

Evaluación multicriterio en el transporte sustentable para una ciudad fronteriza México-USA¹

Multicriteria evaluation on sustainable transport for México -USA border town

Francisco Javier Peralta Castillo, Arturo Ranfla González

peraltaf@uabc.edu.mx aranfla@uabc.edu.mx

Universidad Autónoma de Baja California, México

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar los principios de sustentabilidad en el transporte de una ciudad fronteriza de México con los Estados Unidos: Mexicali, Baja California, a través, de la evaluación multicriterio, en particular el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), por sus siglas en inglés. 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. Estos costos o externalidades, no son internalizados en la red, por lo tanto, los usuarios no son conscientes de los costes externos marginales de sus actividades y este factor no está en sus patrones de consumo. 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.

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

Abstract

The present study aimed to evaluate the principles of sustainability in the transport of a border town in Mexico with the United States: Mexicali, Baja California, though, the multicriteria evaluation, particularly the Analytic Hierarchy Process (AHP). Transport provides multiple benefits in the form of goods, access to services, mobility of people and goods; however, also causes a number of environmental, economic and social costs. These costs or externalities are not internalized in the network, therefore users are unaware of the marginal external costs of their activities and this factor is not in their consumption patterns. Externalities associated with transportation, including among other things, emissions of air pollution, greenhouse gases, accidents, noise and congestion.

Keywords: sustainable transport, multi-criteria analysis, analytic hierarchy process (AHP)

¹ Este documento es producto de la tesis de investigación doctoral en Planeación y Desarrollo Sustentable por la Universidad Autónoma de Baja California, México.

Introducción

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 y flujos entre los individuos, territorio, mercancías y los recursos naturales.

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 (CO₂) 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 CO₂ procedentes del transporte han crecido un 45 % entre 1990 y 2007. (OCDE, 2010,p.5)

La ciudad de Mexicali Baja California, México, presenta dificultades en su sistema de transporte; desde movilidad, accesibilidad, eficiencia, que implican costos privados y sociales. Este estudio propone establecer la evaluación del transporte como un sistema abierto, a través de la metodología multicriterio, mediante el cual se puedan proponer estrategias que permitan integrar los principios de sustentabilidad en sus políticas, a partir del método científico.

Las preguntas que sustentan esta investigación son: ¿Cómo determina el ser una ciudad fronteriza con el estado de California, al transporte? ¿Qué estrategias deben de implementarse para integrar los principios de sustentabilidad en el sistema de transporte? El artículo está estructurado primeramente caracterizando el sistema de transporte en la ciudad, después se aborda el marco teórico aplicando la metodología multicriterio, en particular el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), para posteriormente discutir los resultados y finalizar con las conclusiones.

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 realizado en 2010, la población total del municipio de Mexicali es de 936,826 habitantes.

En Mexicali existe un alto número de parque vehicular. El estimado es de 410 000 vehículos registrados (2009) (sin contar los americanos e irregulares). Existe baja demanda de transporte público de 269 519 viajes por persona al día en transporte público en 1998, decreció a 196 558 en 2007 (USTRAN, 2007, p.9).

El transporte público 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. Se presenta baja densidad, las manchas urbanas crecientes de forma horizontal en la periferia de la ciudad provocan congestión y distancias cada vez mayores, con un alto costo en tiempo y dinero independientemente de si realizan los trayectos en automóvil o en transporte público.

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).

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 la tercera más contaminada del mundo en PM_{10} con 138 microgramos por metro cubico (*The Economist*, 2013). No existe infraestructura no motorizada. (No existen ciclo vías, andadores en la zona urbana).

Transporte sustentable y gases de efecto invernadero

El aumento de la población, por ende el incremento de los viajes y una mayor disponibilidad de vehículos personales ha llevado al rápido aumento en el uso de los automóviles como medio de transporte personal. Esto ha correspondido en mayor infraestructura, lo cual ha afectado las condiciones ambientales; suelo, cambios y degradaciones en el aire y la calidad del agua.

