o modernización de vehículos eficientes "limpios" como serían los cero contaminantes (eléctricos y otras nuevas tecnologías), y los híbridos en el mediano y largo plazo.
- El Sistema Municipal del Transporte debe robustecer sus funciones de planeación, operación y control para un adecuado funcionamiento del transporte, público, privado y de carga, facultándola desde nivel estructural como una dependencia dentro de la administración pública municipal, de no ser así se podría evaluar la facultad del gobierno del estado para dirigir una política de movilidad como lo hacen diversos estados en el país.
- Creación de infraestructura no motorizada (ciclovías, andadores) que permitan migrar del vehículo motor, por esquemas menos contaminantes.

- Regular el sistema de transporte de personal, ya que afecta la demanda del transporte público incrementando los costos de los concesionarios y por ende la tarifa del servicio.
- Elaboración de itinerarios que muestren al usuario los momentos en que cada unidad pasará por los paraderos o, al menos, por determinados puntos. Esto redundará en beneficio del usuario, quien conocerá el momento oportuno para dirigirse a la parada y reducir sus tiempos de espera, bajo un clima extremo.
- Crear rutas alimentadoras que permitan acceder de una manera más ágil a la red de transporte.
- Establecer incentivos para la adopción de esquemas en la eficiencia de los viajes privados. (Carpool, subsidios a bicicletas, etc.).
- Regular el transporte de carga, diseñando rutas para su funcionamiento.
- Optimización del sistema de tráfico (semáforos, eliminación de altos, avenidas rápidas que permitan mayor velocidad).
- Ejecución y adecuación de carriles confinados para transporte público BRT (Bus Rapid Transport).
- Pavimentación de zonas periféricas a través de recursos mixtos (públicos, privados, internacionales) que producen contaminantes por el polvo (PM<sub>10</sub> y PM<sub>5</sub>)
- Priorizar al transporte público dentro de la planeación de nuevas zonas residenciales, fraccionamientos, zonas comerciales, para facilitar la accesibilidad, desprivilegiando el acceso a autos particulares a fraccionamientos exclusivos.
- Crear zonas acceso restringido al transporte público y no motorizado (centro histórico, cívico).

Así pues el alcance de este trabajo tiene que ver con el desarrollo de una metodología de evaluación que planteo la integración de los principios del transporte sustentable a través de indicadores básicos para la ciudad de Mexicali, donde la incorporación de otros indicadores pudiese permitir el generar marcos de referencia mas armónicos para los tomadores de decisiones.

La limitación principal tiene que ver con la dificultad para la generación de información para ciertos indicadores, tales como la contaminación acústica, la utilización de biocombustible, etc. lo cual integraría de una forma más completa todas las interacciones.

Las líneas de investigación futuras tendrían que explorar los efectos de la instrumentación de las estrategias aquí planteadas y cuáles de estas pudiesen ser más exitosas bajo situaciones y contextos particulares.

## Referencias bibliográficas

- Arrow, K (1963). *Social choice and Individual Values*, New York, John Wiley & Son.
- Arrow, K (1972). *Discurso de premio Nóbel, Los premios nóbel de economía*, Fondo de Cultura Económica, México, 1974
- Awasthi, A., Chauhan, S.S., (2011). Using AHP and Dempster–Shafer theory for evaluating sustainable transport solutions. *Environmental Model. Softw.* 26, pp. 787–796.
- Azqueta, Diego (2002), *Introducción a la Economía Ambiental*, ed. McGraw Hill, PP. 29-52, 53-75
- Barba-Romero Sergio (2007). *Manual para la toma de decisiones multicriterio.* (LC/IP/L.122).Chile
- Beria Paolo, I. M. (2011), “Comparing Cost benefit and multi-criteria analysis: the evaluation of neighborhoods sustainable mobility”, *Politécnico di Milano*, pp. 1-26.
- Bocarejo Juan (2009). *La movilidad bogotana en el largo plazo y las políticas que garanticen su sostenibilidad.* Colombia.
- Bohorquez Ángela, Lugo Diana (2010), *cuantificación y análisis de gases de efecto invernadero (GEI) en el ciclo de vida del etanol obtenido de la caña de azúcar, con base en las directrices del IPCC 2006. Caso de estudio: ingenioprovidencia S.A.* pp. 3-9. Bogotá.
- Bristow and J. Nellthorp (2000) *Transport project appraisal in the European Union.* *Transport Policy*, vol. 7, issue 1, pp. 51-60.
- Browne David, Ryan Lisa (2010), “Comparative analysis of evaluation techniques for transport policies”, (Elsevier, Ed.) *Environmental Impact Assessment Review*, pp. 1-8.
- Brucker Klaas De, Macharis Cathy, Verbeke Alain (2011), “Multicriteria analysis in transport project evaluation: an institutional approach”, *European Transport*, pp. 3-24.
- Bryceson, D.F (2003), *Sustainable livelihoods, mobility and access needs*, Department for International Development, London, pp. 1-3.

Carpintero, Oscar (2005), El metabolismo de la economía española: recursos naturales y huella ecológica (1955-2000), Fundación Cesar Manrique. España, Cap. 1, pp. 43-104.

Casado José (2008), Estudios sobre movilidad cotidiana en México. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona, vol. XII, núm. 273.

Centro Mario Molina (2007), Movilidad Sustentable. Ciudad de México.

Chile. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). (2008), Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. Santiago.

Christy Jeon (2007). Evaluating plan alternatives for transportation system sustainability: Atlanta metropolitan region.

Cobb, Halstead y Rowe (1999); Dixon (2004); Schepelmann, Goossens y Mäkipää (2010). Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport.

Corona-Zambrano, Elva Alicia; Rojas-Caldelas, Rosa Imelda. Calidad del aire y su incorporación en la planeación urbana: Mexicali, Baja California, México Estudios Fronterizos, vol. 10, núm. 20, julio-diciembre, 2009, pp. 79-102

Daly Herman and Cobb John (1989), For the Common Good, Beacon, United Kingdom.

De Brucker K, Macharis K., Verbeke A.(2011). Two-Stage Multi-Criteria Analysis and the future of ITS-based Safety Innovation Projects". IET Intelligent Transport systems, IET Intelligent Transport Systems.

De la cámara Gonzalo (2008). Guía para decisores: análisis económico de externalidades ambientales, CEPAL, pp. 5-16.

Dempster, A.P., (1967). Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping. Annals of Mathematical Statistics 38 (2), pp.325–339.

Dempster, A.P., (1968). A generalization of Bayesian inference. Journal of the Royal Statistical Society 30 (2), pp. 205–247.

Deng, Y., Chan, F.T.S., Wu, Y., Wang, D., (2011). A new linguistic MCDM method based on multiple-criterion data fusion. *Expert Systems with Applications*.

Diappi L., Bolchi P., Concilio G. (2010), *Assesing sustainability in urban design: the ANP*. Fifth congress of Italian association of sistem.

EEA, (2011). *Laying the Foundations for Greener Transport—TERM 2011: Transport* Copenhagen, Denmark.

Estados Unidos de América. U.S. Environmental Protection Agency. USEPA. *Indicator Development for Estuaries Manual*. 2008. California.

George, T., Pal, N.R., (1996). Quantification of conflict in Dempster–Shafer framework: a new approach. *International Journal of General Systems* 24 (4), pp. 407–423.

Georgescu, Nicholas (1966), *La ley de la entropía y el proceso económico*, *Economía y Naturaleza*, Selección de textos básicos, Ed. Visor, España, pp. 15-40, 45-68.

Geurs Kars, Van Wee, wee (2004), *Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions*, *Journal of Transport Geography* 12, pp. 127–140.

Gilbert, R. Tanguay, H.,(2000). *STPI Project: Brief Review of Some Relevant Worldwide Activity and Development of an Initial Long List of Indicators*, CST. Toronto, Canada.

Govinda R. Timilsina, Hari B. Dulal (2009), *Regulatory instruments to control environmental externalities from the transport sector*, *European Transport* n. 41 , pp: 80-112.

Gowdy John, Mesner Susan, (1998), *The Evolution of Georgescu-Roegen's Bioeconomics*, *Review of Social Economy*, Vol. LVI, No, 2 summer, pp.136- 156.

Hahnemann Samuel (1991). *Science and Society: Understanding Scientific Methodology, Energy, Climate, and Sustainability*. Germany.

Hall Ralph (2006), *Understanding and Applying the Concept of Sustainable Development to Transportation Planning and Decision-Making in the U.S.*, PhD Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

Handy Susan (2002), Accessibility- vs. mobility-enhancing strategies for addressing automobile dependence in the U.S. Department of Environmental Science and Policy University of California at Davis, pp. 1-11.

Hawkswoth John, Gordon (2008). The World in 2050: Beyond the BRICs. London, England.

Hernández, Tania (2008), Breve exposición de las contribuciones de Georgescu Roegen a la economía ecológica y un comentario crítico, Argumentos, Vol. 21, Núm. 56, enero-abril, pp. 35-52, Universidad Autónoma Metropolitana – Xochimilco Distrito Federal, México.

Hicks J. (1943). History of economic doctrine, The economic Historic Review. USA.

Ian Parry wh, Walls Margaret y Winston Harrington (2007), Automobile Externalities and Policies, Journal of Economic Literature, Vol. XLV (June 2007), pp. 373–399.

IMCO (2011). Instituto mexicano para la competitividad. Informe de competitividad en México.

Instituto Nacional de Ecología, (INE); (2006), Inventario nacional de gases de efecto invernadero 2002, Coordinación del Programa de Cambio Climático, Instituto Nacional de Ecología. México.