Los gases como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) se consideran, son resultados directos en los GEI, a través de la combustión de combustibles

fósiles (CO₂), en el uso de la tierra y actividades agrícolas (CO₂, CH₄ y N₂O) y actividades industriales (HFC, PFC y SF₆), (Bohorquez y Lugo, 2011, p.7). Sumado a esto habría que añadir que diversos autores incluyen al, monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NOX) y compuestos distintos de los metanos orgánicos volátiles (COVNM), como causantes indirectos a los GEI.

El transporte sustentable ha sido definido de varias maneras, una de las más citadas y reconocidas es, la del informe de la comisión Brundtland:...“satisfacer las necesidades del transporte actual y las necesidades de movilidad, sin comprometer la capacidad de las generaciones del futuro para satisfacer estas necesidades” (Organización de las Naciones Unidas, 1987, p. 21). El Consejo de la Unión Europea 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), 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 N° 1. Objetivos del transporte sustentable



Fuente: Litman (2012) Victoria Transport Policy Institute.

La importancia de la evaluación de la sostenibilidad 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, y medida que la población crece, también lo hará la demanda de transporte, así la sostenibilidad de los sistemas de transporte pueden contribuir en gran medida al desarrollo sostenible (Ramani, 2008, p.31).

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.

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.

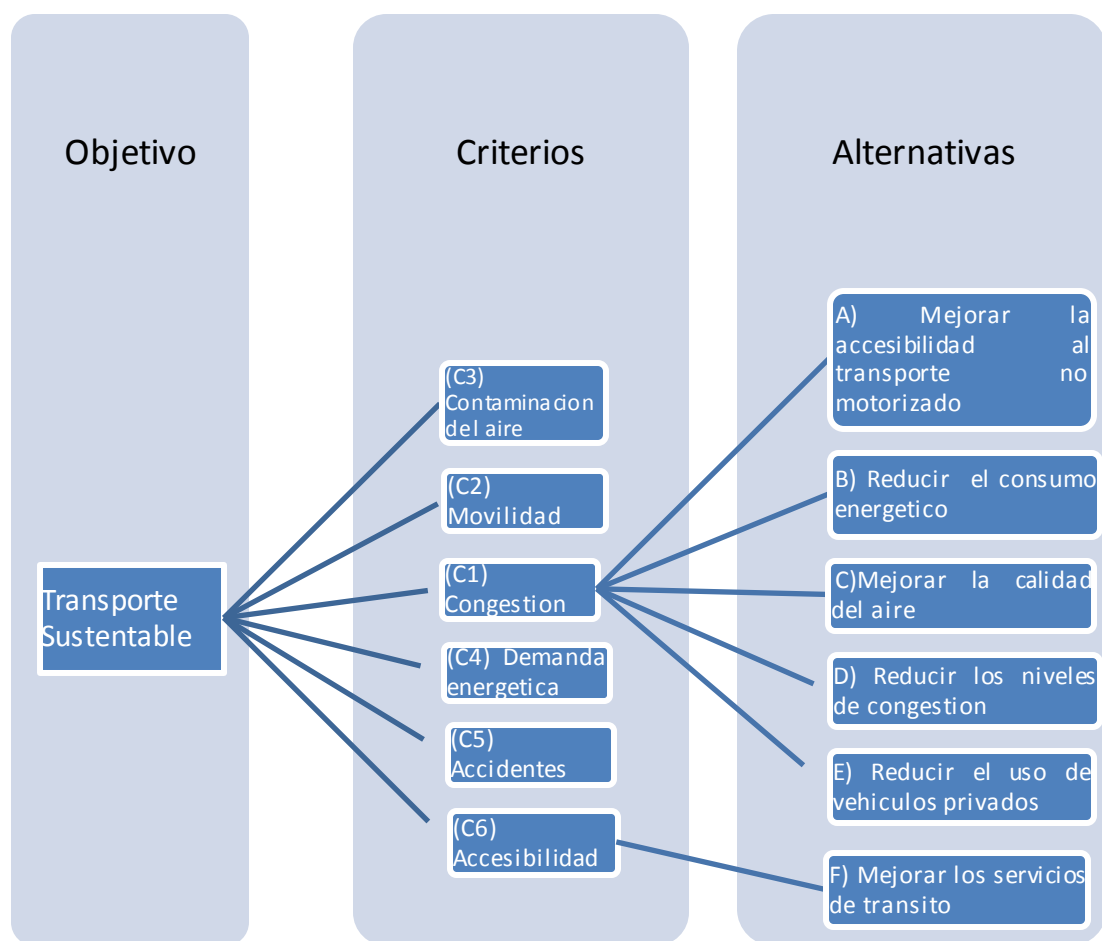
La importación de autos usados de EEUU y Canadá podría representar hasta la mitad del incremento en el parque vehicular nacional desde el 2000 (Instituto Mexicano del Transporte, 2011).