Instituto Nacional de Ecología, (INE); (2008), Estudio de emisiones y características vehiculares en ciudades Mexicanas de la frontera norte, Fase 1: Tijuana y Mexicali., estudio a cargo de la Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional y la Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire del INE. Preparado por TSTES bajo contrato INE/ADE-077/2007.

Instituto Nacional de Ecología, (INE); (2010), Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en ciudades mexicanas, Preparado por JICA, Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP, CENICA. (Disponible en <http://www.ine.gob.mx>, última consulta 28/10/2011).

Instituto Nacional de Ecología, (INE); (2011), Diagnóstico sobre compuestos tóxicos en aire ambiente y caracterización espacial de fuentes de emisión y meteorología en la Región Fronteriza de Baja California Norte, Preparado por: Molina Center for Energy and theEnvironment (MCE2), Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental

(CENICA), Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM (CCA-UNAM), Centro de Investigaciones Químicas, UAEM (CIQ-UAEM). Convenio INE/ADE 038/2010.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI), (ed.); 2010. Principales resultados por localidad 2010 (ITER) - Baja California.

ITDP (2012). Instituto de Políticas para el transporte y el desarrollo. Transformando la movilidad urbana en Mexico.

Jiménez, m., & maría, j. (2015). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones.

Joumard y Gudmundsson (2010). Indicators of environmental sustainability in transport. INRETS., pp.422-430.

Ju, Y., Wang, A., (2012). Emergency alternative evaluation under group decision makers: a method of incorporating DS/AHP with extended TOPSIS. Expert Systems with Applications 39 (1), pp. 1315–1323.

Kahneman Daniel, Tversky Amos (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk Econometrica, Vol. 47, No. 2, pp. 263-292

Keeney, R.L., Raiffa, H., (1993). Decisions with Multiple Objectives. Cambridge University Press, Cambridge.

Kolak, Ilker, Akınb, S, Birbilc, Orhan, Feyzio, glua, Nilay, Noyanc (2011), Multicriteria Sustainability Evaluation of transport. World Congress of engineering, pp. vol.1, 1-6.

Kolstad, Charles, (2001). Economía ambiental. Oxford University Press, pp. 2-9, 33-55 y, 89-111.

Lakshmi Ramani, Josias Zietsman, Henrik Gudmundsson, Ralph P. Hall and Greg Marsden (2011), “Framework for Sustainability Assessment by Transportation Agencies,” Transportation Research Record 2242, Transportation Research Board (www.trb.org), pp. 9-18.

Linares Pedro, Romero Carlos (2008), Economía y medio ambiente: herramientas de valoración ambiental, España, pp. 1-10.

Litman, T. (2003). "Sustainable Transportation Indicators." Victoria Transport Policy Institute, Victoria.

Litman, T. (2005). "Well Measured: Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning." Victoria Transport Policy Institute, Victoria, <http://www.vtpi.org/wellmeas.pdf>.

Litman, T. (2012) Developing Indicators for Sustainable and livable transport planning. Canada: Victoria Transport Policy Institute.

Logit (2012). Proyecto de modernización del sistema municipal del transporte troncal, línea exprés 1. Mexicali.

Lopez Lamba (2010). Urban Mobility Plans Throughout Europe: A Definitive Challenge Toward Sustainability.

Lu X. M. y Ye, G. X. (1996). Situation and policy of transportation in Shanghai at turning of the century. Urban transport policy, Freemant & Jamet (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 149-155.

Maddison, D., Pearce D., Olof J., Calthrop E., Litman T., Verhoef E. (1996). The true costs of road transport, Earthscan, UK.

Maibach M., Schenkel P., Peter D. y Gehrig S. (2008)). Environmental indicators in transport – measures for ecological comparisons between various transport means, INFRAS, Zurich.

Manrique, Nathalia (2009) Estado del arte de la economía ecológica: tesis centrales, Universidad de Málaga, N° 3 (junio – noviembre).

Möller Rolf, (2003) Movilidad de personas, transporte urbano y desarrollo sostenible en Santiago de Cali, Colombia, tesis Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, pp. 167- 351.

Newberry (1990). Pricing and congestion: economic principles relevant to pricing roads. United Kingdom.

Nijkamp Peter, Blaas (1993). Of the drastic socio-economic and political changes on the way towards a rapidly evolving network economy.

OECD (1997), towards sustainable transportation, The Vancouver Conference, Vancouver, British Columbia.

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2000). "Environmentally Sustainable Transport: futures, strategies and best practice. Synthesis Report of the OECD project on Environmentally Sustainable Transport EST." Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris.

Organizacion de las Naciones Unidas (2015). Reporte nacional de movilidad urbana en México, 2014-2015, México.

Paix Puello, López Lambas, Maria Eugenia (2011). Metodología propuesta para la evaluación de planes de movilidad urbana Sostenible.. En: "VIII Congreso de Ingeniería de los Transportes (CIT-2008).", 02/07/2008-04/07/2008, A Coruña. ISBN 978-84-380-0394-7.

PNUMA (2011). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Informe anual 2011.

Plan maestro de vialidad y transporte para el municipio de Mexicali (2004). Periodico oficial del estado de B.C. Tomo CXI, NO. 22.

Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Mexicali 2015-2050. Mexicali "Ciudad de gran visión, volumen III".

Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali 2025, XVI Ayuntamiento de Mexicali, México.

Ramini, Tara (2008), "An Improved methodology for multicriteria assesment of highway sustainability, thesis of master on civil engineering, Texas A&M University.

Rossi, Ricardo, Gastaldi, Massimiliano, Gecchele, Gregorio (2012), "Sustainability evaluation of transportation policies: a fuzzy-based method in a "what to" analysis" University of Padova, pp. 1-11.

Saaty, T. 2006. Fundamentals of Decision Making and o Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. RWS Publications. Universidad de Pittsburgh, U. S. A.

Saaty, T.L., (1977). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York.

Santos Georgina, Behrendt Hannah, Maconi Laura, Shirvani, Tara (2009), “Externalities and Economic Policies in Road Transport”. Research in Transportation Economics, pp. 1-44.

Shiau, T.A., (2012). Evaluating sustainable transport strategies with incomplete information for Taipei City. Transportation Research Part D 17 (6),pp. 427–432.

Shiau, T.A., Liu, J.S., (2013). Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies. EcologicalIndicators 34, pp.361–371.

SIMUTRA (2015). Sistema municipal del transporte de Mexicali.

Tudela A, akiki N, Cisternas, R. (2006), Comparing the output of cost-benefit and multi-criteria analyses: an application to urban transport investments. Trans Res a policy pract.

United Nations World. (1987). Our Common Future. World Commission on Environment and Development.

Universidad Autónoma de Baja California (2003). Determinación de rutas de transporte público para la ciudad de Mexicali, B,C.

USEPA. (2008). Indicator Development for Estuaries Manual, U.S. Environmental Protection Agency (<https://www.epa.gov/>)

USTRAN (2007). Diagnóstico sobre la Red de Transporte Público de la Ciudad de Mexicali, B.C.Servicios Profesionales de Consultoría Especializada, México.

Verhoef Erick (1994), Efectos externos y los costos sociales del transporte, Elsevier UK, pp. 273-287.

Verhoelf, Erick (1995), “External effects and social costs of road transport”, Trans Res a policy pract, pp. 73-87.

Verhoelf, Erick (2000), “The implementation of marginal external cost pricing in road transport: long run vs short run and first-best vs second best”, *Regional Science*, pp. 307-332.

Walters A. (1961). The economics of road uses charges. *Journal of industrial economics* 12. pp. 135- 146

XX Ayuntamiento de Mexicali (XX AM) (2011a), Plan Maestro de Vialidad y Transporte de Mexicali, B. C. Diagnóstico, Mexicali.

Zhang Lei (2013), *Comprehensive Highway Corridor Planning With Sustainability Indicators*, MD-13-SP109B4Q, University of Maryland, Maryland State Highway Administration ([www.roads.maryland.gov](http://www.roads.maryland.gov)).

Zheng Jason, Carol Atkinson-Palombo, Chris McCahill, Rayan O’Hara and Norman Garrick (2011), “Quantifying the Economic Domain of Transportation Sustainability,” *Transportation Research Record* 2242, TRB ([www.trb.org](http://www.trb.org)), pp. 19-28.

Zuk, M., M.G. Tzintzun y M.G. Rojas, (2007) *Tercer almanaque de datos y tendencia de la calidad del aire en 9 ciudades Mexicanas*, SEMARNAT e INE, México D.F, México.

## Anexo I



### Guía entrevista semiestructurada sobre transporte en Mexicali

No. Entrevista:

Nombre:

Fecha:

Dirección:

Entrevistador: Francisco Javier Peralta

Categoría	Preguntas Guía
Contexto socio-Económico  Conocer el entorno en el que se desarrolla la actividad	¿Cómo determina el aspecto físico, urbano de la ciudad al transporte?
	¿Qué incidencia tiene el ser una ciudad fronteriza para el transporte?
	¿Cómo afecta el aspecto climatológico en la movilidad de las personas?
Prácticas de transporte  Modos y estilos de transportarse	¿Cómo se transportan las personas (prácticas de los usuarios)?
	¿Cuál es la situación del transporte público?
	¿Cuál es la situación del transporte de carga?
Conocimiento del problema/soluciones  Perspectivas causales del objeto de estudio, aportaciones personales	¿Cuáles son las principales problemáticas del transporte?
	¿Cuáles son los criterios más importantes desde su perspectiva que hay que priorizar en el transporte (comparelos)? (accesibilidad, congestión, contaminación del aire, ,infraestructura, movilidad, eficiencia energética-gasolina, diesel)
	¿Cómo mitigar los efectos en el ambiente provocados por el transporte?
	¿Cuáles son las soluciones que plantea para un transporte eficiente?
	¿Qué políticas podrían vincular a la iniciativa privada, pública y asociaciones civiles?
¿De seguir el estado actual de las cosas en el transporte a mediano y largo plazo, como lo visualiza?	