Metodología

El proceso analítico jerárquico (AHP) es una metodología de análisis multicriterio desarrollada a fines de la década del setenta por el doctor en matemáticas Thomas L. Saaty. Es un método de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estos componentes o variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y, finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad.

A continuación se describe la metodología que se propone 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 Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos (2008) del Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES).

Figura N° 2. Árbol de jerarquías. Principio de la construcción de jerarquías



Fuente: Elaboración propia

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, y refleja 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.

Figura N° 3. Escala de comparaciones pareadas

Intensidad		Explicación
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)

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.

Método de asignación directa. Aquel en el que 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, por ejemplo consiste en pedir al decisor que dé una valoración de cada peso en una cierta escala.

Figura N° 4. Comparaciones pareadas de criterios con respecto al objetivo

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	Σ
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

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

$$A \cdot w = \lambda \cdot w$$

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.

λ = Máximo valor propio que representa una medida de la consistencia de los juicios.

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

De esta forma se ha establecido 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 construirán las matrices de comparación de las alternativas en función de cada criterio.

Figura N° 5. 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	Σ
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

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

Figura N° 6. 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	Σ
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

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

Figura N° 7. Matriz de comparación de las alternativas en función de la contaminación

Criterio 3 (Contaminación del aire)	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D	Alternativa E	Alternativa F	Σ
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

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

Figura N° 8. 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	Σ
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

$$\left[\begin{array}{cccccc} 1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.33 & 0.25 \\ 4 & 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ 2 & 0.33 & 1 & 0.2 & 4 & 6 \\ 5 & 0.2 & 5 & 1 & 0.5 & 0.14 \\ 3 & 0.2 & 0.25 & 2 & 1 & 7 \\ 4 & 0.14 & 0.16 & 7 & 0.14 & 1 \end{array} \right] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} A= 0.03 \\ B= 0.32 \\ C= 0.17 \\ D= 0.15 \\ E= 0.17 \\ F= 0.16 \end{array} \right]$$

Figura N° 9. 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	Σ
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

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

Figura N° 10. 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	Σ
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

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

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.

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

Principio de consistencia lógica

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

$$\lambda_{Max} = V * B$$

Dónde:

λ_{Max} : es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares. V: es el vector de prioridades o vectores propios, que ya obtuvimos, 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 mx1, donde m es el número de columnas de la matriz de comparaciones.

$$(8 \ 7.33 \ 4.33 \ 8 \ 6.5 \ 7) \begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.16 \\ 0.24 \\ 0.16 \\ 0.17 \\ 0.17 \end{bmatrix}$$

Con este resultado se puede calcular el índice de consistencia:

$$CI = \lambda_{Max} - n / (n - 1) = 6.587 - 6 / 5 = 0.11$$

Para finalmente obtener 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:

Figura N° 11. 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:

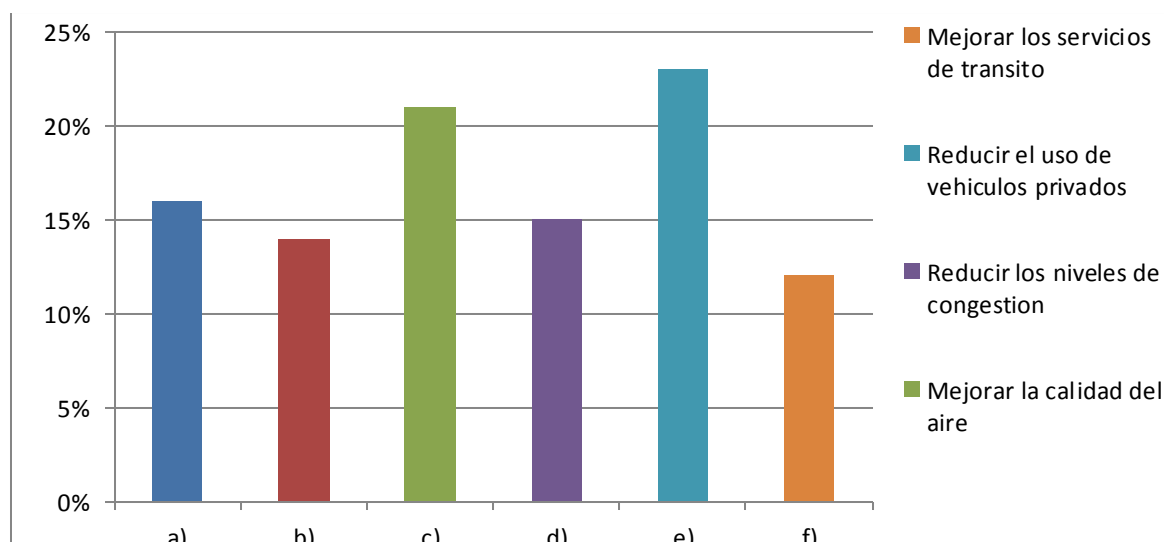
$$RC = CI/RI = 0.11/1.24 = 0.09$$

- 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 (que es el supuesto in situ).
- En caso de que $RC > 0,10$, la inconsistencia es inadmisibles y se aconseja revisar los juicios.

Resultados y discusión

De acuerdo al Proceso analítico jerárquico (AHP), implementado como parte de la propuesta de evaluación multicriterio para el sistema de transporte en la ciudad, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura N° 12. Porcentajes de las alternativas



Fuente: Elaboración propia

a) Mejorar la accesibilidad al transporte no motorizado	16%
b) Reducir el consumo energético	14%
c) Mejorar la calidad del aire	21%
d) Reducir los niveles de congestión	15%
e) Reducir el uso de vehículos privados	23%
f) Mejorar los servicios de tránsito	12%

Siendo la alternativa (e) reducir el uso de vehículos privados la que obtiene mayor porcentaje como estrategia que contribuye hacia una mejora en el sistema de transporte de la ciudad, de acuerdo a los principios de sustentabilidad evaluados, esto implica que el establecimiento de la opción mejor posicionada no excluiría a las otras, instrumentándolas de forma transversal derivando en subestrategias o, creando escenarios que posibiliten la consecución del objetivo.

El transporte sustentable en diferentes partes del mundo, representa un esquema que los gobiernos, así como entidades privadas están implementando, la aplicación de este tipo de transporte en ciudades como, Mexicali, representa un desafío importante ya que no cuenta con algunas condiciones mínimas para la revisión, el diseño y ejecución de ciertas estrategias; como la reducción de vehículos privados al no encontrarse con incentivos para migrar a un transporte público eficaz.

El reducir el uso de vehículos privados como prioridad es un aspecto controvertible y quizás costoso para la autoridad ya que existe dependencia en muchos casos desde ingresos fiscales, ingresos de la industria automotriz, etc. Medidas impositivas o el establecimiento de políticas que puedan instrumentarse de una forma más eficiente, implicara que cambie el paradigma de acuerdo a los actores del propio sistema.