## Anexo II

Imágenes expertos

Ing. Ramón Maciel



Fuente: Imagen propia (2015)

Ing. Francisco Javier Paredes Rodríguez



Fuente: Imagen propia (2015)

Dr. Moisés Galindo Duarte



Fuente: Imagen propia (2015)

Ing. Jaime Navarro Celaya



Fuente: Imagen propia (2015)

### Anexo III.

Fundamentación teórica de AHP (Saaty, 1980; 1986; 1994). Tomado de Moreno Jiménez José (2015).

Sea  $A$  un conjunto finito de  $n$  elementos llamados alternativas. Sea  $C$  un conjunto de propiedades o atributos con respecto a los que se comparan los elementos de  $A$ . Normalmente nos referiremos a los elementos de  $C$  como criterios. Cuando se comparan dos elementos de  $A$  con respecto a un criterio en  $C$ , se dice que se realiza una comparación binaria.

Sea  $\succsim_C$  una relación binaria en  $A$  que represente “más preferido que o indiferente a” con respecto al criterio  $C$  en  $C$ . Sea  $B$  el conjunto de las aplicaciones desde  $A \times A$  en  $R^+$  (conjunto de los reales positivos). Sea  $f: C \rightarrow B$ . Sea  $PC \in f(C)$  para  $C \in C$ .  $PC$  asigna un valor real positivo a cada par  $(A_i, A_j) \in A \times A$ . Sea  $PC(A_i, A_j) = a_{ij} \in R^+, A_i, A_j \in A$ . Para cada  $C \in C$ , la tripleta  $(A \times A, R^+, PC)$  es una escala primitiva o fundamental. Una escala fundamental es una aplicación de objetos en un sistema numérico.

Definición 1.- Para todo  $A_i, A_j \in A$  y  $C \in C$   $A_i \succ_C A_j$  si y sólo si  $PC(A_i, A_j) > 1$   $A_i \sim_C A_j$  si y sólo si  $PC(A_i, A_j) = 1$  Si  $A_i \succ_C A_j$  se dice que  $A_i$  domina a  $A_j$  con respecto a  $C \in C$ .  $PC$  representa la intensidad o fuerza de la preferencia de una alternativa sobre otra.

Axioma 1.- (Reciprocidad) Para todo  $A_i, A_j \in A$  y  $C \in C$ , se tiene:  $PC(A_i, A_j) = 1/PC(A_j, A_i)$ . Sea  $A = (a_{ij}) \equiv (PC(A_i, A_j))$  el conjunto de comparaciones pareadas de las alternativas con respecto al criterio  $C \in C$ .

Por el Axioma 1,  $A$  es una matriz recíproca positiva. El objetivo es obtener una escala de dominación relativa (u ordenación) de las alternativas a partir de las comparaciones pareadas dadas en  $A$ . Sea  $RM(n)$  el conjunto de las matrices  $n \times n$  recíprocas positivas  $A = (a_{ij}) \equiv (PC(A_i, A_j))$  para todo  $C \in C$ . Sea  $[0,1]^n$  el producto cartesiano de  $[0,1]$ , y sea  $\psi: RM(n) \rightarrow [0,1]^n$  para  $A \in RM(n)$ ,  $\psi(A)$  es un vector  $n$ -dimensional cuyas componentes caen en el intervalo  $[0,1]$ . La tripleta  $(RM(n), [0,1]^n, \psi)$  es una escala derivada. Una escala derivada es una aplicación entre dos sistemas relacionales numéricos.

Definición 2.- La aplicación PC se dice que es consistente si y sólo si:  $PC(A_i, A_j) PC(A_j, A_k) = PC(A_i, A_k)$  para todo  $i, j$  y  $k$ . De forma similar se dice que la matriz A es consistente si  $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$  para todo  $i, j$  y  $k$ . Si PC es consistente, entonces el Axioma 1 se cumple automáticamente y la ordenación inducida por  $\psi$  coincide con las comparaciones pareadas.

Definición 3.- Un conjunto S con una relación binaria ( $\leq$ ), se dice que es un orden parcial si satisface las siguientes propiedades: a) Reflexiva: Para todo  $x \in S$ ,  $x \leq x$ . b) Transitiva: Para todo  $x, y, z \in S$ , si  $x \leq y$ , e  $y \leq z$  entonces,  $x \leq z$ . c) Antisimétrica: Para todo  $x, y \in S$ , si  $x \leq y$ , e  $y \leq x$ , entonces  $x = y$  (x e y coinciden).

Definición 4.- Para cualquier relación  $x \leq y$  (léase “y incluye a x”) se define  $x < y$  para representar  $x \leq y$  con  $x \neq y$ . Se dice que y domina (cubre) a x, si  $x < y$ , y si  $x < t < y$  no es posible para ningún t. Los conjuntos parcialmente ordenados con un número finito de elementos pueden ser representados convenientemente por un grafo orientado. Cada elemento del grafo se representa en un nodo, de forma que haya un arco dirigido desde y a x, si  $x < y$ .

Definición 5.- Un subconjunto E de un conjunto parcialmente ordenado S se dice que está acotado superiormente (inferiormente) si existe un elemento  $s \in S$  tal que  $x \leq s$  ( $\geq s$ ) para cada  $x \in E$ . El elemento s se denomina una cota superior (inferior) de E. Se dice que E tiene un supremo (ínfimo) si tiene cotas superiores (inferiores) y el conjunto de cotas superiores U (inferiores L) tiene un elemento  $u_1$  tal que  $u_1 \leq u$  para todo  $u \in U$  ( $l_1 \geq l$  para todo  $l \in L$ ).

Definición 6.- Sea H un conjunto parcialmente ordenado cuyo elemento mayor es b. H es una jerarquía si satisface las siguientes condiciones: (1) Existe una partición de H en conjuntos denominados niveles  $\{L_k, k=1,2,\dots,h\}$ , donde  $L_1=\{b\}$ . (2)  $x \in L_k$  implica que  $x^- \subseteq L_{k+1}$ , donde  $x^- = \{y \mid x \text{ cubre a } y\}$ ,  $k=1,2,\dots,h-1$ . (3)  $x \in L_k$  implica que  $x^+ \subseteq L_{k-1}$ , donde  $x^+ = \{y \mid y \text{ cubre a } x\}$ ,  $k=2,3,\dots, h$ .

Definición 7.- Dado un valor positivo real  $\rho \geq 1$ , un conjunto no vacío  $x^- \subseteq L_{k+1}$  se dice  $\rho$ - homogéneo con respecto a  $x \in L_k$  si para cada par de elementos  $y_1, y_2 \in x^-$ ,  $1/\rho \leq PC(y_1, y_2) \leq \rho$ . En particular, el axioma de reciprocidad implica que  $PC(y_i, y_i) = 1$ . Axioma 2.- (Homogeneidad) Dada una jerarquía H,  $x \in H$  y  $x \in L_k$ ,  $x^- \subseteq L_{k+1}$  es  $\rho$ - homogéneo para  $k=1,\dots, h-1$ . Dados  $L_k, L_{k+1} \subseteq H$ , denotaremos la escala local derivada para  $y \in x^-$  y  $x \in L_k$  por

$\psi^{k+1}(y/x)$ ,  $k=2,3,\dots, h-1$ . Sin pérdida de la generalidad se puede suponer que  $(y/x) = 1$ .  $\sum 1 = y \in x \psi^{k+1}$  Las columnas de la matriz  $\psi^k(L_k/L_{k-1})$  son escalas locales derivadas de los elementos en  $L_k$  con respecto a los elementos en  $L_{k-1}$ .

Definición 8.- Un conjunto  $A$  se dice dependiente externo, o exterior, de un conjunto  $C$  si se puede definir una escala fundamental en  $A$  con respecto a todo elemento  $C \in C$ . La dependencia exterior refleja la dependencia de los elementos de un nivel respecto del nodo del nivel superior del que cuelgan (dependencia de los elementos inferiores de la jerarquía respecto de los superiores).

Definición 9.- Sea  $A$  dependiente exterior de  $C$ . Los elementos de  $A$  se dice que son dependientes internos, o interiores, con respecto a  $C \in C$ , si para algún  $A \in A$ ,  $A$  es dependiente exterior de  $A$ . Axioma 3.- Sea  $H$  una jerarquía con niveles  $L_1, L_2, \dots, L_h$ . Para cada  $L_k$ ,  $k=1,2,\dots,h-1$ , (1)  $L_{k+1}$  es dependiente exterior/externo de  $L_k$ . (2)  $L_{k+1}$  es no dependiente interior/interno con respecto a todos los  $x \in L_k$ . (3)  $L_k$  es no dependiente exterior/externo de  $L_{k+1}$ . Principio de Composición Jerárquica.- Si se verifica el Axioma 3, la escala global derivada (ordenación) de cualquier elemento en  $H$  se obtiene de sus componentes en el correspondiente vector de los siguientes:  $\psi^1(b)=1$   $\psi^2(L_2)=\psi^2(b- /b)$  . . .  $\psi^k(L_k)=\psi^k(L_k/L_{k-1})$   $\psi^{k-1}(L_{k-1})$ ,  $k=3,\dots,h$ . Si se omite el Axioma 3, el Principio de Composición Jerárquica deja de verificarse debido a que la dependencia exterior e interior entre niveles o componentes que se necesitan no forman una jerarquía.