En este caso, la metodología multicriterio al instrumentarse en varios países del mundo (Croacia, Taiwán, Rusia) como una estrategia alterna a los procesos de evaluación tradicional, representa poder medir el impacto del transporte en los GEI con una visión global, transversal y de manera asertiva.

La situación geográfica de la ciudad al ser vecino del estado de California hace que se pueda acceder de forma más económica a un vehículo, aun y cuando, este sea de segunda o tercera mano. La cuestión climatológica se suma a estos factores ya que se cuentan con temperaturas extremas (clima árido, seco) que desincentivan la utilización de formas alternas para la movilidad, sin embargo el adecuar algunas estrategias de las que se señalan en este

estudio podrían afectar positivamente el sistema de transporte, contribuyendo a la búsqueda de un transporte más sustentable.

Conclusiones

A partir del resultado provisto del proceso analítico jerárquico (AHP) se establecen las siguientes propuestas:

1. Incrementar los costos asociados a dar de alta o revalidar el uso de vehículos particulares, desincentivándolo, a través de impuestos progresivos.
2. El Sistema Municipal del Transporte debe de robustecer sus funciones de planeación, operación y control para un adecuado funcionamiento del transporte, público, privado y de carga.
3. Creación de infraestructura no motorizada (ciclovías, andadores) que permitan migrar del vehículo motor, por esquemas menos contaminantes.
4. 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.
5. 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.
6. Crear rutas alimentadoras que permitan acceder de una manera más ágil a la red de transporte.
7. Establecer incentivos para la adopción de esquemas en la eficiencia de los viajes privados. (carpool, subsidios a bicicletas, etc).
8. Regular el transporte de carga, diseñando rutas para su funcionamiento.
9. Optimización del sistema de tráfico (semáforos, avenidas que permitan mayor velocidad/km).
10. Ejecución y adecuación de carriles confinados para transporte público BRT (Bus Rapid Transport)
11. Pavimentación de zonas periféricas que producen contaminantes por el polvo (pm2.5. pm 2.10).
12. Priorizar al transporte dentro de la planeación de nuevas zonas residenciales, fraccionamientos, zonas comerciales, para facilitar la accesibilidad.
13. Crear zonas acceso restringido al transporte público y no motorizado (centro histórico, cívico).

Estas medidas como resultado del análisis y prioridades del AHP no son medidas excluyentes y totalitarias, es decir, pueden ser inclusivas, transversales y ampliadas desde la necesidad de mejorar la eficiencia del sistema, contribuyendo así a la sostenibilidad de nuestro medio ambiente.

Referencias bibliográficas

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 neighbourhoods sustainable mobility*, Politecnico di Milano, pp. 1-26.

Bohorquez Angela, Lugo Diana (2010), *cuantificación y análisis de gases de efecto invernadero (gei) en el ciclo de vida del etanol obtenido de la caña de azucar, con base enLas directrices del ipcc 2006. Caso de estudio: ingenio providencia S.A.* pp. 3-9.Bogota

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.

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

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

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

Mihyeon, C. (2007). *Incorporating Sustainability Into Transportation Planning And Decision Making: Definitions, Performance Measures, And Evaluation*. Georgia Institute of Technology.

Ramini, Tara (2008), *An Improved methodology for multicriteria assesment of highway sustainibility*, thesis of master on civil engineering, pp.30-35. 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.

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

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

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.

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

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

Estados Unidos. United Nations World. Our Common Future. World Comission on Environment and Development. 1987. New York.

Francia. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE, Reducing Transport Greenhouse Gas Emissions: Trends & Data 2010. Paris.

México. Servicios Profesionales de Consultoría Especializada. USTRAN. Reporte de diagnóstico final. 2007. Mexicali.

México. Centro Mario Molina, Movilidad Sustentable. 2007. Ciudad de Mexico.