El principio de composición apropiado se deriva del enfoque supermatrix del cuál el Principio de Composición Jerárquica en un caso especial (Saaty, 1980). Una jerarquía es un caso especial de sistema o red, cuya definición viene dada por: Definición 10.- Sea  $G$  una familia de conjuntos no vacíos  $G_1, G_2, \dots, G_n$ , donde  $G_i$  consta de los elementos  $\{e_{ij}, j=1,\dots,m_i\}$ ,  $i=1,2,\dots,n$ .  $G$  es un sistema si: (i) Es un grafo orientado cuyos vértices son  $G_i$ , y cuyos arcos se definen a través del concepto de dependencia exterior; esto es (ii) Dadas dos componentes  $G_i$  y  $G_j \in G$  existe un arco desde  $G_i$  a  $G_j$  si  $G_j$  es dependiente exterior de  $G_i$ . Sea  $D_A \subseteq A$  el conjunto de los elementos de  $A$  dependientes externos de  $A \in A$ . Sea  $\psi_A, C(A_j), A_j \in A$ , la escala derivada de los elementos de  $A$  con respecto a  $A_i \in A$  para un criterio  $C \in C$ . Sea  $\psi_C(A_j), A_j \in A$ , la escala derivada de los elementos de  $A$  con respecto a un criterio  $C \in C$ . Se define el peso

dependiente (dependence weight)  $(\cdot)$   $(A)$   $(A)$ .  $A_j \succsim_i A_i \iff \sum_{j \in C} A_j = \psi_j(A)$  Si los elementos de  $A$  son dependientes internos con respecto a  $C \in \mathcal{C}$ , entonces  $\phi_C(A_j) \neq \psi_C(A_j)$  para algún  $A_j \in A$ .

Las expectativas son creencias acerca de la ordenación de las alternativas derivada del conocimiento a priori. Se supone que un decisor tiene una ordenación, intuitiva, de un conjunto finito de alternativas  $A$  con respecto al conocimiento a priori de los criterios  $C$ . El decisor puede tener expectativas acerca de la ordenación.

Axioma 4.- (Expectativas)  $C \subset H-L_h$ ,  $A = L_h$  Este axioma dice que cuando se toma una decisión, siempre se supone que la estructura jerárquica está completa. Esto es, que todas las alternativas y los criterios considerados relevantes para la resolución del problema están representadas en la jerarquía,. No se supone la racionalidad del proceso, ni tampoco que solamente se pueda acomodar a una interpretación racional. La gente tiene muchas expectativas que son irracionales.

A continuación se mencionan una serie de resultados que se desprenden de los axiomas anteriores, y cuya demostración puede verse, entre otros, en Saaty (1980) y Saaty (1994). Sea  $RC(n)$  el conjunto de todas las matrices  $(n \times n)$  consistentes ( $RC(n) \subset RM(n)$ ).

Teorema 1.- Sea  $A \in RM(n)$ ,  $A \in RC(n)$  si y sólo si  $\text{rango}(A)=1$ .

Teorema 2.- Sea  $A \in RM(n)$ ,  $A \in RC(n)$  si y sólo si su valor propio principal  $\lambda_{\max}$  es igual a  $n$ .

Teorema 3.- Sea  $A = (a_{ij}) \in RC(n)$ . Existe una función  $\psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$ , con  $\psi: RC(n) \rightarrow [0,1]^n$  tal que: (1)  $a_{ij} = \psi_i(A) / \psi_j(A)$ . (2) La dominación relativa de la  $i$ -ésima alternativa,  $\psi_i(A)$ , es la  $i$ -ésima componente del vector propio principal de  $A$ . Dadas dos alternativas  $A_i, A_j$  en  $A$ ,  $A_i \succsim_C A_j$  si y sólo si  $\psi_i(A) \geq \psi_j(A)$ .

Teorema 4.- Sea  $A \in RC(n)$ , y sean  $\lambda_1 = n$  y  $\lambda_2 = 0$  los valores propios de  $A$  con multiplicidades 1 y  $n-1$  respectivamente. Dado  $\epsilon > 0$ , existe  $\delta = \delta(\epsilon) > 0$  tal que si  $|a_{ij} + \tau_{ij} - a_{ij}| = |\tau_{ij}| \leq \delta$  para  $i, j = 1, 2, \dots, n$ , la matriz  $B = (a_{ij} + \tau_{ij})$  tiene exactamente 1 y  $(n-1)$  valores propios en los círculos  $|\mu - n| < \epsilon$  y  $|\mu - 0| < \epsilon$ , respectivamente.

Teorema 5.- Sea  $A \in RC(n)$  y sea  $w$  su vector propio principal por la derecha. Sea  $\Delta A = (\delta_{ij})$  una matriz de perturbaciones de los valores de  $A$  tal que  $A' = A + \Delta A \in RM(n)$ , y sea  $w'$  su vector propio principal por la derecha. Dado  $\varepsilon > 0$ , existe un  $\delta > 0$  tal que si  $|\delta_{ij}| \leq \delta$  para todo  $i$  y  $j$ , se cumple  $|w_i' - w_i| \leq \varepsilon$  para todo  $i=1,2,\dots, n$ .

Teorema 6.- (Estimación de razones). Sea  $A \in RM(n)$ , y sea  $w$  su vector propio principal por la derecha. Sean  $\varepsilon_{ij} = a_{ij}w_j/w_i$  para todo  $i$  y  $j$ , y sea  $1-\tau < 1+\tau$ ,  $\tau > 0$ , para todo  $i$  y  $j$ . Dados  $\varepsilon > 0$  y  $\tau < \varepsilon$ , existe un  $\delta > 0$  tal que para todo  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x_i > 0$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , si se verifica  $1 - \varepsilon_{ij} x_i x_j < 1 + \varepsilon_{ij} x_i x_j - \delta$  entonces  $1 - \varepsilon_{ij} x_i x_j < 1 + \varepsilon_{ij} x_i x_j - \varepsilon$ .

Teorema 7.- Sea  $A = (a_{ij}) \in RM(n)$ . Sea  $\lambda_{\max}$  su valor propio principal y sea  $w$  su correspondiente vector propio por la derecha con,  $w = \sum_{i=1}^n w_i e_i$  entonces  $\lambda_{\max} \geq n$ .

Teorema 8.- Sea  $A \in RM(n)$ . Sea  $\lambda_{\max}$  el valor propio principal de  $A$ , y sea  $w$  su correspondiente vector propio por la derecha con,  $w = \sum_{i=1}^n w_i e_i$  y la expresión  $\mu \equiv (\lambda_{\max} - n)/(n-1)$  es una medida de la distancia media a la consistencia. Definición 11.- La intensidad de los juicios asociados con un camino que va desde  $i$  a  $j$ , denominado intensidad del camino es igual al producto de las intensidades asociadas con los arcos de ese camino. Definición 12.- Un ciclo es un camino de comparaciones pareadas que termina en su punto de partida.

Teorema 9.- Si  $A \in RC(n)$ , las intensidades de todos los ciclos son iguales a  $a_{ii}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Teorema 10.- Si  $A \in RC(n)$ , las intensidades de todos los caminos que van desde  $i$  a  $j$  son iguales a  $a_{ij}$ . Corolario 1.- Si  $A \in RC(n)$ , el valor de la posición  $(i,j)$  puede representarse como la intensidad de los caminos de cualquier longitud que comienzan en  $i$  y terminan en  $j$ . Corolario 2.- Si  $A \in RC(n)$ , el valor de la posición  $(i,j)$  es la intensidad media de los caminos de longitud  $k$  que van de  $i$  a  $j$ , y  $A_k = n^{k-1}A$  ( $k \geq 1$ ).

Teorema 11.- Si  $A \in RC(n)$ , el valor de la posición  $(i, j)$  viene dado por la media de todas las intensidades de los caminos que comienzan en  $i$  y terminan en  $j$ .

Teorema 12.- Si  $A \in RC(n)$ , la escala de dominación relativa viene dada por cualquiera de sus columnas normalizadas, y coincide con el vector propio principal por la derecha de  $A$ .  
 Corolario 3.- El vector propio principal es único salvo por una constante multiplicativa.

Teorema 13.- Si  $A \in RM(n)$ , la intensidad de todos los caminos de longitud  $k$  que van de  $i$  a  $j$  viene dada por:  $a_{ij} = \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \dots \sum_{i_{k-1}=1}^n a_{ii_1} a_{i_1 i_2} \dots a_{i_{k-1} j}$ .

Teorema 14.- Sea  $A \in RM(n)$ ,  $A \notin RC(n)$ . El vector propio principal por la derecha de  $A$  viene dado por el límite de la intensidad normalizada de los caminos de longitud  $k$ ,  $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{a_{ij}^{(k)}}{\sum_{h=1,2,\dots,n} a_{ih}^{(k)}} = \frac{a_{ij}}{\sum_{h=1,2,\dots,n} a_{ih}}$ , para todo  $i, j = 1, 2, \dots, n$ .  
 Corolario 4.- Sea  $A \in RM(n)$ ,  $A \notin RC(n)$ . El vector propio principal por la derecha de  $A$  es único salvo por una constante multiplicativa.  
 Teorema 15.- Sea  $A$  un conjunto finito de  $n$  elementos  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , y sea  $C \in C$  un criterio que todos los elementos de  $A$  tienen en común. Sea  $A$  la matriz de comparaciones pareadas resultante. La  $i$ -ésima componente del vector propio principal a derecha de la matriz de comparaciones pareadas recíproca  $A$ , proporciona la dominación relativa de  $A_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ .