

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**El tiempo, la cohesión territorial, la energía y los GEI, en la  
evaluación económica para líneas ferroviarias de alta velocidad**

**TESIS**

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad**

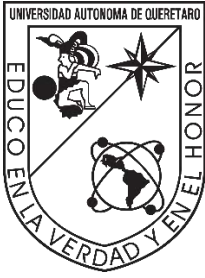
**Presenta**

**José Antonio Guerrero Fernández**

**Dirigido por**

**Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca**

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (mes y año)  
México



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**El tiempo, la cohesión territorial, la energía y los GEI, en la  
evaluación económica para líneas ferroviarias de alta velocidad**

**TESIS**

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad**

**Presenta**

**José Antonio Guerrero Fernández**

**Dirigido por**

**Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca**

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Presidente

Dr. Enrique Leonardo Kato Vidal

Secretario

Dr. Roberto de la Llata Gómez

Vocal

Dr. Guillermo Torres Vargas

Suplente

Dra. Maria de la Luz Pérez Rea

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (mes y año)

México

## **Resumen**

Evaluar la factibilidad de las líneas ferroviarias de alta velocidad requiere conocer la cantidad de usuarios que estas atenderán, y a partir de este dato obtener los beneficios económicos adicionales que la nueva infraestructura otorga al corredor de transporte en estudio. En la presente investigación se robusteció este criterio al ahondar en los aspectos para el valor del tiempo de los usuarios, la cohesión territorial, el consumo energético y la emisión de gases efecto invernadero, obtenidos al implementar este servicio en determinada región. Se analizó un caso de estudio que contempló la inclusión, a la oferta de transporte existente, de una hipotética red ferroviaria de alta velocidad transversal que enlace a Guadalajara con la Ciudad de México, y a esta última con el puerto de Veracruz, al pasar por localidades intermedias importantes. Los resultados arrojaron que es viable considerar un trazado de alta velocidad siguiendo las rutas carreteras y de trenes convencionales previamente establecidas, pero que, para definir la factibilidad, deben considerarse más parámetros que enriquezcan la apreciación. Se evaluaron los viajes de corto y largo itinerario en los corredores mencionados: en el primer tipo de desplazamientos, se encontraron resultados desfavorables para el consumo de tiempo de los usuarios y para la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, la cohesión territorial se ve incrementada prósperamente y los ahorros en el consumo energético fueron importantes. En el segundo tipo de desplazamientos, las emisiones de gases efecto invernadero se incrementaron, mientras que los ahorros en el tiempo de los usuarios y en el consumo de energía fueron positivos.

*Palabras clave* - Alta velocidad ferroviaria; factibilidad económica; impactos económicos.

## Summary

Evaluating the feasibility of high-speed rail lines requires knowing the number of users that they will serve, and from this data obtain the additional economic benefits that the new infrastructure provides to the transport corridor under study. In this research, this criterion was strengthened by delving into the aspects for the value of users' time, territorial cohesion, energy consumption and the emission of greenhouse gases, obtained when implementing this service in a certain region. A case study was analyzed that contemplated the inclusion, to the existing transport offer, of a hypothetical cross-sectional high-speed rail network that links Guadalajara with Mexico City, and the latter with the port of Veracruz, passing through important intermediate locations. The results showed that it is feasible to consider a high-speed route following the previously established conventional road and train routes, but that, to define the feasibility, more parameters that enrich the appreciation must be considered. Short and long itinerary trips were evaluated in the aforementioned corridors: in the first type of trips, unfavorable results were found for users' time consumption and for the emission of greenhouse gases, however, territorial cohesion has grown prosperously and the savings in energy consumption were important. In the second type of travel, greenhouse gas emissions increased, while savings in user time and energy consumption were positive.

*Keywords* - High speed rail; economic feasibility; economic impacts.

## **Agradecimientos**

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>i</b>
<b>Summary .....</b>	<b>ii</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>iii</b>
<b>Contenido .....</b>	<b>iv</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Justificación.....	6
1.3. Descripción del problema.....	7
1.4. Hipótesis.....	8
1.5. Objetivo.....	8
<b>2. Marco teórico. ....</b>	<b>9</b>
2.1. Los costos.....	9
2.1.1. La inversión en la construcción.....	9
2.1.2. Material rodante, mantenimiento y operación.....	12
2.2. Recuperación de la inversión.....	14
2.2.1. Estimación de la cantidad de usuarios.....	15
2.3. Otro enfoque para la recuperación de la inversión.....	20
2.3.1. Externalidades negativas que pueden minimizarse.....	22
2.3.2. Externalidades positivas que pueden maximizarse.....	23
<b>3. Metodología.....</b>	<b>28</b>
3.1. El año de estudio y la homologación de la información.....	31
3.2. Determinación de corredores aptos.....	31
3.3. Determinación de los tiempos de viaje.....	35
3.4. La demanda en los corredores de transporte.....	36
3.4.1. Los aforos vehiculares.....	38
3.4.2. La cantidad de usuarios.....	39

3.5.	El valor del tiempo de los usuarios .....	41
3.6.	La productividad y la cohesión territorial .....	44
3.6.1.	Obtención de la población en cada nodo .....	44
3.6.2.	La accesibilidad potencial y los índices de accesibilidad .....	45
3.6.3.	Datos económicos y la adaptación del modelo .....	48
3.6.4.	Análisis de regresión para el modelo .....	51
3.6.5.	La productividad predicha y la cohesión territorial .....	53
3.7.	El consumo energético. ....	53
3.8.	Las emisiones de GEI.....	56
3.9.	La valoración del consumo energético y las emisiones de GEI .....	58
<b>4.</b>	<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>59</b>
4.1.	Determinación de corredores aptos.....	61
4.2.	Determinación de los tiempos de viaje .....	65
4.3.	Determinación de la demanda .....	73
4.3.1.	Los aforos vehiculares.....	73
4.3.2.	La Cantidad de usuarios .....	77
4.4.	El valor del tiempo de los usuarios .....	93
4.5.	La productividad y la cohesión territorial .....	102
4.5.1.	Obtención de la población en cada nodo .....	102
4.5.2.	La accesibilidad potencial y los índices de accesibilidad .....	103
4.5.3.	Datos económicos y la adaptación del modelo .....	115
4.5.4.	Análisis de regresión para el modelo .....	118
4.5.5.	La productividad predicha y la cohesión territorial .....	123
4.6.	El consumo energético .....	126
4.6.1.	Viajes de corto itinerario .....	127
4.6.2.	Viajes directos.....	135
4.7.	Las emisiones de GEI.....	144
4.7.1.	Viajes de corto itinerario .....	144
4.7.2.	Viajes directos.....	150
4.8.	La valoración del consumo energético y las emisiones de GEI .....	156

<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>159</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>162</b>



## Índice de Tablas

Tabla 1: Características geométricas de la vía.....	10
Tabla 2: Costo promedio para la construcción de las LAV .....	12
Tabla 3: Costos promedio por operación de las LAV.....	13
Tabla 4: Reparto modal, corredor Madrid - Barcelona.....	18
Tabla 5: Modos utilizados (%), corredor Madrid - Barcelona .....	18
Tabla 6: Ahorros de tiempo por pasajero en tren en el Reino Unido.....	24
Tabla 7: Costos totales por componente y modo de transporte. ....	27
Tabla 8: Consumo de combustible (Kg) y distancias de vuelo (Km) .....	55
Tabla 9: Factores de emisión (Kg/TJ) para los GEI por generar electricidad .....	57
Tabla 10: Aforos vehiculares, viajes de corto itinerario, año 2013. ....	75
Tabla 11: Aforos vehiculares, viajes directos, año 2013.....	77
Tabla 12: Usuarios, corto itinerario, escenario actual, año 2013.....	79
Tabla 13: Composición de usuarios del TAV, corto itinerario, año 2013. ....	83
Tabla 14: TAV para prestar servicio en corto itinerario, año 2013. ....	84
Tabla 15: Usuarios, corto itinerario, escenario hipotético, año 2013. ....	85
Tabla 16: Usuarios, viajes directos, escenario actual, año 2013. ....	88
Tabla 17: Composición de usuarios del TAV, viajes directos, año 2013. ....	90
Tabla 18: TAV para prestar servicio en viajes directos, año 2013.....	91
Tabla 19: Usuarios, viajes directos, escenario hipotético, año 2013. ....	91
Tabla 20: Valores del tiempo, año 2013, pesos mexicanos por hora.....	94
Tabla 21: Motivo del viaje en los pares origen-destino analizados. ....	94
Tabla 22: Costo del tiempo (millones MXN), corto itinerario, año 2013.....	98
Tabla 23: Costo del tiempo (millones MXN), itinerario completo, año 2013. ....	101
Tabla 24: Cantidad de habitantes (miles), y tasa de crecimiento. ....	102
Tabla 25: Cantidad de habitantes (miles), años de censo económico.....	103
Tabla 26: Accesibilidad potencial, corto itinerario, GDL-CDMX, en sus dos opciones.....	105
Tabla 27: Accesibilidad potencial, corto itinerario, CDMX-VER. ....	106
Tabla 28: Accesibilidad potencial, itinerario completo. ....	107

Tabla 29: Índice de accesibilidad ponderado, escenario actual.....	112
Tabla 30: Índice de accesibilidad ponderado, escenario hipotético.....	114
Tabla 31: Sectores de actividad económica comunes en los arcos estudiados.....	116
Tabla 32: Características económicas involucradas .....	117
Tabla 33: Análisis de regresión para la totalidad de la red .....	119
Tabla 34: Análisis de regresión para las líneas independientes.....	122
Tabla 35: Productividad predicha y variación en la cohesión territorial para toda la red.....	124
Tabla 36: Productividad predicha y variación en cohesión territorial; líneas individuales ..	125
Tabla 37: Incremento de productividad predicha (miles MXN), año 2013 .....	126
Tabla 38: Energía consumida. Corto itinerario, escenario actual. Año 2013.....	128
Tabla 39: Intensidad del combustible para cada tipo vehicular (lt/km).....	129
Tabla 40: Energía consumida. Corto itinerario, escenario hipotético. Año 2013.....	131
Tabla 41: Energía consumida. Viajes directos, escenario actual. Año 2013.....	137
Tabla 42: Combustible consumido por aerolínea, escenario actual. Año 2013. ....	138
Tabla 43: Energía consumida. Viajes directos, escenario hipotético. Año 2013. ....	140
Tabla 44: Combustible consumido por aerolínea, escenario hipotético. Año 2013. ....	142
Tabla 45: GEI emitidos (Ton), viajes de corto itinerario, modo carretero. Escenario actual, año 2013.....	145
Tabla 46: GEI emitidos (Ton), viajes de corto itinerario, modo carretero. Escenario hipotético, año 2013. ....	146
Tabla 47: Desagregación de la energía consumida (TJ) por el TAV, viajes de corto itinerario, año 2013. ....	147
Tabla 48: GEI emitidos (Ton), corto itinerario en TAV. Escenario hipotético, año 2013....	148
Tabla 49: GEI emitidos (Ton), viajes directos en el modo carretero. Escenario actual, año 2013. ....	151
Tabla 50: GEI emitidos (Ton), viajes directos en el modo aéreo. Escenario actual, año 2013. ....	151
Tabla 51: GEI emitidos (Ton), viajes directos, modo carretero. Escenario hipotético, año 2013. ....	152

Tabla 52: GEI emitidos (Ton), viajes directos, modo aéreo. Escenario hipotético, año 2013. .....	152
Tabla 53: Desagregación de la energía consumida (TJ) por el TAV. Viajes directos, año 2013. .....	153
Tabla 54: GEI emitidos (Ton), viajes directos en TAV. Escenario hipotético, año 2013. ...	154
Tabla 55: Costos por consumos y emisiones, millones de pesos, corto itinerario.....	157
Tabla 56: Costos por consumos y emisiones, millones de pesos, en viajes directos.....	157

## Índice de Figuras

Figura 1: Tráfico y PIB per cápita en la EU-27 (1995-2009).....	21
Figura 2: Costos externos totales de diversos medios de transporte.....	25
Figura 3: Tiempo de viaje puerta a puerta.....	32
Figura 4: Distancia ortodrómica .....	33
Figura 5: Modelo matriz de accesibilidad potencial .....	46
Figura 6: Ruta Guadalajara – Ciudad de México, por La Piedad. ....	62
Figura 7: Ruta Guadalajara – Ciudad de México, por León .....	62
Figura 8: Ruta Ciudad de México – Veracruz.....	63
Figura 9: Líneas de alta velocidad propuestas.....	64
Figura 10: Velocidad promedio ruta Guadalajara – Ciudad de México, por La Piedad.....	65
Figura 11: Velocidad promedio ruta, Guadalajara – Ciudad de México, por León. ....	66
Figura 12: Velocidad promedio ruta, Ciudad de México – Veracruz.....	66
Figura 13: Matrices de impedancia, corto itinerario .....	67
Figura 14: Matrices de impedancia, itinerario completo .....	68
Figura 15: Matrices de impedancia, corto itinerario, más tiempo de terminales.....	71
Figura 16: Matrices de impedancia, itinerario completo, más tiempo de terminales. ....	72
Figura 17: Viajeros (millones), corto itinerario, escenario actual. ....	81
Figura 18: Viajeros (millones), corto itinerario, escenario hipotético. ....	86
Figura 19: Viajeros (millones), itinerario completo, escenario actual. ....	89
Figura 20: Viajeros (millones), itinerario completo, escenario hipotético.....	92
Figura 21: Costo del tiempo (millones MXN). Corto itinerario, escenario actual, año 2013.	96
Figura 22: Costo del tiempo (millones MXN). Corto itinerario, escenario hipotético, año 2013. .....	97
Figura 23: Costo del tiempo (millones MXN). Largo itinerario, escenario existente, año 2013. .....	99
Figura 24: Costo del tiempo (millones MXN). Largo itinerario, escenario propuesto, año 2013. .....	100
Figura 25: Matriz de accesibilidad potencial GDL-LEON, en automóvil, año 2013.....	103

Figura 26: Matriz de accesibilidad potencial GDL-CDMX, por León, en automóvil, año 2013. .....	104
Figura 27: Índices de accesibilidad, ruta GDL-CDMX, por La Piedad.....	108
Figura 28: Índices de accesibilidad, ruta GDL-CDMX, por León .....	109
Figura 29: Índices de accesibilidad, ruta CDMX-VER .....	110
Figura 30: Consumo de energía, corto itinerario, año 2013 .....	134
Figura 31: Consumo de energía, viajes directos, año 2013.....	143
Figura 32: Emisión de GEI, viajes de corto itinerario, año 2013 .....	149
Figura 33: Emisión de GEI, viajes directos, año 2013.....	155

## **1. Introducción**

En esta investigación se analiza la inclusión de una hipotética red ferroviaria de alta velocidad transversal que enlaza a Guadalajara con la Ciudad de México y a esta última con el Puerto de Veracruz, que pasa por localidades intermedias importantes. La evaluación se realiza desde el punto de vista económico, se adoptan criterios previamente establecidos por autores que justifican estas inversiones en base a la demanda de usuarios, y se enriquecen con las opiniones de otros investigadores donde se incluyen los aspectos ambientales y de cohesión territorial. Para tal efecto, en este estudio se ahondó en el valor del tiempo que los usuarios consumen en los corredores de transporte, la accesibilidad hacia estos, la productividad en las regiones enlazadas, el consumo de energía y sus correspondientes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El presente capítulo parte de algunas definiciones fundamentales y se hace mención a algunos estudios previos que otros autores han realizado para analizar la factibilidad de las líneas ferroviarias de alta velocidad (LAV) y los rubros que en ellos se considera este tipo de evaluaciones deben incluir. A continuación, se hace una exposición detallada de las razones que validan la realización de este estudio, para llegar a la propia descripción del problema, donde se explica de manera objetiva la realidad actual sobre la cuestión que se investiga, para finalizar con la hipótesis y el objetivo del trabajo; la primera se lleva como guía específica del tema en análisis, y el segundo indica lo que se espera obtener al finalizar la disertación.

El segundo capítulo se enfoca en el marco teórico del argumento en cuestión. Representa los primeros pasos que se efectuaron durante la investigación, y expone, en base a publicaciones hechas por otros estudiosos de la cuestión, la experiencia en países donde ya se han implementado los trenes de alta velocidad (TAV), en cuanto a los costos por construcción de la infraestructura, equipamiento y operación, así como los mecanismos de los que han echado mano para demostrar la correcta recuperación de la inversión realizada, como un enfoque

tradicional. En esta última acción es donde el presente trabajo aprovecha los puntos de vista de otros autores, con enfoques innovadores, para evaluar si la inversión en las LAV es recuperable a partir de estos.

En el tercer capítulo se presenta el conjunto racional y coherente de los procedimientos y técnicas que se aplicaron de manera sistemática y ordenada durante la realización de esta tesis. Se parte con el establecimiento del año en el cual se homologaron los datos utilizados en las operaciones, y con la definición de los corredores de transporte mexicanos que se adoptaron como casos específicos de estudio. A partir de aquí, se establecen dos escenarios: el actual o existente, que incluye los medios y modos de transporte realmente ofertados; y el hipotético o propuesto, en el cual se agregó a la LAV que compite contra los primeros. Se explica como determinar los tiempos de viaje en cada uno de los modos de transporte, así como la cantidad de usuarios en estos, inclusive los que utilizan el hipotético TAV. A continuación, se explica la manera en la cual se estima la productividad y cohesión territorial entre los nodos que son enlazados por el escenario hipotético de transporte y, finalmente se evalúan los aspectos del consumo energético y su consecuente emisión de GEI, tanto para los corredores existentes como para los hipotéticos.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología descrita anteriormente se muestran en el capítulo cuatro. Se justifica por qué se eligieron corredores de transporte que enlazan a la Ciudad de Guadalajara con la Ciudad de México, y esta con el Puerto de Veracruz; además, se explica cómo se eligen las localidades intermedias aptas para contar con una estación de TAV. A partir de esto, se calculan los valores numéricos para los tiempos de viaje entre los nodos extremos e intermedios de cada ruta, se investiga la cantidad de viajeros y carga que, en el año establecido para el estudio, utilizan los modos ofertados, y se estima la cantidad hipotética de estos que emplean el TAV; con esta información, se calcula el valor del tiempo de los usuarios. Hecho esto, se obtiene el valor de la productividad y la cohesión entre las localidades de los mencionados corredores, haciendo uso de una regresión lineal a un modelo matemático que se alimentó con la cantidad de habitantes, el índice de accesibilidad y los datos económicos de cada nodo. Los últimos dos epígrafes de este capítulo tratan, respectivamente, sobre el consumo

de energía y las emisiones de GEI; esto se analiza para los escenarios previamente descrito en dos esquemas: viajes de corto itinerario, que comunican a nodos adyacentes entre sí, y viajes de largo itinerario, que enlazan a los nodos extremos de cada corredor.

Las conclusiones resultantes tras la comparativa de los dos escenarios estudiados se presentan en el quinto y último capítulo de este trabajo. En estas se enuncia bajo que esquema se obtienen ahorros de tiempo, diferencias en la productividad regional y cohesión territorial, así como las variaciones en el consumo energético y las emisiones de GEI, tras la inclusión en la oferta de transporte del TAV. Además, se sugieren líneas de investigación futuras sobre los temas en cuestión.

## **1.1. Antecedentes**

De acuerdo a su velocidad de operación, los trenes convencionales son aquellos que circulan hasta 160 km/hr, los de media velocidad operan en el rango de los 160 a los 200 km/hr (Fernández, 2006), mientras que la alta velocidad ferroviaria, según López-Pita (2014), alude a aquellos trenes que viajan entre los 200 y hasta los 300 km/hr, coincidiendo, casi totalmente, con Nash (2015), quien refiere que deben juzgarse como trenes de alta velocidad todos aquellos que circulen, en su operación de servicio, a 250 km/hr o más; inclusive, López Pita, aludiendo a Jean Bouley (quien fue presidente de la Unión International des Chemins de Fer, UIC) en 1981, identifica una última categoría, en la que denomina velocidades de circulación superiores a los 300 km/hr como de muy alta velocidad.

Las líneas ferroviarias de alta velocidad (LAV), coincidiendo con Alias (1984), son un modo de transporte apropiado para competir con otros en corredores con demanda de viajes interurbanos muy grande, de longitud media o larga, donde el autotransporte y el avión acaparan casi la totalidad de alternativas.

Otros autores, no obstante, vislumbran más argumentos para su inserción en la oferta de transporte. Por ejemplo, López-Pita (2014), con datos de Doomernik (2012), correlaciona al Producto Interno Bruto (PIB) con el volumen de tránsito, y obtuvo que, para la totalidad de países estudiados, al aumentar el PIB, la demanda en modos de transporte de alta velocidad (en



donde englobó al avión y al tren de alta velocidad) crece más rápido que la demanda en modos de transporte convencionales (donde se incluyó al autotransporte y al tren convencional).

Haciendo una comparación entre el tren y el autotransporte, en coincidencia con Cornet *et al.* (2017), los trenes ofrecen una mejor relación entre el volumen desplazado y la distancia recorrida, generan menos emisiones de carbono y menor daño a la biodiversidad. Frente al avión, Herrera y Sánchez (2014) encontraron que, en viajes menores a 500 kilómetros, el transporte ferroviario de media y alta velocidad tiene ventajas de comodidad para el usuario sobre el avión debido, principalmente, a que en el tren es más fácil incrementar la oferta del servicio mediante el aumento en el número de frecuencias, lo cual, en el transporte aéreo, puede influir en la congestión de sus terminales.

La inversión en la construcción de estas infraestructuras es de montos considerables; Nash (2015), para el caso de Inglaterra, menciona que aquellos itinerarios que se cubrirán con velocidades de entre 200 y 225 km/hr pueden llevarse a cabo en líneas existentes mejoradas, sin embargo Gállego (2012) obtuvo que cuando los trenes circulan a velocidades superiores a los 200 km/hr deben modificarse los valores para los parámetros geométricos y de la sección transversal de la vía, además de incorporar otros elementos a estos y criterios de diseño nuevos, lo que quizás represente en muchos casos prácticamente construir nuevas líneas.

Aunado a la inversión para la construcción, en la evaluación también deben tomarse en cuenta los costos variables anuales por operación y mantenimiento de la LAV, que dependen de la cantidad de usuarios o volumen de demanda, y los costos fijos anuales por operación y mantenimiento, tal como lo exponen De Rus y Román (2006).

Para De Rus y Nash (2007), el costo total se justifica cuando los ingresos por la demanda de viajes y el beneficio social obtenido (los ahorros de tiempo y la liberación de capacidad en los otros modos), son mayores a la inversión y a los costos de operación y mantenimiento, los cuales a su vez dependen de la cantidad de usuarios a los que se dé servicio. Bajo este enfoque, el volumen de demanda y la cantidad de usuarios son elementos análogos y dependen de parámetros cuya definición es compleja cuando en una determinada ruta de transporte existen varios modos accesibles para los usuarios (Alias y Valdés, 1990); sin embargo, Jara-Díaz (2007) lo enfoca al tipo de viaje por realizar y las circunstancias de cada viaje particular. Como extensión a este argumento, De Rus y Román (2006) explica que, para

usuarios con acceso a diversos modos de transporte, los factores que determinan la elección de uno sobre otro son el tiempo de recorrido y el costo del viaje, con mucha mayor preponderancia que otros factores tales como la comodidad, frecuencia del servicio, la seguridad, entre otros.

Sin embargo, de acuerdo al punto de vista de López-Pita (2014) y Doornik (2012), la rentabilidad de nuevas LAV debería evaluarse bajo la consideración de otros factores. Estos factores inciden sobre los agentes, sean usuarios o no del corredor de transporte, y pueden dividirse en dos grupos: aquellos denominados “externalidades negativas” cuando existe un impacto nocivo sobre los agentes, y aquellos conocidos como “externalidades positivas” que hacen aumentar la productividad y bienestar de los agentes. Resulta intuitivo establecer que los primeros deben minimizarse y los segundos maximizarse para justificar el esfuerzo realizado en la construcción, mantenimiento y operación de una LAV.

Entre las externalidades negativas que deben minimizarse, de acuerdo a López-Pita (2014) se encuentran: por un lado, para el caso de las carreteras, el elevado número de muertes por accidentes y la cada vez más común congestión de estas vías. Por otro lado, para el caso de los puertos aéreos, los retrasos en las frecuencias de servicios y su sobre costo. Y para ambos medios, el alto consumo de hidrocarburos, que está relacionado directamente con otra externalidad negativa: la emisión de gases de efecto invernadero.

Como externalidades positivas que deben maximizarse al implementar una nueva LAV, se pueden mencionar tres: i) los ahorros de tiempo que conlleva el realizar cierto itinerario a una velocidad mayor que la disponible en los medios convencionales, ii) la mayor capacidad para el desplazamiento de pasajeros y mercancías que ofrece el tren, lo cual libera capacidad en los otros modos de transporte del corredor para que puedan emplearse de manera más eficiente, de acuerdo a lo expuesto por De Rus y Nash (2007), y iii) una serie de beneficios económicos adicionales, tales como generación de empleos, lograr cohesión territorial o incrementar la productividad regional, que pueden lograrse si los actores clave en la región por donde pasará la LAV se organizan adecuadamente, de acuerdo a CAHISA (2013) y a Albaladejo y Bel (2011).

## 1.2. Justificación

De Rus y Román (2006) explican que para obtener el costo total de una infraestructura ferroviaria se debe considerar, además de la inversión en su construcción, los costos variables anuales por operación y mantenimiento de la línea ferroviaria, que dependen de la cantidad de usuarios o volumen de demanda, y los costos fijos anuales por operación y mantenimiento.

De Rus y Nash (2007) se basan exclusivamente en los ahorros de tiempo y la cantidad de viajes como parámetros para justificar el costo total por la implementación de una LAV, definiendo al beneficio social como los ahorros de tiempo obtenidos por los usuarios y la liberación de capacidad en los otros modos que se obtendría gracias al nuevo modo ofrecido en cierto corredor de transporte. Si este beneficio social resulta mayor a los costos, la línea de alta velocidad es rentable.

Sin embargo, López-Pita (2014) expone una serie de externalidades negativas que pueden mitigarse al incluir en cierto corredor de transporte el servicio de alta velocidad ferroviaria: por un lado, para el caso de las carreteras, el elevado número de muertes por accidentes y la cada vez más común congestión de estas vías. Por otro lado, para el caso de los puertos aéreos, los retrasos en las frecuencias de servicios y su sobre costo. Y para ambos medios, el alto consumo de hidrocarburos en relación directa con la emisión de gases de efecto invernadero.

Entonces se presentarán también diversas externalidades positivas que pueden abonar al incremento del beneficio social obtenido por implementar la nueva LAV, entre estas podemos mencionar tres, con base en De Rus y Nash (2007), en CAHISA (2013) y en Albalate y Bel (2011): i) los ahorros de tiempo, ii) la liberación de capacidad en los otros modos de transporte del corredor, y iii) una serie de beneficios económicos adicionales, alcanzables cuando los actores clave en la región por donde pasará la línea de alta velocidad se organizan adecuadamente.

Albalate y Bel (2011), Alias y Valdés (1990), Schreyer *et al.* (2004), y López-Pita (2014), coinciden en que es necesario realizar un análisis exhaustivo sobre las diversas externalidades que participan en la ejecución y operación de una LAV. Estas externalidades son medibles y cuantificables, pero no han sido incluidas en los trabajos reportados por De Rus y Román (2006)

y De Rus y Nash (2007); por lo tanto, en la presente investigación se conjuntarán las variables inciden en el beneficio social que generaría la implementación de un nuevo servicio ferroviario de alta velocidad en un corredor de transporte existente, para decidir si es justificable realizar la inversión que esto implica.

### **1.3. Descripción del problema.**

Las LAV son enormemente costosas e implican la utilización ingente de recursos económicos para su construcción, mantenimiento y operación (Albalate y Bel, 2011). A precios medios del año 2013, la construcción de la infraestructura se situó entre un mínimo de 2.85 y un máximo 30.88 millones de euros por kilómetro, de acuerdo a lo investigado por López-Pita (2014), la inversión promedio resultante varía considerablemente de una línea a otra debido a particularidades de cada proyecto. En lo que se refiere a la adquisición del material rodante, así como los costos de mantenimiento y operación, De Rus y Nash (2007) analizaron que para una línea con 500 kilómetros de longitud se requerirá una inversión de 600 millones de euros en trenes, y cubrir los costos de funcionamiento para toda la línea ascenderá a 124 millones de euros cada año.

De Rus y Nombela (2007) sostienen que los estudios basados en la demanda, su cantidad y composición, determinarán, en gran medida, qué tan rentable será la LAV. Además, para que el monto financiero sea justificable, De Rus y Nash (2007) exponen que el beneficio social obtenido (definiéndolo únicamente como los ahorros de tiempo obtenidos por los usuarios y la liberación de capacidad en los otros modos), y los ingresos por la demanda de viajes deberán ser mayores a la inversión debida a la construcción y a los costos de operación y mantenimiento. Documentalmente se sostiene que la alta velocidad ferroviaria orientada exclusivamente a pasajeros no genera actividad económica relevante, en cambio, si se destina también para mercancías puede producir una mayor contribución al desarrollo económico (Albalate y Bel, 2011), situación que se ha cumplido en el caso de Alemania (Liang *et al.*, 2016).

López-Pita (2014), basándose en Doomernik (2012), por ejemplo, relacionó el crecimiento del PIB con una mayor demanda de transporte y la importancia de diversificar la oferta de este. Respecto a esto último, mismo López-Pita expone que la experiencia europea al atender la

demanda en su mayor parte con el autotransporte y el avión, ha traído resultados poco favorables en forma de externalidades negativas tales como la congestión y siniestralidad en carreteras, los retrasos en los aviones, así como el consumo de energía y contaminación en ambos. Estos efectos se verían disminuidos gracias a la inclusión de una nueva oferta a los usuarios en forma de alta velocidad ferroviaria, a la vez que se potenciarían beneficios tales como ahorros en los tiempos de viaje y mayor capacidad en todos los modos de transporte (De Rus y Nash, 2007), además de la generación de empleos (CAHISA, 2013), cohesión territorial e incremento en la productividad, que sustenta Torrent (2007), así como Albalade y Bel (2011), para el caso de Alemania.

#### **1.4. Hipótesis**

Los beneficios económicos obtenidos por la implementación de una línea ferroviaria de alta velocidad, debidos a los ahorros de tiempo, el incremento en la cohesión territorial, el menor consumo energético y la menor emisión de gases efecto invernadero, justificarán la inclusión de esta infraestructura en la oferta de transporte existente.

#### **1.5. Objetivo**

Evaluar las externalidades económicas del beneficio social obtenido por una línea ferroviaria de alta velocidad, dando primordial importancia a los ahorros de tiempo, la cohesión territorial, el consumo energético y las emisiones de gases efecto invernadero.

## **2. Marco teórico.**

La decisión de construir una LAV debe afrontar los elevados costos de la infraestructura más los costos de adquisición de equipo rodante, así como los gastos operativos y de mantenimiento durante la vida útil del proyecto. Hernández (2011), menciona que estas erogaciones deben ser compensadas por los beneficios sociales que derivarán de la implementación de este nuevo modo de transporte, los cuales pueden ser ahorros de tiempo, reducción de accidentes, liberación de la capacidad en los modos de transporte existentes, reducción de la contaminación y algunos beneficios económicos adicionales los cuales, de acuerdo a Torrent (2007), pueden lograrse si los actores preponderantes dentro de la zona del proyecto demuestran la suficiente capacidad organizativa para potencializar su producción regional. En la presente investigación partiremos del análisis de los costos para implementar este servicio para, en seguida, exponer las externalidades relacionadas con el transporte y la valoración de los beneficios que pueden obtenerse con un nuevo servicio de alta velocidad.

### **2.1. Los costos**

En la evaluación, de acuerdo a De Rus y Román (2006), deben considerarse los costos por la construcción de la nueva LAV, los costos de su mantenimiento y de su operación. Estos costos se conforman a su vez por diversos elementos, tal como se expone a continuación.

#### **2.1.1. La inversión en la construcción**

De acuerdo a la experiencia de diversos corredores de transporte en el mundo, podemos percatarnos que la inversión promedio requerida para la construcción de las LAV difiere considerablemente de una línea a otra y esto es debido a una muy amplia cantidad de variables particulares de cada proyecto; algunos de los factores más importantes son:

**a) La velocidad máxima de diseño.** Este factor condiciona la geometría del trazado y consta, de diversos parámetros que van desde el diseño en la sección transversal de la vía hasta el proyecto geométrico en planta y perfil. Cada operador ferroviario cuenta con su propia normativa y especificaciones que obedecen a su experiencia y/o investigación particular para diversas velocidades máximas de operación. Por ejemplo, RENFE (1988) enlista en la Tabla 1 los parámetros que deben cumplirse para aquellas líneas en las cuales circulará a máximo 250 km/hr.

Tabla 1:  
Características geométricas de la vía.

	Definición del parámetro	Velocidad máxima 250 Km/hr
Sección transversal	Ancho de vía (mm)	1,435
	Distancia entre ejes (mm)	4,300
	Ancho de plataforma (m)	
	Vía doble	13.30
	Vía sencilla	13.30
	Ancho paseos (“banqueta”) (m)	0.60-0.80
	Gálibos de pasos superiores (m)	h = 7.00
	Distancia entre ejes de vía general y de circulación en estaciones (mm)	6,000
Planta	Radio mínimo de curvas horizontales (m)	Normal: 4,000 Excepcional: 3,125
	Longitud mínima de las curvas horizontales (m)	Normal: 140 Mínimo: 100
Perfil	Radio mínimo de curvas verticales (m)	Normal: 24,000 Mínimo: 16,000
	Longitud mínima de curvas verticales (m)	100
	Distancia mínima con pendiente constante entre curvas verticales (m)	100

*Fuente:* Normas geometría de vía RENFE (1988) (extracto).

**b) La orografía por la que discurre el trayecto.** Este factor, en conjunto con las limitaciones establecidas para los parámetros geométricos de la vía, determinará la cantidad de puentes que librarán las depresiones, así como los túneles que cruzarán las zonas montañosas. López-Pita (2014) constata que las líneas Tokaido (entre Tokio y Osaka) y Sanyo (entre Okoyama y Hakata) tienen una importante cantidad de túneles y puentes debido a la abrupta configuración

del relieve por el que discurren, siendo que para la primera estas obras representan el 46% de su recorrido y para la segunda el 97%. Esto contrasta, por ejemplo, con la línea Paris-Lyon que no tiene ningún túnel y la longitud total de puentes representa solo el 1% de la totalidad de su recorrido.

- c) **El grado de urbanización del corredor.** Este factor incide de manera análoga a la orografía en el sentido que implica también la construcción de innumerables obras de fábrica, pero además supone un reordenamiento social y urbanístico mayúsculo para las ciudades o zonas pobladas por donde pasará la nueva línea ferroviaria de alta velocidad (Alonso y Bellet, 2009).
  
- d) **El sistema de explotación adoptado.** Que puede ser para viajeros, para carga o mixto. Este factor cobra importancia en la sección estructural de la línea ferroviaria, en las prestaciones que deberá soportar el emparrillado de la vía y en las pendientes longitudinales del trazado en perfil. Por ejemplo, de acuerdo con Alias y Valdés (1990), las líneas dedicadas exclusivamente al tráfico de viajeros se limitan a una carga de 17 toneladas por eje y pueden admitir pendientes longitudinales de hasta 35 mm/m, mientras que aquellas líneas que se dedican al uso mixto deben soportar cargas de 22 toneladas por eje y las pendientes longitudinales no deben rebasar el 18/1000 (12/1000 en el caso de Alemania).
  
- e) **Las características medioambientales en la zona por donde pasa la línea.** Este factor se manifiesta en el costo que la protección al medio ambiente adquiere para cada línea en particular. Dos ejemplos de esto pueden encontrarse en López-Pita (2014), donde menciona que la línea Paris-Lyon demandó un 7% de su costo total en medidas de mitigación para el impacto ambiental, mientras que para la línea TGV-Mediterráneo este porcentaje fue del 21%.

A manera de resumen, se transcribe en la Tabla 2 lo que López-Pita (2014) reporta como experiencias en diversas partes del mundo para los costos medios por kilómetro que ha supuesto la construcción de diversas líneas ferroviarias de alta velocidad.



Tabla 2:  
Costo promedio para la construcción de las LAV

<b>País</b>	<b>Líneas</b>	<b>Millones de Euros/km (2013)</b>
<b>Francia</b>	París – Lyon	2.85
	TGV – Atlántico	4.75
<b>Japón</b>	Tokaido	12.35
	Sanyo	13.78
	Joetsu	30.88
	Tohoku	20.43
<b>Alemania</b>	Hannover – Wurzburg	16.15
	Mannheim - Stuttgart	17.10
<b>España</b>	Madrid - Sevilla	4.63

*Fuente: López-Pita (2014)*

### **2.1.2. Material rodante, mantenimiento y operación.**

En lo que respecta a los costos promedio por la adquisición de material rodante, así como aquellos destinados al mantenimiento y operación para las líneas ferroviarias de alta velocidad, de acuerdo a De Rus y Nash (2007), se puede considerar que estos se mantienen constantes dentro de un promedio general para las diversas experiencias en el mundo, tal como puede observar en la Tabla 3, que corresponden a una LAV con 500 kilómetros de longitud.

Tabla 3:  
Costos promedio por operación de las LAV

Concepto	Unidad de medida	Cantidad	Millones de euros del 2004	
			Costo unitario	Costo total
Adquisición de material rodante	Tren	40	15	600.00
Mantenimiento de infraestructura por año	Km	500	0.065	32.50
Mantenimiento de material rodante por año	Tren	40	0.900	36.00
Energía consumida por año	Tren	40	0.892	35.68
Empleados administrativos por año	Trabajador	550	0.036	19.80

*Fuente:* De Rus y Nash (2007)

Resulta notorio cómo al conjuntar los costos por la construcción de la infraestructura y por adquisición del equipo, más los gastos anuales de mantenimiento y operativos, resulta que la inversión asciende a montos considerables. De Rus y Román (2006), elaboraron la Ecuación (1) para englobar los costos recién expuestos:

$$CT = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{(C(q_t) + C_t)}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Donde:

$CT$  = Costos totales.

$I_0$  = Inversión en la construcción.

$q_t$  = volumen de demanda en el año  $t$ .

$C(q_t)$  = Costos variables anuales de explotación dependientes de  $q_t$ .

$C_t$  = Costos fijos anuales de mantenimiento y operación en el año  $t$ .

$T$  = Vida del proyecto.

$i$  = Tasa social de descuento.

El monto obtenido como resultado de esta ecuación deberá ser justificable para poder implementar el servicio de alta velocidad ferroviaria.

## 2.2. Recuperación de la inversión

De Rus y Nash (2007), basándose exclusivamente en la demanda de viajes y definiendo al beneficio social como los ahorros de tiempo obtenidos por el uso del nuevo medio de transporte, desarrollaron la Ecuación (2) para justificar el costo total obtenido en la Ecuación (1), tal como se muestra a continuación:

$$\int_0^T [B_{(Q)} - C_{q(Q)}] e^{-(r-\theta)t} dt - \int_0^T C_t e^{-rt} dt > I \quad (2)$$

Donde:

$Q$  = Cantidad de usuarios.

$B_{(Q)}$  = Beneficio social anual del proyecto, en función de  $Q$ .

$C_{q(Q)}$  = Costo variable anual de mantenimiento y explotación que depende de  $Q$ .

$C_t$  = Costo fijo anual de mantenimiento y explotación.

$I$  = Costos de inversión.

$T$  = Vida del proyecto.

$r$  = Tasa social de descuento.

$\theta$  = Crecimiento anual de los beneficios y costos que dependen de  $Q$ .

$t$  = Año de referencia (desde  $t = 0$ , hasta  $t = T$ ).

En el segundo término de la Ecuación (1) se puede observar que el volumen de demanda  $qt$ , juega un papel preponderante en la obtención de los costos anuales por la explotación del

servicio de transporte, mientras que de la Ecuación (2) se puede deducir que el elemento con más peso para que se cumpla la desigualdad es la cantidad de usuarios  $Q$ , que está implícito en el término  $B(Q)$ . El volumen de demanda y la cantidad de usuarios son elementos análogos que dependen de parámetros cuya definición es compleja cuando en una determinada ruta de transporte existen varios modos accesibles para los usuarios (Alias y Valdés, 1990); sin embargo, Jara-Díaz (2007) lo enfoca al tipo de viaje por realizar y las circunstancias de cada viaje particular. En ampliación a esto, De Rus y Román (2006) explican que, para usuarios con acceso a diversos modos de transporte, los factores que determinan la elección de uno sobre otro son el tiempo de recorrido y el costo del viaje, con mucha mayor preponderancia que otros factores tales como la comodidad, frecuencia del servicio, la seguridad, entre otros.

### 2.2.1. Estimación de la cantidad de usuarios

La demanda de viajes que tendrá cierta ruta, de acuerdo con Ortúzar y Willumsen (2011), se mide mediante dos bases de datos sobre las preferencias de los usuarios: una denominada Preferencias Reveladas, en donde se obtiene información referente al comportamiento actual de los individuos en sus decisiones de viaje; y otra denominada Preferencias Declaradas, en donde se obtendrán las elecciones que los individuos tomarían ante un escenario de situaciones hipotéticas construidas por el investigador. La finalidad será modelar la demanda haciendo uso de la información proporcionada por los viajeros, con el fundamento teórico de estos modelos en la microeconomía de las elecciones discretas, desarrollada por McFadden (1981).

Jara-Díaz (2007) considera el modelo de McFadden para asumir el comportamiento de un individuo al tomar decisiones, de acuerdo al máximo nivel de satisfacción que este puede obtener, como se muestra en el modelo de la Ecuación (3):

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} U(X, Q_j) \\
 & \sum_{j \in M} P_j X_j + C_j \leq I
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Donde  $MaxU$  representa la utilidad máxima (o nivel de satisfacción),  $X$  el paquete de bienes por adquirir y  $Q_j$  un vector que define las características de calidad de la alternativa discreta  $j$ .  $P_i$  y  $X_i$  son el precio y la cantidad de cada uno de los bienes adquiridos, respectivamente,  $C_j$  el costo por adquirir la alternativa discreta  $j$ , siendo  $I$  el ingreso monetario del individuo. En la última expresión,  $M$  representa el grupo de alternativas discretas.

El modelo anterior es de práctica general, es decir se emplea para la mayoría de decisiones de compra cuando la opción a escoger pertenece a un grupo de bienes con diferentes características de calidad internas. Para la aplicación particular de este modelo al tema del transporte el mismo Jara-Díaz nos explica que, en la actividad de viajar, en la cual el tiempo es la asignatura básica, se debe incluir este desde un principio; por lo tanto, los componentes de la duración del viaje (tiempo dentro del vehículo, tiempo de espera y tiempo de acceso) se deben incluir dentro del vector  $Q_j$ . Uno de los enfoques microeconómicos más populares para entender la elección del modo de transporte es el expuesto por Train y McFadden (1978), que se basa en el equilibrio bienes/ocio, en cuyo marco se incluyen el tiempo  $t_i$  y el costo  $c_i$  como variables que influyen en la utilidad obtenida por el consumo de bienes  $G$  y el tiempo libre  $L$ . Esto se puede presentar de manera formal con la Ecuación (4), para el caso de un viaje sencillo dentro de cualquier par Origen-Destino, O-D, dado:

$$MaxU(G, L) \tag{4}$$

Sujeto a:

$$G + c_i = wW + E$$

$$L + W + t_i = \tau$$

$$i \in M$$

Donde:

$W$  = Tiempo de trabajo.

$w$  = Salario.

$E$  = Ingresos de otras fuentes.

$\tau$  = Tiempo total disponible.

Por lo tanto, las encuestas de Preferencias Reveladas y Preferencias Declaradas nos sirven para detectar la necesidad; si a estas encuestas sumamos el modelo representado por la Ecuación (4), podremos definir la demanda como consecuencia directa a un alto nivel de satisfacción.

De acuerdo a lo expuesto hasta este momento, y parafraseando a De Rus y Nombela (2007), podemos distinguir, entonces, que los estudios basados en la demanda, su cantidad y composición, determinarán en gran medida que tan rentable será la inversión en una nueva línea de alta velocidad ferroviaria.

En la ecuación 1, De Rus y Román (2006) determinan que el costo total por la implementación de una nueva línea de transporte lleva implícito el volumen de demanda que tendrá esta; y en la ecuación 2, De Rus y Nash (2007) indican que el costo total será justificable mientras la cantidad de sus usuarios sea grande. En ambas formulaciones el potencial de beneficios que ofrecen las LAV se limita a los agentes que directamente tendrán relación con este servicio.

Bajo este punto de vista se puede estimar la necesidad de un nuevo modo de transporte en cierto corredor mediante la aplicación de encuestas de preferencias reveladas y/o de preferencias declaradas.

Por ejemplo, De Rus y Román (2006) obtuvieron, a partir de una encuesta de preferencias reveladas, el reparto modal en el corredor Madrid – Barcelona previo a la existencia del tren de alta velocidad AVE entre ambas ciudades, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4:  
Reparto modal, corredor Madrid - Barcelona

<b>Reparto modal de la muestra</b>		
<b>Modo</b>	<b>Viajeros</b>	<b>%</b>
<b>Coche conductor</b>	38	8.62
<b>Coche acompañante</b>	18	4.08
<b>Autobús</b>	39	8.84
<b>Tren convencional</b>	51	11.57
<b>Avión</b>	295	66.89
<b>Suma</b>	<b>441</b>	<b>100.00</b>

*Fuente:* De Rus y Román (2006)

Simultáneamente, para el mismo corredor, aplicaron una encuesta de preferencias declaradas a los usuarios de los diversos modos de transporte; en esta se presentó a los participantes el caso hipotético de la existencia del servicio de alta velocidad ferroviaria entre ambas ciudades. Como resultado obtuvieron la clasificación del modo de transporte habitual contra el modo elegido, lo cual derivó en los valores que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5:  
Modos utilizados (%), corredor Madrid - Barcelona

<b>Modo elegido</b>	<b>Modo de procedencia</b>					<b>Suma</b>
	<b>Avión</b>	<b>Coche</b>	<b>Tren conv.</b>	<b>Autobús</b>	<b>Primer viaje</b>	
<b>Avión</b>	85.76	5.08	1.69	0.34	7.12	100.00
<b>Coche</b>	10.71	41.07	8.93	5.36	33.93	100.00
<b>AVE</b>	13.73	13.73	47.06	0.00	25.49	100.00
<b>Autobús</b>	0.00	10.26	0.00	51.28	38.46	100.00

*Fuente:* De Rus y Román (2006)

Para plasmar correctamente el escenario hipotético en la encuesta de preferencias declaradas, consideraron dos asignaturas básicas: la primera fue el tiempo de viaje desagregado en tiempo de acceso (aquel que transcurre desde el origen del viajero hasta la estación), tiempo de espera, tiempo en el vehículo y tiempo de egreso (aquel que transcurre desde la estación hasta el destino del viajero); la segunda fue el ingreso semanal per cápita para este corredor, que oscila entre

los 167 euros y los 351 euros, siendo el menor valor para los usuarios que prefieren el autobús y el mayor para los usuarios que prefieren el avión.

Gracias al empleo de estas dos asignaturas se pudo adoptar el enfoque microeconómico de Train y McFadden (1978), que se basa en el equilibrio bienes/ocio, en cuyo marco se incluyen el tiempo y el costo como variables que influyen en la utilidad obtenida por el consumo de bienes de transporte, tal como se muestra en el modelo representado por la Ecuación (4).

Dos resultados obtenidos por De Rus y Roman (2006), en base a la Tabla 5, son muy notorios: i) el 25.49% de los viajeros encuestados que escogerían el AVE, realizan el viaje por primera vez y ii) ninguno de los usuarios que escogerían el AVE proviene del autobús, siendo el segmento con la renta per cápita en el límite inferior.

El primer resultado indica la cantidad de viajes generados por el nuevo servicio (usuarios que siendo la primera vez que viajan escogerán el AVE). El complemento de esta cantidad indica los viajes atraídos por el nuevo servicio (usuarios que viajan habitualmente por el corredor en otros modos, pero al existir el ave, lo preferirán).

El segundo resultado adquiere sentido cuando tenemos en cuenta que el nivel económico de cada usuario es una circunstancia predominante al momento de elegir cierto modo de transporte, y que mientras más elevado sea este nivel económico del individuo, más valorará los ahorros de tiempo (Alias y Valdés, 1990).

Existe un tercer resultado que puede leerse en la generalidad de la Tabla 5, y es acorde con lo mencionado por Alias y Valdés, en el sentido de que la justificación para implementar una nueva línea de alta velocidad implica tratar con corredores que tengan una demanda global suficiente, ya que el ferrocarril de alta velocidad no genera tráfico en un área insuficientemente desarrollada. Esto concuerda con Thompson (1994) cuando menciona que algunos de los corredores de transporte en Estados Unidos no representan un buen mercado para los trenes de alta velocidad debido a la baja densidad poblacional de las zonas adyacentes a dichos corredores. Por lo tanto, De Rus y Nash (2007) concluyen que la inversión en alta velocidad es justificable si esta da servicio, en el año de apertura, a seis millones de pasajeros cuando la línea haya tenido bajos costos de construcción y represente ahorros significativos de tiempo para los usuarios. Pero si los costos de construcción y los ahorros de tiempo se encuentran dentro de valores más habituales, se requiere dar servicio a nueve millones de pasajeros por año.

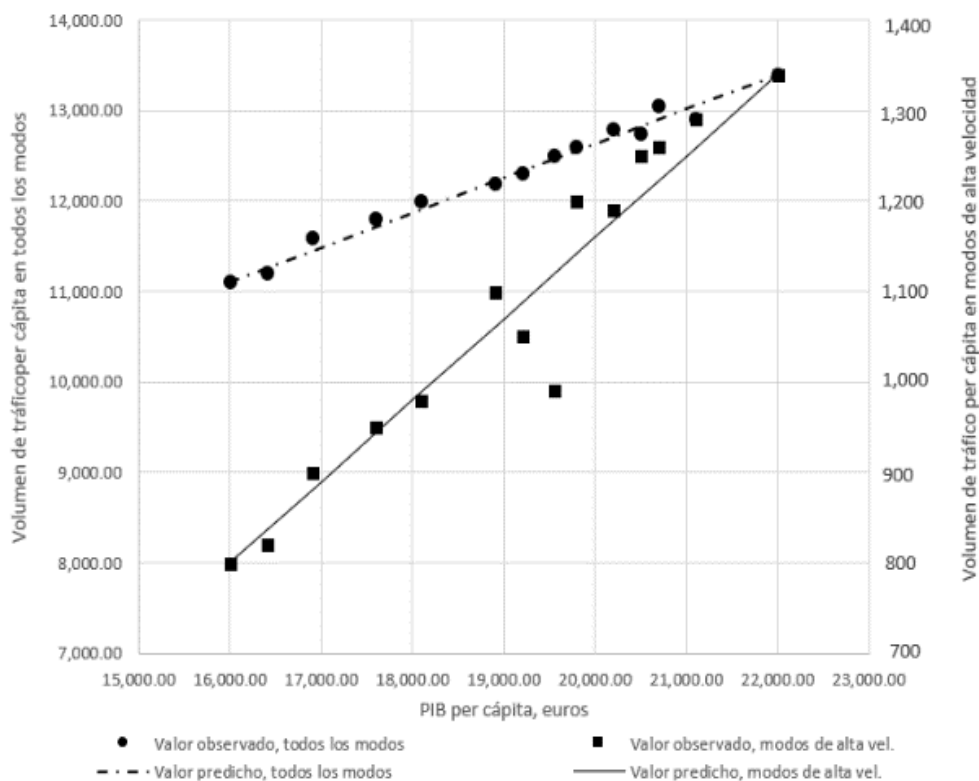


Esta conclusión atañe a los agentes que son usuarios directos de la alta velocidad, sin embargo, Alias y Valdés (1990) también mencionan que han de tenerse en cuenta, además de los beneficios económicos directamente medibles, los beneficios que indirectamente se pueden producir a la colectividad, cuyo estudio debe incluir la consideración del impacto en los otros modos de transporte y en el entorno. Bajo esta nueva perspectiva se deben tomar en cuenta tanto los medios de transporte destinados al uso de pasajeros como aquellos que se reservan para mercancías, y evaluar dentro de un marco económico a todos estos usuarios.

### **2.3. Otro enfoque para la recuperación de la inversión**

En un escenario de crecimiento económico la demanda de transporte se pone de manifiesto de la misma manera que lo hace el aumento en la necesidad de diversificar los modos de este; siendo esta situación aplicable no solo para el servicio de pasajeros, sino también para el traslado de mercancías. López-Pita (2014) nos muestra una correlación entre el Producto Interno Bruto (PIB) y el volumen de tráfico de 27 países europeos, de acuerdo a datos de Doomernik (2012); en esta podemos observar que al incrementarse este PIB en un 38% (acumulado entre 1995 y 2009) se registró un crecimiento del 17% en la demanda de todos los modos de transporte y un 58% en la demanda de los modos de alta velocidad, donde se incluyen al avión y al tren de alta velocidad, tal como puede observarse en la Figura 1.

Figura 1:  
Tráfico y PIB per cápita en la EU-27 (1995-2009).



Fuente: López-Pita (2014).

Para este caso, la rentabilidad en nuevas líneas de alta velocidad debería evaluarse en consideración a otros factores, además de los contemplados en la Ecuación (2). Estos factores inciden sobre los agentes, sean usuarios o no del corredor de transporte, y pueden dividirse en dos grupos: aquellos denominados “externalidades negativas” cuando existe un impacto nocivo sobre los agentes, y aquellos conocidos como “externalidades positivas” que hacen aumentar la productividad y bienestar de los agentes. Resulta intuitivo establecer que los primeros deben minimizarse y los segundos maximizarse para justificar el esfuerzo realizado en la construcción, mantenimiento y operación de este nuevo modo de transporte.

### 2.3.1. Externalidades negativas que pueden minimizarse

El mismo López-Pita resume que concentrar la demanda en las carreteras y la aviación ha impactado de forma muy negativa, en el caso de Europa, y que la implementación de una LAV puede ayudar a reducir las siguientes externalidades negativas:

- a) **La siniestralidad en la red de autopistas.** En 17 países europeos, de acuerdo a Schreyer (2004), durante el año 2000 se registraron accidentes carreteros cuyo costo estimado acumulado ascendió a 150 mil millones de euros (ver Figura 2). El cálculo de este costo incluye, de acuerdo a Monclús et al. (2008), los costos administrativos (policías, jueces y abogados, compañías de seguros, etcétera), los costos materiales (reparación y/o sustitución de vehículos y elementos de la infraestructura de la vía de comunicación) y los costos asociados (asistencia médica, la pérdida de producción durante el periodo de baja laboral o permanente, entre otros).
  
- b) **La congestión en la red viaria.** Este fenómeno implica horas perdidas. En un caso práctico, en la ciudad de Caracas, Venezuela, Thompson y Bull (2002) calcularon que, a precios del año 2000, cada ocupante de automóvil generó un costo de congestión de 0.18 usd/km (dólares americanos por kilómetro) y cada ocupante de autobús uno de 0.02 usd/km. En otro ejemplo, Jiménez (2014) expone que, de acuerdo a los datos analizados por el Instituto de Investigación del Transporte Estadounidense (ATRI), en 2013 los embotellamientos en las carreteras de dicho país causaron un costo de 6,600 millones de euros, lo que equivale a 141 millones de horas productivas pérdidas.
  
- c) **Retrasos aéreos y sobre costos.** La aviación presenta dificultades para hacer frente al incremento de la demanda, con los niveles de calidad requeridos. Uno de los factores que más fácilmente puede cuantificarse es la puntualidad, la cual cada vez es más difícil de cumplir por las compañías aeronáuticas, lo que se traduce, también, en horas perdidas valorables desde un punto de vista económico. López-Pita (2014) refiere que los sobre costos debidos a la congestión de aeropuertos y rutas aéreas, de acuerdo a cálculos de la Asociación de Líneas Aéreas Europeas, fueron de 5,700 millones de euros en el año 1999.

**d) El consumo de energía.** La Comisión Europea, en 2004, encontró que el mayor uso del autotransporte y el avión presenta una proporción directa con el aumento en la evolución del consumo de petróleo (García, 2005). Además, Vidalenc (2008) estableció, con datos estadísticos obtenidos en diversos modos de transporte, que el Tren de Alta Velocidad consume menos de 15 gep/PKm (gramos equivalentes de petróleo por pasajero-kilometro), en contraste con los 25 gep/PKm que consume el automóvil y los más de 40 gep/PKm que gasta el avión. Con el precio del petróleo a 58.64 euros por barril (Expansión, 2018), esto equivale a 0.0075 euros/PKm para el tren de alta velocidad, 0.0125 euros/Pkm para el automóvil, y 0.02 euros/PKm para el avión.

**e) Emisión de gases de efecto invernadero.** El alto consumo de petróleo en el transporte está íntimamente ligado al incremento en la emisión de estos gases. García (2007) elaboró correlaciones a partir de datos obtenidos en los ferrocarriles alemanes y japoneses, donde se muestra cómo, de los diversos modos de transporte, en los ferrocarriles estas emisiones son menores en relación a la cantidad de viajeros. Por ejemplo, de acuerdo a García, en la relación Madrid-Sevilla el tren de alta velocidad emite menos de 6.1 kilogramos de CO<sub>2</sub> por viajero, el automóvil emite cerca de 16.2 kg/viajero y el avión 43.5 kg/viajero. Albalante y Bel (2011) señalan que, para septiembre de 2010, los derechos de emisión de este gas a la atmosfera costaban 14 euros por tonelada; al aplicar este parámetro en la relación mencionada, el precio por la emisión de CO<sub>2</sub> en el tren de alta velocidad sería de 0.09 euros por viajero, en el automóvil ascendería a 0.23 euros por viajero y para el avión este importe sería de 0.61 euros por viajero.

### **2.3.2. Externalidades positivas que pueden maximizarse**

Al implementar la nueva LAV, y mitigar las externalidades negativas enlistadas anteriormente, se pueden potencializar las externalidades positivas de este modo de transporte. De Rus y Nash (2007) mencionan que los principales beneficios pueden ser:

**a) Ahorros de tiempo.** Para el caso de Inglaterra, donde los trenes convencionales alcanzan velocidades de hasta 160 km/hr, un tren de alta velocidad ahorra aproximadamente 35 minutos en un viaje de 450 km respecto a los primeros (SDG, 2004). Jara-Diaz (2007) explica que un esfuerzo importante en la economía del transporte se dedica a determinar la disposición que los usuarios presentan para pagar por reducir el tiempo de viaje. De Rus y Nash (2007) presentan, en la Tabla 6, como los usuarios británicos valoran los ahorros de tiempo en diversas actividades que motivan el uso de este medio de transporte.

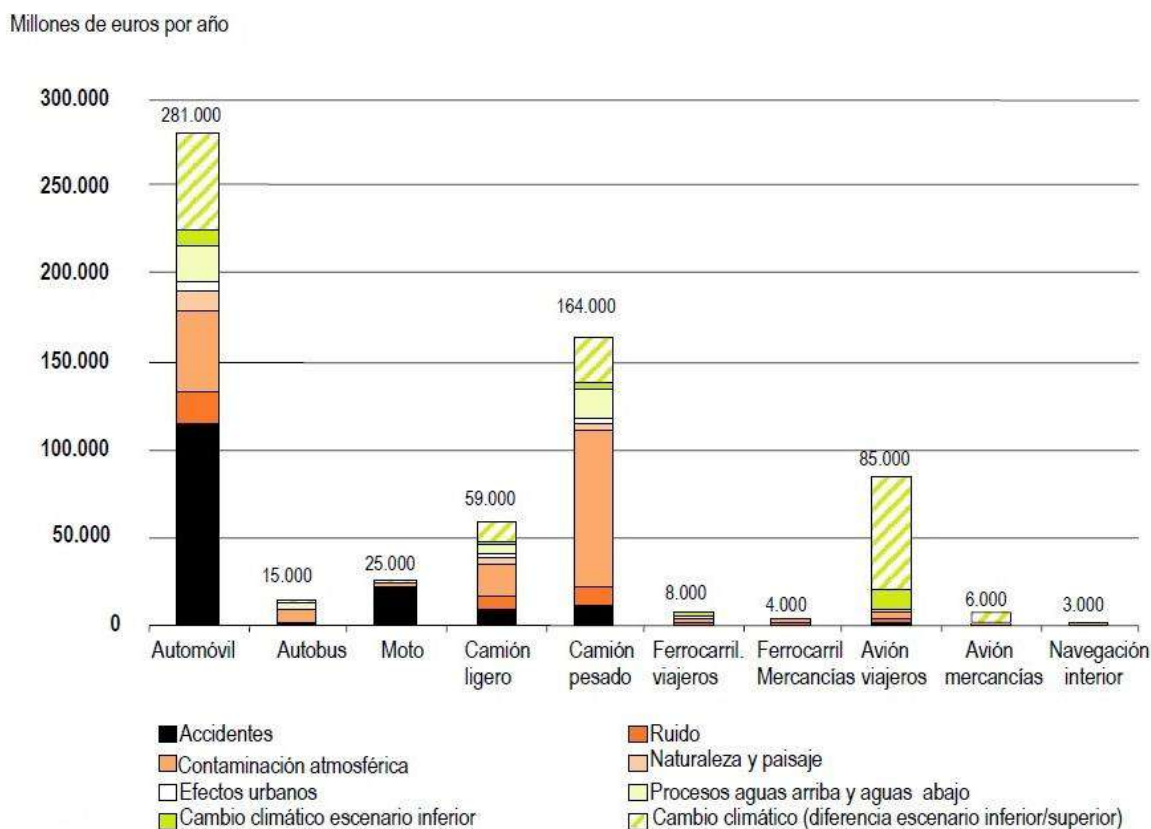
Tabla 6:  
Ahorros de tiempo por pasajero en tren en el Reino Unido.

Valoraciones estándares	Libras esterlinas por hora (2002)	Euros por hora (2002)
Ocio	4.46	2.85
Desplazamiento al trabajo	5.04	3.23
Negocio	39.93	25.56

*Fuente:* De Rus y Nash (2007).

**b) Mayor capacidad.** Este beneficio hace manifiesto su valor cuando la nueva línea de alta velocidad ferroviaria libera capacidad en los modos de transporte existentes (De Rus y Nash, 2007). Por ejemplo, Liang *et al.* (2016) exponen que, en Alemania, desde el año 2000 la carga transferida de la carretera hacia el ferrocarril de alta velocidad equivale a más de 100,000 camiones por año. Bajo este precepto los beneficios pueden ser cuantificados como la reducción neta de externalidades negativas. En Schreyer *et al.* (2004), con datos de INFRAS del año 2000, se elaboró una comparación de los costos externos totales, que aquí se transcribe en la Figura 2, tanto para pasajeros como para mercancías, en diversos modos de transporte para 17 países de la Unión Europea. El motivo para excluir los costos de congestión en la Figura 2, es debido a que estos ya han sido cuantificados de manera independiente al ponderar las externalidades negativas.

Figura 2:  
Costos externos totales de diversos medios de transporte



Fuente: Schreyer et al. (2004)

c) **Beneficios económicos adicionales.** El tren de alta velocidad puede permitir la expansión de los mercados y animar la ubicación de empleos. Como ejemplo de esto podemos citar dos casos: las experiencias de California y de España. En la primera, se estima que “la mayor actividad económica asociada con el desarrollo y la implementación del sistema ferroviario de alta velocidad puede generar indirectamente hasta 400,000 puestos de trabajo adicionales, permanentes y a largo plazo” (CAHISA, 2013, p. 2). En la segunda, Albalate y Bel (2011) mencionan que una de las motivaciones de España para crear su red de alta velocidad es la cohesión territorial y productividad, lo que atañe a objetivos meta-políticos que son difíciles de cuantificar directamente. Para generar y hacer efectivos estos beneficios adicionales Torrent (2007) recalca la necesidad de que los agentes de cada localidad por la que atravesase la nueva

infraestructura (gobiernos, empresas, universidades, cámaras de comercio, asociaciones culturales, entre otras) se organicen adecuadamente y creen estrategias conjuntas para aprovechar las ventajas que representa el tren de alta velocidad.

Por lo tanto, excluyendo el costo correspondiente a la congestión viaria, podemos elaborar la Tabla 7, en base a la información expuesta previamente en la Figura 2.

A manera de síntesis se encuentra, por lo tanto, que una opción para atender el aumento en la demanda de transporte que se ha presentado en las últimas décadas, puede ser implementar líneas ferroviarias de alta velocidad. Su atractiva relación tiempo de viaje/distancia recorrida, su capacidad para mover grandes volúmenes, su posibilidad de incluir mayor cantidad de frecuencias y su menor impacto al medio ambiente, de acuerdo a López-Pita (2014), han sido los motivos que han llevado a diversos países en el mundo a incluir este servicio en sus corredores con mayor demanda.

Tabla 7:  
Costos totales por componente y modo de transporte.

Componente	Total	%	Carretera					Ferrocarril		Aviación		Navegación
			Auto	Bus	Moto	Camión ligero	Camión Pesado	Pax	Carga	Pax	Carga	Carga
<b>Accidentes</b>	156,439	24%	114,191	965	21,238	8,229	10,964	262	0	590	0	0
<b>Ruido</b>	45,645	7%	19,220	510	1,804	7,613	11,264	1,354	782	2,903	195	0
<b>Contaminación atmosférica</b>	174,616	27%	46,721	8,290	433	20,431	88,407	2,351	2,096	3,875	360	1,652
<b>Cambio climático</b>	195,714	31%	64,812	3,341	1,319	13,493	29,418	2,094	800	74,493	5,438	506
<b>Naturaleza y paisaje</b>	11,014	2%	1,596	276	233	2,562	4,692	202	64	1,211	87	91
<b>Aguas arriba y abajo</b>	47,375	7%	19,319	1,585	335	5,276	16,967	1,140	608	1,592	170	383
<b>Efectos urbanos</b>	10,470	2%	5,782	147	127	1,220	2,634	426	134	0	0	0
<b>Total, UE 17</b>	<b>641,273</b>	<b>100%</b>	<b>271,641</b>	<b>15114</b>	<b>25489</b>	<b>58,824</b>	<b>164,346</b>	<b>7,829</b>	<b>4,484</b>	<b>84,664</b>	<b>6,250</b>	<b>2,632</b>

*Fuente:* Adaptado de Shreyer et al. (2004).



### 3. Metodología.

En el presente capítulo se expone la manera en que las externalidades concernientes al proyecto de una LAV se establecieron, en lo que respecta al valor del tiempo consumido por los usuarios, la productividad y la cohesión territorial por la zona donde discurre la línea, el consumo de energía y sus correspondientes emisiones de gases efecto invernadero.

Se inicia con la explicación de cómo se determinó a los nodos que se consideraron en el corredor de transporte, de acuerdo al criterio establecido por Gutiérrez-Puebla (2004) y López-Pita (2014), que se basa en establecer la distancia y tiempo de recorrido donde los trenes de alta velocidad son más efectivos respecto a los otros modos y/o medios ofertados en existencia. Para los modos terrestres se utilizó la distancia carretera entre los puntos extremos de cada par origen-destino, mientras que para el modo aéreo se utilizó la distancia ortodrómica entre los aeropuertos existentes de dichos puntos extremos.

Posteriormente se determinaron los tiempos de recorrido en los arcos que enlazan cada uno de los nodos obtenidos. Para el modo carretero y ferroviario de alta velocidad, estos tiempos resultaron al relacionar la distancia previamente obtenida con la velocidad promedio que cada modo y/o medio de transporte logra para cada arco; la velocidad se investigó en las bases de datos disponibles en SCT (2014, 2014, 2014c, 2014d, 2014e y 2014f), para los medios del modo carretero, y en la experiencia plasmada en Nash (2015) y Nishijima *et al.* (2013) para el modo ferroviario de alta velocidad. Para el modo aéreo, el tiempo de recorrido se obtuvo en las plataformas digitales que las compañías de aerolíneas comerciales (Aeromar, 2019; Aeromexico, 2019; Interjet, 2019; Viva Aerobus, 2019; Volaris, 2019) ofrecen al público en internet. Los tiempos efectivos de viaje fueron penalizados por concepto de acceso y egreso, de sus respectivas terminales, para el autobús, el tren de alta velocidad y el avión, de acuerdo a la experiencia de Rus y Román (2006) y Nash (2015), las recomendaciones de las compañías de autobuses (PP, 2019) y las previamente citadas aerolíneas. El tiempo efectivo de viaje del automóvil no fue penalizado, en concordancia a lo explicado en De Rus e Inglada (1993).

A continuación, se determinó la cantidad de personas que viajan en cada uno de los corredores de transporte definidos por cada arco previamente obtenido. A partir de este punto se definieron dos escenarios: el existente, que se conformó por los modos y medios de transporte actualmente ofertados, y el hipotético o propuesto, conformado por los modos y medios previamente mencionados más el modo ferroviario de alta velocidad. Para cada escenario se estudiaron dos tipos de viaje: de corto, y de largo itinerario. La cantidad de usuarios en los modos actualmente ofertados se obtuvo de las bases de datos existentes en SCT (2013 – 2019) así como en encuestas elaboradas por SENEAM (2012). Para el propuesto modo ferroviario de alta velocidad la cantidad de usuarios se estimó en base a las experiencias plasmadas por Modelística (2014), Herrera-García y Sánchez-López (2014), y García-Álvarez, 2016 y Fernández-Jañez, (2012), en donde se consideran dos tipos de tráfico para el tren de alta velocidad: el atraído, conformado por usuarios provenientes de otros modos y/o medios, y el inducido, conformado por usuarios que viajaron por primera vez y eligieron al TAV.

Consecutivamente se cuantificó el valor del tiempo de los usuarios en cada escenario para cada corredor, para cada tipo de viaje: con y sin TAV. El valor del tiempo para los usuarios del modo carretero se obtuvo a partir de lo investigado por Torres *et al.* (2019), mientras que para los del modo aéreo se adoptó el criterio de Alberro-Semerena (2008). No se encontró referencia bibliográfica previa para la determinación del valor del tiempo en los usuarios que conforman el tráfico inducido al TAV, sin embargo, en la presente investigación se consideró que este será un promedio de lo que se tasó para el modo carretero y el modo aéreo. Para los tres modos de transporte considerados en esta investigación, se disgregó el valor del tiempo en dos motivos de viaje: por trabajo y por ocio.

El siguiente apartado trata la metodología que se siguió para la obtención de la productividad predicha, parámetro que se relacionó directamente con la cohesión territorial (Sala-i-Martin, 1996 y Cabeza-Morales y Gutiérrez-Rey, 2015) lograda al enriquecer la oferta de transporte en los recorridos de corto itinerario con el nuevo modo. La sección inició obteniendo la cantidad de habitantes que conforman la población en cada uno de los nodos estudiados y se definieron

los años que sirvieron como base para el presente estudio. Esta cantidad de habitantes se utilizó para determinar el valor económico que se logra para la cohesión territorial entre los nodos intermedios al unirlos por algún medio de transporte, y los años base se utilizaron para realizar hacia ellos todas las proyecciones de la información que otras bases de datos establecieron en diversos espacios temporales. La magnitud de la población se encontró en las bases de datos disponibles al público elaboradas por INEGI (2000, 2010, 2019 y 2020) y los años base coincidieron con los más recientes años censales disponibles en INEGI (2020). Se realizó la determinación de la accesibilidad potencial y el índice de accesibilidad, para lo cual se construyeron matrices de accesibilidad en cada una de las rutas con enlaces interregionales. Se definió el modelo (Montgomery y Runger, 1996) que se empleó para obtener la productividad predicha, y se evaluó al considerar dos esquemas: i) como una red completa y ii) como líneas independientes. Finalmente, en base a las evaluaciones realizadas al modelo, y con los coeficientes resultantes, se calculó la productividad en el escenario existente y en el escenario propuesto, cuya diferencia sirvió para cuantificar el grado de cohesión territorial alcanzada por los municipios en los cuales cada nueva línea ferroviaria de alta velocidad pasa.

Los tres últimos epígrafes de este capítulo trataron sobre la metodología que se empleó para valorar el impacto económico que el consumo de energía y su correspondiente emisión de gases de efecto invernadero. Para el consumo energético en el autotransporte, se utilizó el criterio de Solís y Sheinbaum (2015), para el del avión se empleó la formulación mostrada en ICAO (2017), y para el TAV, se utilizó la ecuación que se dedujo a partir de lo presentado en Xujie y Lu (2014). En lo que respecta a la emisión de GEI, se encontró una enunciación común en IPCC (2006 y 2006b), para los tres modos de transporte considerados: carretero, aéreo y ferroviario de alta velocidad. Esta se alimentó con los factores de emisión correspondientes a cada uno de estos, y se obtuvo la masa expuesta a la atmosfera. Finalmente, se expuso como, en INPC (2020), Indexmundi (2020), y en IMCO (2013), se encontraron los parámetros para monetizar cada uno de los combustibles empleados, así como la masa unitaria de GEI emitida.

### 3.1. El año de estudio y la homologación de la información

El presente estudio se realizó para el año 2013, debido a que es el más reciente con censo económico completo reportado por INEGI (2020). Por este motivo, cuando no se encontró información específica para este año, aquella disponible se proyectó haciendo uso de la expresión para poblaciones proyecto de crecimiento geométrico, que se muestra en la Ecuación (5):

$$P_j = P_o \times (1 + r)^n \quad (5)$$

Donde  $P_o$  es la población en el año base censal,  $r$  representa la tasa de crecimiento promedio anual entre dos años censales consecutivos y  $n$  es la diferencia aritmética entre el año de estudio y el año base censal.

Cuando la tasa de crecimiento promedio anual no se encontró en las referencias consultadas, esta se calculó haciendo uso de la información reportada entre años consecutivos, mediante la Ecuación (6):

$$r = \left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{1/N} - 1 \quad (6)$$

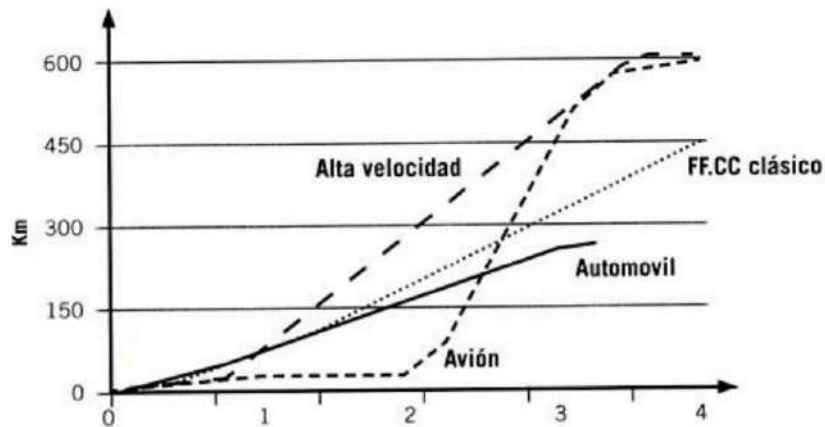
Donde  $a_1$  es la población en el año censal más reciente,  $a_0$  la población en el año censal inmediato anterior al primero y  $N$  la cantidad de tiempo, en años, transcurrida entre  $a_1$  y  $a_0$ .

### 3.2. Determinación de corredores aptos

Un importante punto de partida para determinar que corredores de transporte son adecuados para contar con el servicio de alta velocidad ferroviaria además de la oferta que ya se ofrezca en estos, desde el punto de vista de su ubicación espacial, lo proporciona Gutiérrez-Puebla (2004) cuando explica que la evolución del ferrocarril hacia servicios de alta velocidad fue un paso natural con miras a una oportunidad de crecimiento en este modo de transporte debido a

las pérdidas de mercado que experimentaba el tren respecto al automóvil, en distancias cortas, y al transporte aéreo, en recorridos con distancias superiores a los 500 kilómetros. Este rango guía hacia un atisbo de los corredores que serían aptos, siempre y cuando sus pares origen-destino queden dentro de este, sin embargo, resulta ambigua la definición de “distancias cortas” en las cuales el automóvil le gana mercado al ferrocarril. En este sentido López-Pita (2014), basándose en los tiempos de recorrido puerta a puerta que experimentan los usuarios, muestra en que distancias la oferta de transporte ferroviario de alta velocidad resulta más atractiva respecto a otros modos, tal como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3:  
Tiempo de viaje puerta a puerta



Fuente: López-Pita (2014)

En la Figura 3, el eje de las abscisas registra el tiempo de viaje puerta a puerta en horas, mientras que el eje de las ordenadas muestra la distancia recorrida por cualquiera de los modos estudiados. Podemos observar cómo en viajes con una duración entre 0 y 1.5 horas, el automóvil y tren clásico (o convencional) resultan más eficientes por sobre los otros modos, mientras que en recorridos con una duración entre 1.5 y 3 horas los trenes de alta velocidad dominan respecto a los demás, habiendo recorrido distancias de entre 150 y 500 kilómetros, respectivamente. Es aquí cuando se encuentra congruencia en lo descrito por Gutiérrez-Puebla (2004) cuando nos señala que, para aprovechar las ventajas de la alta velocidad, es necesario un espaciamiento entre estaciones que ronde los 100 – 200 kilómetros, valores que servirán para establecer la

distancia mínima buscada. Por lo tanto, desde este punto de vista, aquellos corredores en donde los modos que conforman la oferta de transporte recorran entre 100 y 500 kilómetros, serán aptos para contar con el nuevo servicio de alta velocidad ferroviaria.

La distancia recorrida por el autotransporte puede deducirse a partir del trazado que presenten las carreteras y/o autopistas del corredor, mientras que aquella recorrida por los aviones se obtiene al calcular la distancia ortodrómica, es decir el camino más corto entre dos puntos sobre la superficie terrestre (Barreno-Ripoll *et al.* 2008), que une a los pares origen-destino que cuenten con aeropuerto, como se muestra en la Figura 4, lo cual se logra mediante el uso de la Ecuación (7) y la Ecuación (8), las cuales fueron obtenidas de Herrera-García y Sánchez-López (2014).

$$d = r\Delta\sigma \quad (7)$$

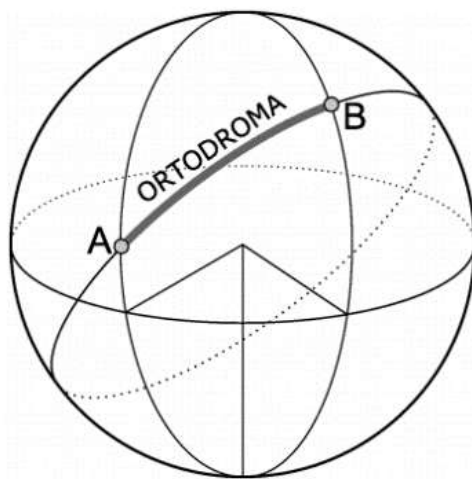
Donde:

$d$  = distancia ortodrómica entre el par de aeropuertos origen-destino.

$r$  = radio de la tierra (6,372.8 kilómetros)

$\Delta\sigma$  = ángulo central, en radianes, formado por el par de aeropuertos.

Figura 4:  
Distancia ortodrómica



Fuente: Adaptado de Barreno-Ripoll et al. 2008

El ángulo central se obtiene mediante la Ecuación (8):

$$\Delta\sigma = \arctan\left(\frac{\sqrt{(\cos\phi_f \text{sen}\Delta\lambda)^2 + (\cos\phi_s \text{sen}\phi_f - \text{sen}\phi_s \cos\phi_f \cos\Delta\lambda)^2}}{\text{sen}\phi_s \text{sen}\phi_f + \cos\phi_s \cos\phi_f \cos\Delta\lambda}\right) \quad (8)$$

Donde:

$\phi_s$  = Latitud del aeropuerto origen.

$\phi_f$  = Latitud del aeropuerto destino.

$\Delta\lambda$  = Diferencia entre la longitud del aeropuerto origen y la del aeropuerto destino.

Se comenzó con la definición de los puntos, dentro de las rutas en estudio, que son factibles para contar con una estación de FAV. Esto se realizó en base dos criterios: el primero referente a la demanda de transporte en los corredores que, de acuerdo a Alias (1984), se debe identificar como grande respecto a los otros corredores aledaños; y el segundo fue el de la separación espacial entre estaciones, establecido en Gutiérrez (2004) y en López (2014). Una vez hecho esto, se obtuvo la distancia total que la LAV recorrerá al unir los nodos extremos, de los resultados conseguidos por Herrera y Sánchez (2014), quienes consideraron una velocidad para la LAV de 300 km/hr, lo que logra velocidades de operación promedio de 240 km/hr (Nishijima *et al.*, 2013). Esta distancia se relacionó con su correspondiente distancia carretera, que se obtuvo de la aplicación Traza tu Ruta (SCT, 2019), y resultó un factor de abatimiento de curvatura<sup>1</sup>. Este factor de abatimiento se aplicó a las distancias carreteras entre nodos intermedios, y el valor obtenido se adoptó como la distancia que la LAV recorre entre estos. Se

---

<sup>1</sup> La geometría de las líneas ferroviarias de alta velocidad considera curvas horizontales y verticales con radios amplios, así como rampas de acceso a estas con pendientes reducidas. Por lo tanto, los trazados ferroviarios de alta velocidad se aproximan a la forma rectilínea en mayor proporción que los trazados carreteros (López-Pita, 2014). Entonces, el factor de abatimiento de curvatura se obtiene al dividir la distancia ferroviaria de alta velocidad (Herrera-García y Sánchez-López, 2014), entre su correspondiente distancia carretera (SCT, 2019).

encontró que la LAV competirá con el autotransporte, en el caso de los viajes de corto y largo itinerario, y, además, con el transporte aéreo, en el caso de los viajes de largo itinerario.

### **3.3. Determinación de los tiempos de viaje**

En el modo carretero, la velocidad promedio se obtuvo en base a los datos que se registran en los sitios de control Velocidades de Punto, que la SCT tiene distribuidos en la red carretera nacional (SCT, 2014, 2014, 2014c, 2014d, 2014e y 2014f), al desagregar en dos tipos de vehículos, el automóvil particular, y el autobús. En el caso del tren de alta velocidad se adoptó una velocidad de operación promedio de 240 km/hr, de acuerdo a lo investigado en Nash (2015) y Nishijima *et al.* (2013), quienes determinaron que este valor es el logrado por los trenes de alta velocidad al circular en líneas ferroviarias de alta velocidad nuevas, diseñadas para operar a 300 km/hr.

Al dividir la distancia carretera entre la velocidad promedio lograda por el automóvil y el autobús, de igual forma a como se hizo para la LAV con el TAV, se obtienen los tiempos de viaje que a cada medio de transporte le toma realizar el recorrido entre estaciones intermedias y/o en el itinerario completo. En el transporte aéreo los tiempos de recorrido pueden obtenerse directamente en las plataformas electrónicas que las diferentes aerolíneas comerciales tienen disponibles al público. Este tiempo de recorrido representa el valor de la impedancia para cada uno de los pares origen-destino considerados. Estas impedancias se organizaron matricialmente de acuerdo al arreglo propuesto en Rodrigue *et al.* (2009).

Además del tiempo transcurrido en el viaje, posteriormente, para los viajes en autobús, tren de alta velocidad y avión, se consideró el tiempo que el usuario invierte en el acceso y espera en la terminal del origen, así como en el egreso, en la terminal destino. Este tiempo incluye lo que se consume en las labores de documentación de equipaje y el paso por los controles de seguridad. La magnitud de este tiempo se tomó de lo investigado en De Rus y Roman (2006) y Nash (2015), así como lo recomendado por las líneas comerciales aéreas y de autobuses que ofrecen el servicio actualmente en las rutas estudiadas (Interjet, 2019; Aeroméxico, 2019; y PP,



2019). La sumatoria del tiempo transcurrido en el viaje más el tiempo consumido en las actividades previas a este, se utilizó en el cálculo de las matrices de accesibilidad, y en el cálculo del valor del tiempo para los usuarios. Para el automóvil, de acuerdo a De Rus e Inglada (1993), el tiempo que los usuarios emplean en estas acciones previas se considera nulo.

### 3.4. La demanda en los corredores de transporte

La demanda de transporte, tal como lo explica De Rus et al. (2003), puede definirse como la disposición a pagar que manifiestan los consumidores por utilizar determinada infraestructura o servicio de transporte. Mientras que la oferta de transporte, de acuerdo a Islas-Rivera et al. (2002) representa la cantidad de bienes y servicios que un productor desea ofrecer a un precio determinado. Como puede observarse, de acuerdo a Cal y Mayor y Cárdenas (2007), la demanda es una medida del número de vehículos o personas que esperan ser servidos, mientras que la oferta es la medida de estos que pueden ser servidos.

Para computar a la demanda y a la oferta del transporte pueden utilizarse las siguientes unidades de medida, las cuales también se mencionan en Islas-Rivera et al. (2002):

**Viaje:** es la unidad más directa de medir la demanda del transporte, los deseos de movimiento en las personas y sus bienes. Es difícil relacionarla con la oferta.

**Pasajeros:** esta unidad resulta útil para medir tanto la demanda como la oferta de transporte. Por ejemplo, una empresa de transporte, al conocer la cantidad de viajeros que requieren el servicio, podrá calcular el espacio necesario para esas personas. Utilizar esta unidad implica que los viajes largos se valoren igual que los viajes cortos.

**Pasajeros-kilómetro [pax-km]:** Esta unidad de medida es útil debido a que distingue entre las magnitudes del viaje. Se obtiene al multiplicar la cantidad de viajeros por la distancia que estos recorren. Por ejemplo, 10 pasajeros demandando viajes de 1.5 km (15 pax-km) requieren más oferta que esos mismos 10 pasajeros demandando sólo 1 km en sus viajes (10 pax-km).

**Pasajeros-kilómetro por unidad de tiempo (pax-km/tiempo):** En ocasiones, resulta necesario conocer la frecuencia con que se presenta la demanda en relación al tiempo; por ejemplo, es muy importante saber si los 10 pax-km demandados se presentan en una hora o en media hora.

**Vehículo:** De manera análoga al “pasajero”, la demanda de transporte puede medirse por cantidad de vehículos. A partir de esta unidad también pueden construirse las unidades [veh-km] o [veh-hora], incluso la más elaborada [veh-km/hora].

**Tonelada, Ton-Km, Ton-Km/hora.** Estas unidades se aplican para el caso de transporte de mercancías; en lugar de viajes o envíos, se puede ser más preciso para identificar el esfuerzo que se requiere utilizando estas unidades de medida.

En México una importante fuente de información para conocer la demanda y oferta en los transportes carretero y aéreo nos la brinda la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Para el caso del autotransporte, a través de dos instituciones: la empresa paraestatal Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) y la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST). Para el transporte aéreo, mediante la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC).

Para conocer la demanda en el transporte carretero, CAPUFE y DGST efectúan durante todo el año conteos del tránsito mediante una red de estaciones permanentes que consisten en un conjunto de aparatos automáticos contadores de vehículos distribuidos en distintos tramos de la red carretera (SCT, 2018 y 2018b). Además, esta información es calibrada mediante estaciones de aforo con clasificación vehicular en periodos de siete días; de este modo, en 2018, se colocaron 7,005 contadores automáticos temporales distribuidos en toda la red carretera nacional pavimentada (SCT, 2018). Gracias a la clasificación vehicular es posible diferenciar entre los vehículos que son utilizados para el transporte de pasajeros y aquellos destinados al movimiento de mercancías.

Los datos sobre la demanda en el transporte aéreo pueden obtenerse del documento “La Aviación Mexicana en Cifras”, que año con año publica la DGAC. El más reciente de estos documentos data del año 2018, y presenta los datos estadísticos compilados entre 1991 y 2017 (SCT, 2018d), además de estadísticas operacionales para el año 2018 (SCT, 2018e). Aquí destacan, para el caso de la demanda, la cantidad de pasajeros y mercancías transportada en servicio doméstico e internacional y, para el caso de la oferta, el parque aeronáutico con el que se cuenta y las rutas de servicio (nacional e internacional) que se ofrecen. Toda esta información es proporcionada a la SCT directamente por las aerolíneas.

### **3.4.1. Los aforos vehiculares**

Para el modo carretero, se investigó el volumen de tránsito que ocurre en los arcos y su clasificación vehicular; se utilizaron las bases de datos de SCT (2017, 2018 y 2018b) donde se compendian los aforos vehiculares en las estaciones permanentes de conteo de vehículos, y se determina físicamente la composición vehicular. Los automóviles se identifican como vehículos tipo A, los autobuses como vehículos tipo B y los camiones de carga, agrupan sus distintas configuraciones, y se denominan tipo C. El comportamiento del tráfico en el autotransporte, para conocer cuántos vehículos cubren cada itinerario, se adoptó de la información disponible en SCT (2017d), en el apartado del estudio de origen y destino.

Para el cálculo del consumo energético, y de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), cada tipo vehicular obtenido en los aforos mencionados, se diferenció entre aquellos que utilizan gasolina y diésel para su funcionamiento. De Cadengo *et al.* (2018) se obtuvo la proporción vehicular por tipo de combustible. De manera que, de la totalidad de vehículos considerados en el estudio, a gasolina funcionan el 97.01% del tipo A, el 18.72% del tipo B y el 10.27% del tipo C. Los porcentajes correspondientes para el diésel son el complemento de los ya mencionados para cada tipo de vehículo. Si bien existen otros tipos de combustible para alimentar la tracción de los vehículos en el modo carretero, estos no se consideraron en la presente investigación debido a su bajo porcentaje de participación en el total del parque vehicular mexicano (Sheinbaum-Pardo y Chávez-Baeza, 2011), durante el año en el cual se basó el estudio.

Para el transporte aéreo, la cuantía de vuelos que realizaron el viaje entre los nodos extremos de cada ruta estudiada se obtuvo al consultar el sitio electrónico de acceso público Expedia (2019) y la base de datos de SCT (2018b); la primera referencia mostró que, para el trayecto redondo directo GDL-CDMX, hay cuatro compañías aéreas que ofertan el servicio: Aeromexico, Interjet, Viva Aerobus y Volaris, y para el trayecto redondo directo CDMX-VER son tres las compañías que lo ofrecen: Aeromar, Aeromexico y Viva Aerobus; SCT (2018b) mostró la cantidad de vuelos, en el año de estudio, entre cada par origen-destino, la cual se cotejó con la cantidad de vuelos diarios, por compañía, que se expone en Expedia (2019), para llegar a la cantidad de vuelos que se consideraron en el presente trabajo.

Cuando no se encontró información de aforos vehiculares específicos para el año de estudio, se proyectó el volumen obtenido del año disponible, para cada tipo de vehículo en cada arco, haciendo uso del procedimiento descrito en el Epígrafe 0 de este documento.

La cantidad de trenes en cada tipo de viaje se determinó en base al número de usuarios atendidos y a la cantidad de carga transportada. Se consideró que los trenes utilizados serán tipo Renfe Serie 112, el cual tiene capacidad de 365 plazas para pasajeros (Ferropedia, 2019). La cantidad de carga que transportará el TAV se estimó como lo que Liang *et al.* encontraron se transporta en los TAV de Alemania, 500 toneladas por tren. Se consideró que el número de viajeros y el tonelaje de la carga transportada es directamente proporcional a la cantidad de vehículos que circulan en los arcos estudiados (Klein y Smart, 2017; Liang, *et al.*, 2016). Esta premisa se utilizó para determinar la reducción del aforo vehicular y de las operaciones aéreas provocada por la inclusión del servicio ferroviario de alta velocidad en los corredores, y estimar la capacidad liberada en ambos modos.

### **3.4.2. La cantidad de usuarios**

En el modo carretero, la cantidad de usuarios se determinó multiplicando el número de vehículos, por su cantidad de ocupantes promedio, para el caso de los A y B, o por su carga promedio, para el caso de los C. Los ocupantes y carga promedio se obtuvieron de SCT (2017b), que es una base de datos con resultados para las encuestas de origen, destino y peso, elaborada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en puntos distribuidos a lo largo de la red

carretera mexicana. Respecto a la cantidad de usuarios en el modo aéreo, esta se obtuvo de las estadísticas disponibles en SCT (2018d y 2018e), que fueron recopiladas por la Dirección General de Aeronáutica Civil, y se les aplicó un procedimiento análogo al descrito en el modo carretero para proyectar este volumen a los respectivos años censales que se consideraron en esta investigación.

Para determinar la cantidad de usuarios en el TAV, se definieron dos fuentes desde las cuales provendrán estos viajeros: i) aquellos que son atraídos desde otro medio, o demanda migrante, y ii) aquellos que recién optaron por realizar el viaje gracias a la presencia del servicio ferroviario de alta velocidad, o demanda inducida. En lo que respecta a la primera fuente, la demanda que migrará, se aprovechó la encuesta de preferencias declaradas realizada por Modelística (2014), quien obtuvo que, de los viajeros en transporte privado (automóvil) un 17% migrarían al TAV y, de los viajeros en transporte público (autobús) lo haría el 8.04%; mientras que, para el transporte público en avión, Herrera-García y Sánchez-López (2014) obtienen que un 17.44% de los pasajeros migrarán al TAV. La cantidad de viajeros inducidos por la LAV, se estimó representa el 10% de los atraídos, tal como lo obtuvieron Fernández-Jañez (2012) y García-Álvarez (2016), en donde se presentó un estudio sobre los datos del primer año de explotación de la LAV Madrid-Valencia y se estudió la generación de viajes en este modo de transporte, respectivamente.

La cantidad de carga que se transportó en el TAV, en lugar de hacerlo por el medio convencional, se estimó en base a la experiencia de Liang *et al.* (2016), quienes encontraron que, para el caso de Alemania, Francia y China, la oferta de LAV en los corredores de transporte, desvió entre el 5% y el 15% de la carga transportada, consistente en carga consolidada y mensajería, proveniente de los modos convencionales. En la presente investigación se consideró un promedio de los valores reportados, un 10% del total de la carga.

En los viajes de corto itinerario, es decir, aquellos que los usuarios realizan entre nodos intermedios de las líneas estudiadas, se comparó exclusivamente a los medios de transporte existentes en el modo carretero con el propuesto modo ferroviario de alta velocidad. Para los

viajes de itinerario completo, aquellos que se realizan entre los nodos extremos de cada línea, además de los modos mencionados, se incluyó al avión.

### 3.5. El valor del tiempo de los usuarios

En este epígrafe se le asignó un valor monetario al tiempo que los usuarios dedican a viajar, siendo esta cuantía dependiente de la causa por la cual las personas se desplazan de un lugar a otro. La motivación de los traslados puede ser diversa, De Rus y Nash (2007) establecen tres categorías, ocio, desplazamiento al trabajo y negocio; sin embargo, para los casos de estudio del presente documento únicamente se tomó en cuenta a los dos primeros, ya que “muchos viajeros de negocios no tienen horarios fijos de trabajo, por lo que es difícil saber si el ahorro de tiempo será dedicado a trabajo extra o al ocio” (Alberro-Semerena, 2008, p. 217). Para determinar los motivos por los cuales las personas viajan en cierto corredor es necesaria la aplicación de encuestas directamente con los viajeros. Ejemplos de este tipo de encuestas puede encontrarse en SCT (2013 y 2013b) y en ISA (2015) donde se incluye un apartado para los motivos del viaje de los usuarios carreteros en las encuestas origen-destino, en la presente investigación se utilizaron las encuestas disponibles para los corredores en estudio elaboradas por las referencias recién citadas.

En base a Torres *et al.* (2019), el valor del tiempo para los usuarios del modo carretero, en México, se divide en dos categorías: viajes por motivo de trabajo y viajes por realizados por cualquier otro motivo.

$$VT_T = \frac{FIP \cdot SMGP \cdot 7}{HTP} \quad (9)$$

La Ecuación (9), se utiliza para el caso del valor del tiempo en viajes por motivo de trabajo, para los viajes realizados por motivos ajenos a este, se emplea la Ecuación (10):

$$VT_P = 0.6 \cdot VT_T \quad (10)$$

Donde:

$VT_T$  = Valor del tiempo por motivo de trabajo, en pesos por hora.

$FIP$  = Factor de ingreso promedio de la población en SMGP.

$SMGP$  = Salario mínimo general promedio, en pesos por día.

$HTP$  = Horas promedio trabajadas por semana.

$VT_P$  = Valor del tiempo por motivo de placer, en pesos por hora.

Para homologar la nomenclatura a aquella que es empleada por De Rus y Nash (2007), todos aquellos motivos de viaje que sean distintos al trabajo, se agruparán en el presente documento como ocio.

En lo que respecta valor del tiempo de los usuarios del transporte aéreo en México, Alberro-Semerena (2008) considera que lo obtenido en las Ecuaciones (9) y (10) debe multiplicarse por tres, suponiendo que los usuarios de este servicio perciben como mínimo esta cantidad de salarios mínimos.

El valor del tiempo para los usuarios que migraron al tren de alta velocidad se consideró idéntico al de su modo o medio de procedencia; por ejemplo, a aquellos usuarios del TAV que provienen del modo aéreo se les tasó su tiempo de acuerdo al valor de este modo, descomponiéndolo en trabajo y ocio según corresponda, y de manera análoga para los usuarios provenientes del modo carretero en los sus dos medios considerados, el automóvil y el autobús.

El valor del tiempo para los usuarios que representan el tráfico inducido por el TAV se consideró el promedio del utilizado para el modo carretero y el modo aéreo en sus dos modalidades, trabajo y ocio, donde corresponda.

En los viajes de corto itinerario se compararon dos escenarios, el primero con la configuración actual en cuanto a la oferta de transporte y el segundo incluyendo en esta al tren de alta velocidad ferroviaria. Por tratarse de recorridos que enlazan nodos intermedios entre sí, se

comparó únicamente al modo carretero en sus dos medios que transportan pasajeros, el automóvil y el autobús, con el modo ferroviario de alta velocidad.

En el escenario actual, para cada medio del modo carretero, se tomó la cantidad de usuarios en base a la información obtenida previamente en esta metodología, se desgregó la en cuantas personas viajan por motivo de trabajo y cuantas por motivo de ocio; cada una de estas cantidades se multiplicó por su respectivo valor del tiempo y, finalmente, por su correspondiente tiempo de recorrido. De esta forma se obtuvieron cuatro series de resultados: dos series para el automóvil, diferenciados en valor del tiempo en viajes por trabajo y valor del tiempo en viajes por ocio, y dos series para el autobús, diferenciados análogamente al automóvil. Se realizó la suma aritmética de los cuatro valores en su respectivo arco, que, al sumarlos entre sí, arrojó finalmente el valor del tiempo en el año considerado.

Respecto al escenario propuesto, se procedió de manera similar, pero en este caso los resultados consistieron en seis series de datos: dos series para el automóvil, dos series para el autobús y dos series para el tren de alta velocidad, distinguiendo en cada una de estas el valor del tiempo por motivo de trabajo y por motivo de ocio. La suma aritmética de los seis valores de un arco nos arrojó el valor del tiempo en este y, finalmente, al sumar el valor del tiempo total para cada arco, se obtuvo el valor del tiempo en el año elegido.

Al comparar los respectivos valores totales del tiempo en el año seleccionado, entre el escenario actual y el escenario hipotético, se determinó si, para los viajes de corto itinerario resultó benéfico o infructuoso la inclusión del tren de alta velocidad en la oferta de transporte.

En los viajes de corto itinerario, de igual forma, se compararon dos escenarios, el primero con la configuración actual en cuanto a la oferta de transporte y el segundo incluyendo en esta al tren de alta velocidad ferroviaria. Por tratarse de recorridos que enlazan los nodos extremos, en este caso ya se incluyó al avión como modo competidor. De esta forma se compararon tres modos: el aéreo, el carretero, con el automóvil y el autobús como medios, y el ferroviario de alta velocidad. El procedimiento para la obtención de datos y el desarrollo de las operaciones aritméticas siguió la misma lógica que la previamente descrita, pero se diferenció el hecho de que, por la inclusión del modo aéreo, los resultados, para el escenario actual, se ordenaron en seis series de datos, por motivo de trabajo y motivo de ocio, tanto para el automóvil, el autobús



y el avión, mientras que para el escenario propuesto, se obtuvieron en ocho series de datos, automóvil, autobús, avión y TAV, cada una con los dos motivos de viaje mencionados.

De nueva cuenta, al comparar los respectivos valores totales del tiempo en el año seleccionado, entre el escenario actual y el escenario hipotético, se determinó si, para los viajes de corto itinerario resultó benéfico o infructuoso la inclusión del tren de alta velocidad en la oferta de transporte.

### **3.6. La productividad y la cohesión territorial**

#### **3.6.1. Obtención de la población en cada nodo**

La cantidad de habitantes en cada uno de los nodos que conforman la red en estudio, o en cada una de las líneas individuales es un dato esencial para determinar el índice de accesibilidad que se utilizó en la definición de la cohesión interregional que se logró al incluir el nuevo modo de transporte en la oferta para los usuarios. El tamaño de la población se obtiene de los censos de población y vivienda de los años 2000 y 2010, elaborados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000 y 2010), en cada localidad.

Cuando alguno de los nodos considerados involucra una zona metropolitana (conformada por más de un municipio), de acuerdo a lo definido por INEGI, se sumó la población de cada municipio para incluirlo en su respectiva metrópoli. Con esta información de estos años censales se calculó la tasa de crecimiento poblacional promedio por año, haciendo uso de la Ecuación (6).

Para obtener la formulación que relacione a la productividad con la accesibilidad de cada par origen destino, se investigaron los datos económicos más recientes disponibles, que corresponden a los años 2003, 2008 y 2013, en los cuales INEGI realizó censos económicos (INEGI, 2020), según consta en sus reportes correspondientes a cada año inmediato posterior al censado; debido a esto, las poblaciones de cada zona metropolitana y cada ciudad, donde corresponda, se proyectaron hacia estos años haciendo uso de la Ecuación (5).

### 3.6.2. La accesibilidad potencial y los índices de accesibilidad

En Goodall (1987) se define que la accesibilidad “es la facilidad con que se puede alcanzar cierto sitio (destino), desde otros puntos del territorio (orígenes), por lo que sintetiza las oportunidades de contacto e interacción entre determinados orígenes y destinos”. En el mismo sentido, Johnston et al. (2000), indica que “accesibilidad es la oportunidad de interacción y contacto entre orígenes y destinos”. A partir de estas definiciones, en este trabajo se propone entender como accesibilidad al potencial de interacción entre los mercados disponibles y la población objetivo de las ciudades que se enlazan mediante algún medio de transporte.

Existen diversos indicadores de accesibilidad, en Garrocho y Campos-Alanis (2006) se explica que estos pueden clasificarse en cinco categorías: i) de separación espacial, ii) de oportunidades acumulativas, iii) de interacción espacial, iv) de utilidad y v) espacio-temporales. Dada la definición establecida anteriormente para la accesibilidad, en este trabajo se realiza la estimación del índice de accesibilidad mediante un indicador de interacción espacial a partir de la accesibilidad potencial y jerarquizando los medios de transporte de acuerdo a la cantidad de usuarios que utilizan cada uno de estos. La forma funcional de la accesibilidad potencial se tomó de Durán-Fernández y Santos (2014b), tal como se presenta en la Ecuación (11):

$$A_i = \sum_j \frac{P_j}{d_{i,j}^\theta} \quad (11)$$

En esta ecuación,  $P_j$  es la población en  $j$  en el año de estudio,  $d_{i,j}$  es el tiempo de viaje entre las localidades  $i$  y  $j$ , y  $\theta$  es la elasticidad del potencial de mercado con respecto a la impedancia. Para el presente trabajo se consideró adecuada esta forma funcional del índice de accesibilidad debido a que toma en cuenta a la oferta, representada por el tamaño de la población, como factor de atracción, y los costos de transporte, representados por el tiempo invertido al efectuar el recorrido entre las localidades, como impedancia a la realización del viaje.

En este punto, al conocerse los tiempos de recorrido y la cantidad de habitantes en cada localidad, se construyeron las matrices de accesibilidad potencial para cada una de las rutas,

utilizando el arreglo matricial propuesto por Rodrigue *et al.* (2009), donde en las columnas se colocan los orígenes y en las filas los destinos. Se formó una matriz de accesibilidad potencial para cada ruta, cada modo de transporte, y para cada año en estudio.

Se realizó la división aritmética de la población en cada destino entre el tiempo total de viaje para cada medio de transporte, que fue elevado al valor recomendado como elasticidad de mercado por Durán-Fernández (2014), para cada par origen-destino. El tiempo total de viaje corresponde al tiempo de recorrido efectivo más el tiempo de espera, acceso y egreso.

Se colocó cada resultado en su correspondiente celda del arreglo matricial propuesto en Rodrigue *et al.* (2009), y, al aplicar la Ecuación (11), se obtuvo la accesibilidad potencial para cada par origen-destino.

Figura 5:  
Modelo matriz de accesibilidad potencial

	<i>D1</i>	<i>D2</i>
<i>O1</i>	0	$\frac{P_{ZMLEÓN,2014}}{d_{GDL-León,auto}^{0.73}}$
<i>O2</i>	$\frac{P_{ZMGDL,2014}}{d_{GDL-León,auto}^{0.73}}$	0

Puede observarse que las casillas en la diagonal principal de la matriz de accesibilidad aparecen sin valor, esto es debido a que el presente trabajo se enfoca en los viajes entre regiones, y la comunicación entre estas; razón por la cual los viajes internos de cada localidad no se consideraron.

La Figura 5 muestra la forma en que se calculó la accesibilidad potencial para un par origen-destino de corto itinerario; para el caso de los viajes de itinerario completo, el procedimiento es análogo, pero incrementando la cantidad de filas y columnas en el mismo número de nodos considerados.

Al realizar el cálculo de la accesibilidad potencial se sumó a los tiempos de viaje el tiempo consumido en el acceso, espera y egresos que cada medio de transporte requiere.

La accesibilidad potencial se plasmó en dos tipos distintos de tablas donde se resumen, en el primer tipo de tabla, el valor para cada par origen-destino de corto itinerario y, en el segundo

tipo de tabla, el valor para el par de itinerario completo, es decir, se consideró un viaje directo entre los nodos extremos.

El índice de accesibilidad corresponde a la sumatoria de todos los valores en cada una de las celdas en su respectiva matriz de accesibilidad potencial dividido entre un valor de accesibilidad patrón. En el presente documento se consideró como valor patrón a la accesibilidad más alta ofrecida por cualquiera de los medios ofertados, incluyendo el hipotético tren de alta velocidad. Este trabajo estudió la cohesión territorial entre las regiones que fueron enlazadas por la posible línea de alta velocidad; debido a esto se determinó únicamente el índice de accesibilidad para los viajes de corto itinerario. Entonces, el índice de accesibilidad se presentó en un único tipo de tabla, donde se plasmó de manera organizada el índice de accesibilidad para los viajes entre todos los nodos de la red considerada, haciendo una diferenciación, a partir de este momento, entre los medios ofertados en la actualidad y el tren de alta velocidad que hipotéticamente se incluyó en la oferta disponible a los usuarios.

Se realizó una jerarquización entre los medios de transporte terrestre considerados en este estudio mediante una valoración de la preferencia que manifiestan los usuarios en cada una de las rutas considerada para los medios actualmente ofertados. Esta preferencia se determinó mediante tres pasos: en primer lugar, se investigó el volumen de tránsito que ocurre en los arcos y su clasificación vehicular; se utilizaron las bases de datos de SCT (2017, 2018 y 2018b) donde se compendian los aforos vehiculares en las estaciones permanentes de conteo de vehículos, y se determina físicamente la composición vehicular; para esta investigación se consideraron únicamente los vehículos que transportan pasajeros, es decir los automóviles particulares y el autobús. En segundo lugar, se proyectó el volumen obtenido para cada tipo de vehículo en cada arco a los respectivos años censales considerados; se utilizó la tasa de crecimiento obtenida previamente tal como se describió esta metodología. En tercer lugar, se definió la cantidad de pasajeros que utilizaron cada modo existente multiplicando el número de cada tipo vehicular, por su cantidad de ocupantes promedio; los ocupantes promedio se obtuvieron de SCT (2017b), que es una base de datos con resultados para las encuestas de origen, destino y peso, elaborada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en puntos distribuidos a lo largo de la red carretera mexicana.

Para determinar la cantidad de usuarios en el TAV, se definieron dos fuentes desde las cuales provendrán estos viajeros: i) aquellos que son atraídos desde otro medio, o demanda migrante, y ii) aquellos que recién optaron por realizar el viaje gracias a la presencia del servicio ferroviario de alta velocidad, o demanda inducida. En lo que respecta a la primera fuente, la demanda que migrará, se aprovechó la encuesta de preferencias declaradas realizada por Modelística (2014), quien obtuvo que, de los viajeros en automóvil un 17% migrarían al TAV y, de los viajeros en autobús lo haría el 8.04%. Para la segunda fuente, la demanda que será inducida, se utilizó la teoría explicada en García-Álvarez (2016), y la experiencia plasmada en Fernández-Jañez (2012), quienes coinciden en que, en un escenario conservador, el 10% de los usuarios del TAV provendrán de este tipo de demanda.

La cantidad total de usuarios que viajaron en los medios actualmente ofertados, para cada año censal, se adoptó como valor de referencia para obtener el ponderador con el cual participa cada medio considerado en este trabajo, al dividir cada cantidad de usuarios de cada medio, incluidos los trenes de alta velocidad proyectado, entre la cantidad de usuarios que actualmente realizan el viaje entre cada par origen-destino, se obtuvo el ponderador para cada índice de accesibilidad.

### **3.6.3. Datos económicos y la adaptación del modelo**

Para el análisis de este trabajo se utilizaron tres bases de datos, generadas por el Censo Económico Nacional 2003, 2008 y 2013 (INEGI, 2020) en México. El conjunto de datos es una encuesta exhaustiva, que presenta datos de todos los municipios y para cada unidad económica en el país, desagregada en 20 sectores de actividad económica, y en 18 características principales de variables censales.

Una vez que se definieron los nodos intermedios para cada una de las rutas estudiadas en el presente artículo, se depuraron las bases de datos de INEGI (2020), para seleccionar aquellos municipios donde se localizó estación de la hipotética red de alta velocidad, los sectores de actividad económica que son comunes para todos los pares origen-destino de corto itinerario y las características principales de variables censales de cada actividad económica que involucran los datos observados necesarios para obtener la productividad, la cantidad de trabajadores, el

consumo intermedio y el capital de activos fijos. En el caso de zonas metropolitanas, se sumó el valor reportado en cada municipio que las conforma para cada característica económica. En el presente trabajo se utiliza un modelo de regresión lineal múltiple (Montgomery y Runger, 1996), cuya forma general está dada por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (12)$$

En el cual se busca que la variable de respuesta, o variable dependiente,  $Y$  esté relacionada con las  $k$  variables de regresión, o variables independientes,  $X$ . Los parámetros  $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$ , se conocen como coeficientes de regresión. Este modelo describe un hiperplano en el espacio de dimensión  $k$  formado por las variables de regresión  $\{X_j\}$ . El parámetro  $\beta_j$  representa el cambio esperado en la respuesta  $Y$  por unidad de cambio en  $X_j$  cuando todos los demás regresores  $X_i$  ( $i \neq j$ ) se mantienen constantes.

Este modelo de regresión lineal se emplea debido a que, como lo menciona Montgomery y Runger (1996), es útil como función de aproximación. Es decir, se desconoce la verdadera relación funcional entre la variable dependiente  $Y$ , y las variables independientes  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , pero sobre ciertos rangos de las variables independientes el modelo constituye una aproximación adecuada. Los coeficientes de regresión se estiman utilizando el método de los mínimos cuadrados ordinarios; es decir, la versión más sencilla de los modelos multivariados, para hallar simultáneamente los parámetros  $\beta_j$  que mejor describan los datos recopilados.

El modelo presentado en la Ecuación (12) se adaptó a una ecuación log lineal que relacionó a la productividad con el consumo intermedio por trabajador y el capital fijo por trabajador, más una variable independiente dicotómica y el índice de accesibilidad ponderado de cada par origen-destino, tal como se describe a continuación:

$$\ln\left(\frac{val. agr.}{pers. ocup}\right) = \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{cons. inter.}{pers. ocup}\right) + \beta_2 \ln\left(\frac{cap. fij.}{pers. ocup}\right) + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \quad (13)$$

Las variables observadas correspondientes a los datos económicos obtenidos de los censos INEGI (2020) se consideraron en su forma logarítmica debido a que es la que mejor ajusta a los datos dispersos, de acuerdo a Durán-Fernández y Santos (2014b); sin embargo, Montgomery y Runger (1996) describen como los modelos que tienen una estructura más compleja que la dada por la Ecuación (12) , “con frecuencia pueden analizarse con las técnicas de la regresión lineal múltiple” (p. 533). Por lo tanto, en este artículo se consideró que las variables observadas fueran, de acuerdo a lo previamente definido en Durán-Fernández y Santos (2014b).

Para el caso de la variable dependiente:

$$Y = \ln(\text{productividad}) = \ln\left(\frac{\text{valor agregado}}{\text{personal ocupado}}\right) \quad (14)$$

Para el caso de la primera variable independiente:

$$X_1 = \ln\left(\frac{\text{consumo intermedio}}{\text{personal ocupado}}\right) \quad (15)$$

Y, para el caso de la segunda variable independiente:

$$X_2 = \ln\left(\frac{\text{capital fijo}}{\text{personal ocupado}}\right) \quad (16)$$

Además, de acuerdo a este estudio en particular, y para un mejor ajuste en nuestro modelo, se definieron las otras dos variables independientes como:  $X_3$ , una variable ficticia dicotómica a la que se le asignó el valor de uno si cuando se evaluó el sector 52 de actividad económica, y el valor de cero para cualquier otro de los sectores presentes en el par origen-destino (Giles, 2011), y  $X_4$  la variable que representa el índice de accesibilidad ponderado por cada par.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \quad (17)$$

La Ecuación (17) es la representación formal del modelo aplicado en el presente trabajo para la obtención de la productividad predicha; se estableció al sustituir, en la Ecuación (12), el valor de las variables que se mostraron en las Expresiones (14) a (16), además de aquella que se definió como dicotomía y de la que representa a la accesibilidad.

#### **3.6.4. Análisis de regresión para el modelo**

Los coeficientes  $\beta_j$  del modelo presentado en la Ecuación (17), se estimaron utilizando el método de mínimos cuadrados, en cinco distintos análisis.

El primer análisis consideró la totalidad de nodos en la red proyectada, los sectores de actividad económica afines a estos nodos y las características principales de variables censales de todos los pares origen-destino. En este análisis se excluyó la variable independiente de accesibilidad ponderada,  $X_4$ , ya que se realizó con dos fines: i) para comprobar que el sector 52 tiene más productividad laboral respecto al resto de sectores, y ii) determinar la cantidad de veces que esta productividad excede a la de los demás. Como ambas condiciones se cumplieron, quedó manifiesto la utilidad de haber definido en este sector la variable ficticia dicotómica.

El segundo análisis consideró la misma cantidad de observaciones que el primero, y, además, incluyó la variable independiente de accesibilidad ponderada  $X_4$  observada en los medios de transporte existentes. Esto sirvió para corroborar la funcionalidad del modelo, y comprobar que tan precisamente se explicó la relación entre las variables consideradas.

En el análisis tercero al quinto se consideró a las rutas estudiadas en el presente trabajo de manera individual. Se realizó un análisis de regresión para cada una de estas, teniendo como valores observados la productividad, el consumo intermedio por trabajador, el capital fijo por trabajador y el índice de accesibilidad ponderado, específicos para cada arco enlazando los nodos intermedios a cada ruta. Estas regresiones se utilizaron para determinar cuál de las dos opciones de ruta consideradas para el par Guadalajara – Ciudad de México será la que más



beneficios reportó en forma de mayores incrementos en la productividad predicha y, en el caso del par Ciudad de México – Veracruz, evaluar su factibilidad respecto a los medios existentes.

Con los modelos particulares que se obtuvieron en cada una de las regresiones se calculó el valor de respuesta para la variable dependiente  $Y$ , que representa la productividad por trabajador, en cada uno de los sectores económicos que se consideraron en el presente documento.

En la evaluación se tomaron los datos del año censal más reciente reportados por INEGI (2020), concernientes al Personal Ocupado, característica que representa en el presente artículo a la cantidad de trabajadores, el Consumo Intermedio, y el Acervo en Capital Fijo, en cada uno de los pares origen-destino enlazados por las LAV que aquí se consideraron. Con esta información se calculó, utilizando las Ecuaciones 20 y 21, el valor de las variables independientes  $X_1$  y  $X_2$ . Además, se incluyó la dicotomía correspondiente al sector económico 52, y el índice de accesibilidad ponderado (variables independientes  $X_3$  y  $X_4$ , respectivamente).

El índice de accesibilidad ponderado obtenido para los medios de transporte ofertados actualmente se utilizó como valor observado, en su variable independiente correspondiente, en los análisis de regresión, para obtener la ecuación que defina el comportamiento en cada ruta. En esta ecuación, para algún año censal previamente elegido, se sustituyó el valor del índice de accesibilidad ponderado en los medios existentes para obtener el valor predicho de la productividad; este resultado se comparó con el análogamente obtenido, pero ahora sumando los índices de accesibilidad ponderados de los medios existentes y el TAV.

### 3.6.5. La productividad predicha y la cohesión territorial

Con los modelos evaluados se sustituyeron los valores observados para los parámetros económicos y para la accesibilidad en cada uno de los nodos. Se sumaron los nodos aledaños entre sí y, de esta forma, se obtuvo la productividad predicha en el arco que los enlaza.

Se tomó como periodo de evaluación un decenio, desde el primer año censal estudiado y 10 años después de este, para obtener la variación en la cohesión y su tasa decenal de crecimiento, considerando que en el primer año censal no se contaba con la LAV propuesta y, al paso de diez años, está ya formaba parte en la oferta de transporte disponible.

### 3.7. El consumo energético.

El consumo energético en el autotransporte se calculó al replicar el proceso que se muestra en Solís y Sheinbaum (2015), que desagrega al modo carretero en sus diversos submodos. La presentación formal de este método se presenta en la Ecuación (18):

$$E_t = \sum [V_{ijt} \cdot D_{ijt} \cdot I_{ijt} \cdot PC_{ijt}] \quad (18)$$

Donde,  $E$  es el consumo energético total del autotransporte en el año  $t$ , en megajulios [MJ],  $V_{ijt}$  es la cantidad de vehículos del tipo  $i$  que utilizan el combustible  $j$ ,  $D_{ij}$  es la distancia recorrida, en Km,  $I_{ijt}$  es la intensidad de combustible del vehículo, en lt/Km, y  $PC_{ijt}$  representa el poder calorífico del combustible  $j$  considerado, en MJ/lt.

La cantidad de vehículos y su tipología se obtuvieron de los aforos vehiculares elaborados por SCT (2018), en donde se desagregan estos en vehículos tipo A, automóviles y utilitarios, tipo B, autobuses de pasajeros, y tipo C, camiones de carga en sus diversas configuraciones. Las estaciones de aforo que se utilizaron corresponden a las que se localizan en las Carreteras Federales que la aplicación Traza tu Ruta (SCT, 2019) recomendó para cada trayecto. El comportamiento de los usuarios, para conocer cuántos vehículos cubren cada itinerario, se adoptó de la información disponible en SCT (2017) en el apartado del estudio de origen y

destino. De Cadengo *et al.* (2018) se obtuvo la proporción vehicular por tipo de combustible. De manera que, de la totalidad de vehículos considerados en el estudio, a gasolina funcionan el 97.01% del tipo A, el 18.72% del tipo B y el 10.27% del tipo C. Los porcentajes correspondientes para el diésel son el complemento de los ya mencionados para cada tipo de vehículo. La distancia recorrida es igual a la que se obtuvo previamente de SCT (2019). La intensidad de combustible, se obtuvo de Cadengo *et al.* (2018), en donde se ponderaron los rendimientos de cada tipo vehicular en conjunto con la información mostrada en Sheinbaum y Chávez (2011). El poder calorífico de cada combustible se adoptó de acuerdo a lo reportado por la CONUEE (2020).

Para la obtención del consumo energético en el transporte aéreo, se empleó el criterio de la ICAO (2017) donde se presenta de manera tabular el consumo de combustible, en función del tipo de aeronave y la distancia del vuelo considerado.

La Tabla 8 muestra un extracto de la información presentada por ICAO. La elección de las aeronaves se elaboró en base a los modelos de aviones que utilizan las aerolíneas que cubren los recorridos directos de los arcos que se estudiaron, de acuerdo a las plataformas digitales de acceso público, Expedia (2019), Aeromar (2019), Aeromexico (2019), Interjet (2019), Viva Aerobus (2019) y Volaris (2019). El rango distancias de vuelo se adoptó de acuerdo a las distancias ortodrómicas, mientras que la cantidad de vuelos que realizan el viaje directo entre nodos extremos de cada ruta estudiada se obtuvo también de Expedia (2019), en su apartado de selección de vuelos. La cantidad de vuelos obtenida se proyectó hacia el año en estudio mediante la Ecuación (5), y se empleó la tasa de crecimiento reportada por SCT (2018b) para la cantidad de operaciones aéreas que se registraron en el periodo comprendido entre los años de 1991 y 2017. De acuerdo a Oiltanking (2020), el poder calorífico en la gasolina de aviación (AVGAS) es de 43.50 MJ/Kg, mientras que en el combustible de turbina (AVTUR) es de 43.02 MJ/Kg., valores que se adoptaron en la presente investigación para obtener la energía liberada.

Tabla 8:  
Consumo de combustible (Kg) y distancias de vuelo (Km)

	<b>Distancia de vuelo/ Consumo de combustible</b>	
	<b>231.5</b>	<b>463.0</b>
<b>Airbus A319</b>	1,596	3,259
<b>Airbus A320</b>	1,672	3,430
<b>Airbus A321</b>	1,909	3,925
<b>Boeing 737-700</b>	1,695	3,439
<b>Boeing 737-800</b>	1,715	3,494
<b>Aerospatale/Alenia ATR 72</b>	434	891
<b>Aerospatale/Alenia ATR 72-500</b>	413	843
<b>Embraer 170</b>	1,075	2,160
<b>Embraer 190</b>	1,338	2,688

*Fuente:* Adaptado de ICAO (2017)

La forma que se utilizó para estimar el consumo energético en la aviación puede deducirse como se presenta en la Ecuación (19):

$$E_t = \sum Combust \times P_c \quad (19)$$

Donde  $E_t$  representa el consumo energético de los aviones,  $Combust$ , es la cantidad de combustible utilizada, en Kg, y  $P_c$  el poder calorífico de cada combustible empleado.

La tracción del TAV se logra por la fuerza de locomotoras eléctricas, que son alimentadas con energía producida en plantas de combustión estacionaria, mediante cables aéreos (catenarias), o mediante un tercer riel en la vía, dispuestos en toda la longitud del trazado ferroviario. La energía eléctrica en México, de acuerdo a Ramos y Montenegro (2012), se genera en un 75.01% a partir de hidrocarburos, en un 6.23% a partir del carbón, en un 3.58% por reacción nuclear, en un 12.84% por métodos hidroeléctricos, en un 2.30% por geo-termoeléctricos y el 0.04% por eolo-eléctricos. La cantidad de energía consumida por los TAV al realizar cada recorrido se estimó en base a lo presentado por Xujie y Lu (2014), donde se obtuvo que, cuando el tren opera a una velocidad promedio de 240 km/hr, se consumen 0.20 MJ/Ton·Km, y 0.15 MJ/Ton·Km, para los viajes de corto itinerario y directos, respectivamente. La presentación formal para el cálculo de esta energía se presenta en la Ecuación (20).

$$E_t = \sum C_t \times Dist \times M_t \times Ud \quad (20)$$

En esta ecuación,  $E_t$  indica el consumo energético de los trenes,  $C_t$  la cantidad de trenes,  $Dist$  la distancia recorrida por estos,  $M_t$  la masa desplazada por el tren y  $Ud$  el consumo unitario de energía.

### 3.8. Las emisiones de GEI

Las emisiones de GEI se calcularon de acuerdo a la metodología indicada por IPCC (2006 y 2006b), en donde para cada modo de transporte se presenta una sistemática particular, pero en el caso de los tres considerados en el presente estudio se sigue la misma forma que se presenta en la Ecuación (21), donde  $GEI_j$  representa la cantidad total de gases efecto invernadero emitidos, en Kg, en el año  $t$ ,  $E_{st}$  es la energía consumida por el modo  $s$ , en TJ, y  $F$  es el factor de emisión por unidad energética, en Kg/TJ, dado por el combustible  $j$ .

$$GEI_t = \sum [E_{st} \cdot F_j] \quad (21)$$

Los factores de emisión, en el caso del autotransporte, IPCC (2006) recomienda considerar para la gasolina 69,300 Kg/TJ, y para el diésel 74,100 Kg/TJ, cuando el CO<sub>2</sub> sea el gas por cuantificar. En este modo de transporte, de acuerdo a IPCC (2014), únicamente se consideran las emisiones de este gas, puesto que las de CH<sub>4</sub> y de N<sub>2</sub>O resultan menores al 2% del total. La base de datos de la cual se extrajeron estos factores contempla otros tipos de combustible, como el gas LP y el gas natural, los cuales se descartaron en el presente estudio por su bajo porcentaje de participación en el consumo del autotransporte a nivel nacional (Sheinbaum y Chávez, 2011).

Para el transporte aéreo, IPCC (2006) indica que los factores de emisión de CO<sub>2</sub> para la AVGAS 70,000 Kg/TJ y para el AVTUR 71,500 Kg/TJ; y el factor de emisión de CO<sub>2</sub> debe multiplicarse

por 0.5 y por 2, para obtener el de CH<sub>4</sub> y de N<sub>2</sub>O, respectivamente. Debido a que las aerolíneas comerciales consultadas, no ofrecen información al público sobre la elección en el tipo de combustible empleado en cada viaje, en la actual investigación se adoptó el promedio de los factores de emisión de CO<sub>2</sub> del AVGAS y el AVTUR, el cual resultó en 70,750 Kg/TJ; por lo tanto el de CH<sub>4</sub> fue de 35,375 Kg/TJ, y el del N<sub>2</sub>O de 141,500 Kg/TJ.

En el TAV, que se alimenta por electricidad, si bien Ramos y Montenegro (2012) indicó los porcentajes de los combustibles que son utilizados en México como precursores de la energía eléctrica, no especificó el tipo de hidrocarburos o carbón utilizados para generar este fluido. Por lo tanto, en el presente trabajo se adoptó el promedio de los factores que indicó IPCC (2006) correspondientes a cada una de las dos categorías de combustible mencionadas.

Tabla 9:  
Factores de emisión (Kg/TJ) para los GEI por generar electricidad

<b>Gas emitido</b>	<b>Precursor de electricidad</b>	<b>Factor de emisión</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Hidrocarburos	83,363
	Carbones	101,267
<b>CH<sub>4</sub></b>	Hidrocarburos	333,452
	Carbones	3,949,413
<b>NO<sub>2</sub></b>	Hidrocarburos	83,363
	Carbones	202,534

*Fuente: IPCC (2006).*

En la Tabla 9 se presentan los factores de emisión para los tres GEI que, de acuerdo a IPCC (2006), genera la combustión de hidrocarburos y carbón para producir la electricidad. El listado original contempla 19 tipos de los primeros, y seis de los segundos, con diferentes factores de emisión para cada uno de los tres GEI. El valor que se presentó en este trabajo, para el factor de emisión de cada gas, corresponde al promedio aritmético que reporta IPCC.

### **3.9. La valoración del consumo energético y las emisiones de GEI**

Se realizó una comparación en pesos mexicanos, de los consumos energéticos y de emisión de gases efecto invernadero entre escenario existente, y el escenario hipotético, para evaluar cuál de los dos escenarios presentó el esquema menos oneroso.

Se averiguaron los costos de la energía consumida por cada modo de transporte en el año de estudio. Para el caso del autotransporte, se calculó un promedio de los valores mensuales reportados en la base de datos del INPC (2020), de donde resultó que el precio promedio al público, del diésel y las gasolinas fue de \$0.33 por cada mega julio. En el transporte aéreo, se realizó una investigación en la información presentada por Indexmundi (2020), y se llegó a un precio promedio por litro, tanto del AVGAS como del AVTUR, de \$0.28 por cada mega julio. El precio de la electricidad en México ha sido tradicionalmente subsidiado por el gobierno a los usuarios finales (Scott, 2011), por este motivo se consideró en la presente investigación, su costo de producción previo a venderse al cliente, y se consideró que el TAV entró en el criterio de consumo industrial, de acuerdo a IMCO (2013), el costo de este fluido fue de \$0.41 por mega julio.

Para tasar las emisiones de GEI, se utilizó el valor reportado por Cartes (2018), en donde se presentaron las experiencias de varios países en diversos años para asignar un precio a la tonelada métrica de gases efecto invernadero emitidos. En el caso de México, para el año en estudio, este valor alcanzó los \$38.28 por cada tonelada de GEI.

## 4. Resultados y discusión

En este Capítulo se llevó a cabo el análisis de tres casos de estudio: una hipotética red de alta velocidad ferroviaria mexicana conformada por tres líneas, una que enlace a las Ciudades de Guadalajara y México en dos opciones, la primera pasando por la ciudad de La Piedad, en el estado de Michoacán, y la segunda pasando por la ciudad de León, en Guanajuato; la tercera línea enlazará a la Ciudad de México con el Puerto de Veracruz. El análisis que se llevó a lo largo de toda la presente investigación se realizó tomando el 2013 como año en el cual se implementó el nuevo servicio ferroviario de alta velocidad. Se eligió este año debido a que es el más reciente del cual INEGI (2020) obtuvo datos censales económicos, los cuales fueron reportados por este mismo instituto en el año inmediato siguiente.

A continuación, se determinaron los tiempos de recorrido para dos diferentes esquemas de viaje, de corto y de largo itinerario. Primero se expusieron las velocidades de operación en los arcos de los corredores seleccionados y posteriormente se calcularon los tiempos, que se ordenaron de acuerdo al arreglo matricial propuesto por Rodrigue *et al.* (2009) en dos versiones: i) en la primera se consideró únicamente al tiempo efectivo de viaje y, ii) en la segunda, se incluyó la penalización correspondiente por acceso y egreso, tal como se mencionó en la metodología de esta investigación. Para los viajes de corto itinerario se comparó al modo carretero con el modo ferroviario de alta velocidad, mientras que para los viajes de largo itinerario se incluyó en la comparativa al avión.

A partir de este punto se determinaron las cantidades de usuarios en cada línea de la red estudiada y se comenzó a realizar la comparativa entre dos escenarios: uno que contempló a la oferta de transporte en cada arco tal cual está configurada actualmente y otro donde se sumó a esta el modo ferroviario de alta velocidad. La cantidad de usuarios de cada modo existente se determinó en base a los datos de SCT (2013 – 2019) así como en encuestas elaboradas por SENEAM (2012). En base a estos, de acuerdo a lo investigado por Modelística (2014), Herrera-García y Sánchez-López (2014), García-Álvarez, 2016 y Fernández-Jañez, (2012), se determinó la cantidad de usuarios que migraron y fueron inducidos al tren de alta velocidad. De



igual forma a como se hizo para los tiempos de viaje, la cantidad de usuarios se determinó para dos diferentes esquemas de viaje, de corto y de largo itinerario.

Con la información previamente obtenida, se evaluó el costo del tiempo de los usuarios en cada escenario para cada corredor, en los dos escenarios: con y sin TAV. Se consideró que los usuarios realizan el viaje por dos motivos: trabajo y ocio. El costo del tiempo en los corredores se calculó a partir del valor del tiempo para los usuarios del modo carretero, del modo aéreo y de los usuarios inducidos al TAV. El primero de estos obtuvo de lo investigado por Torres *et al.* (2019); para los del modo aéreo se adoptó el criterio de Alberro-Semerena (2008); y para los inducidos al TAV, se consideró que este será un promedio de los valores en el modo carretero y en el modo aéreo.

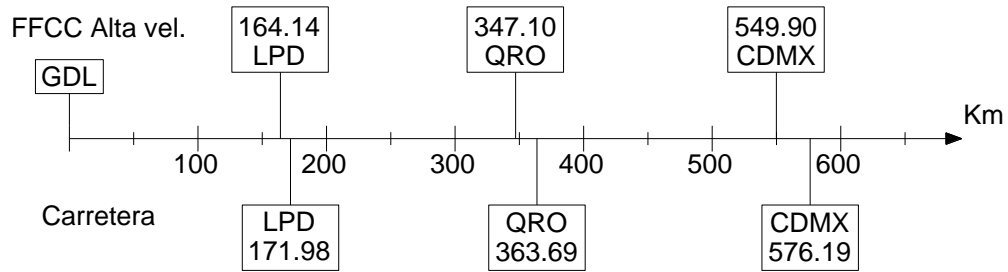
En el epígrafe correspondiente a la productividad y cohesión territorial, se obtuvo la cantidad de habitantes que conforman la población en cada nodo de la red investigada y se definieron los años que sirvieron como base para el presente estudio. Estos parámetros se utilizaron para determinar el valor económico que se logra para la cohesión territorial entre los nodos intermedios al unirlos por algún medio de transporte, en el caso del número de habitantes; y los años base se utilizaron para realizar hacia ellos todas las proyecciones de la información que otras bases de datos establecieron en diversos espacios temporales. Se calculó la accesibilidad potencial y los índices de accesibilidad en cada modo de transporte; esto sirvió para establecer el modelo matemático, el cual se aproximó mediante el método de regresión lineal múltiple (Montgomery y Runger, 1996), para estimar el grado de cohesión territorial alcanzada.

Al final este capítulo, se realizaron los cálculos de la energía consumida y los GEI emitidos en los corredores, por los modos de transporte existentes y aunando a estos el hipotético TAV. Las ecuaciones y procedimientos empleados corresponden a Solis y Sheinbaum (2017), ICAO (2017), Xujie y Lu (2014), IPCC (2006 y 2006b), tal como se mencionó en el Capítulo 1 de esta investigación, mientras que, de igual forma se realizó la ponderación y comparativa económica de estos parámetros, con los costos unitarios que se obtuvieron en INPC (2020), Indexmundi (2020), e IMCO (2013).

#### 4.1. Determinación de corredores aptos

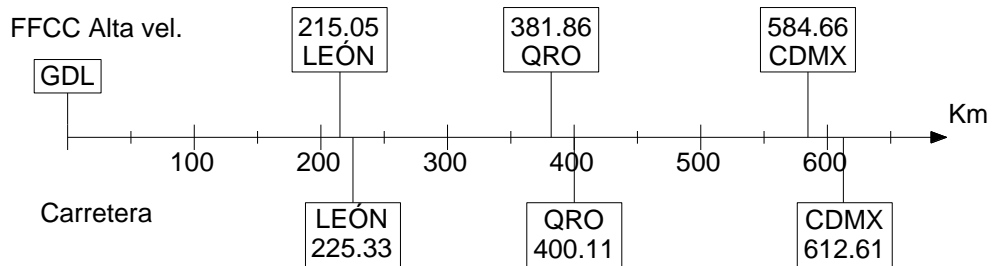
De acuerdo al criterio de Alias (1984), y en base a lo descrito en SCT (2018), los corredores de transporte con mayor demanda a nivel nacional tienden a ubicarse en el centro de la República Mexicana. A partir de la información de SCT, la tendencia se manifiesta principalmente desde occidente, proveniente de la ciudad de Guadalajara (GLD), con dirección hacia la Ciudad de México (CDMX) y de esta hacia el oriente, con destino en el Puerto de Veracruz (VER). Debido a esto, se decidió valorar una hipotética red ferroviaria de alta velocidad que enlace estos nodos y, además, cuente con estaciones intermedias en ciudades importantes dentro de cada itinerario. Mediante la herramienta pública “Traza tu Ruta” (SCT, 2019), se determinaron las distancias carreteras que separan los tres nodos mencionados y se definió cuales ciudades importantes intermedias quedaron dentro de las rutas sugeridas por Traza tu Ruta. A estas ciudades importantes se les aplicó el criterio espacial mencionado por Gutiérrez (2004) y López (2014), para la distancia optima entre estaciones de una LAV. De esta manera se comprobó que, el recorrido entre GDL y CDMX puede realizarse al elegir entre dos opciones, una que pase por la ciudad de La Piedad (LPD), y otra por la ciudad de León (LEÓN). La distancia entre estas localidades y CDMX, ameritó considerar un tercer punto intermedio en cada alternativa de esta ruta, el cual, coincidió en la ciudad de Querétaro (QRO) para ambas opciones, con lo que se logró, además, corredores de alta demanda y se cumplió lo descrito por Alias (1984). De manera análoga se definió la ruta hacia el Oriente, de CDMX a VER, y se determinó que el corredor con mayor demanda pasa por la ciudad de Puebla (PUE) y continúa por la ciudad de Córdoba (COR), para llegar al nodo extremo en VER. Estas localidades intermedias cumplen, además, el criterio espacial para el emplazamiento de estaciones LAV, que se mencionó previamente. La distancia de la LAV que separa los nodos extremos de cada ruta se obtuvo de Herrera y Sánchez (2014), y se dividió entre la distancia carretera obtenida de SCT (2019). Esto resultó en el factor de abatimiento de curvatura que se empleó para determinar la longitud de la LAV entre nodos intermedios. Con la información de las distancias carretera y LAV, se formaron diagramas unifilares para cada ruta. Los del recorrido proveniente de Occidente se muestran en la Figura 6, para la opción que pasa por La Piedad, y en la Figura 7, para la opción que pasa por León.

Figura 6:  
Ruta Guadalajara – Ciudad de México, por La Piedad.



En el diagrama unifilar para la ruta GDL-CDMX en su primera alternativa, pasando por LPD, se observó que el trazado de la LAV logra una reducción en la distancia recorrida, respecto a la carretera, de 26.29 Km. En lo que respecta a la opción pasando por LEÓN, ruta que resultó con mayor extensión, este ahorro en longitud fue de 27.95 Km, valor muy similar al anterior.

Figura 7:  
Ruta Guadalajara – Ciudad de México, por León

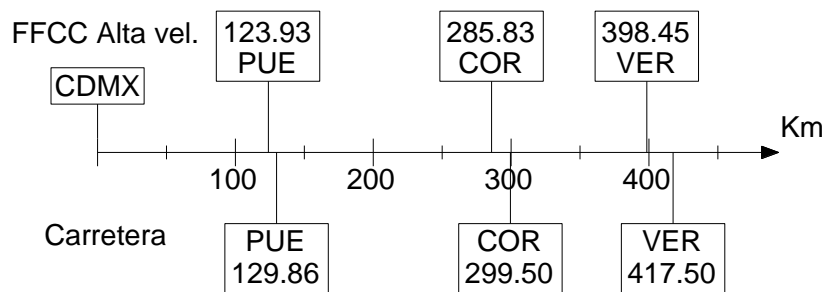


El autotransporte, al recorrer la ruta GDL-CDMX al pasar por LPD, utilizó las siguientes Carreteras Federales: la 90D, desde GLD hasta La Joya, la 15D desde esta localidad hasta Ecuandureo, y de esta última hasta LPD, la 37. Para llegar a Irapuato, la 90, de esta última ciudad a QRO, la 45D. Finalmente se utilizó en su totalidad la carretera 57D para llegar a CDMX, vía Tepetzotlán. En lo que respecta a la opción que pasa por LEÓN, el desglose de las Carreteras Federales fue, la 90D hasta Zapotlanejo, la 80D hasta El Desperdicio, la 80 hasta Rancho San Juanico San José del Potrero, que llegó a LEÓN mediante la 45D. De LEÓN a

Irapuato la 45, que cambió a la 45D para llegar a QRO. El último tramo, QRO-CDMX, fue el mismo previamente descrito.

En lo que respecta a la ruta hacia el Oriente, que enlaza a la Ciudad de México con el puerto de Veracruz (VER), el diagrama unifilar de la Figura 8, que se obtuvo aplicando el criterio previamente mencionado, muestra aquellas ciudades donde resultó factible emplazar estaciones para la línea de alta velocidad ferroviaria. Esas localidades son la ciudad de Puebla (PUE), capital del estado homónimo, y la ciudad de Córdoba (COR), en el estado de Veracruz. En su respectivo diagrama unifilar puede observarse que la LAV en este itinerario logró reducir en 19.05 Km el recorrido carretero. Para el viaje en autotransporte, la totalidad del recorrido se hizo en la Carretera Federal 150D.

Figura 8:  
Ruta Ciudad de México – Veracruz.

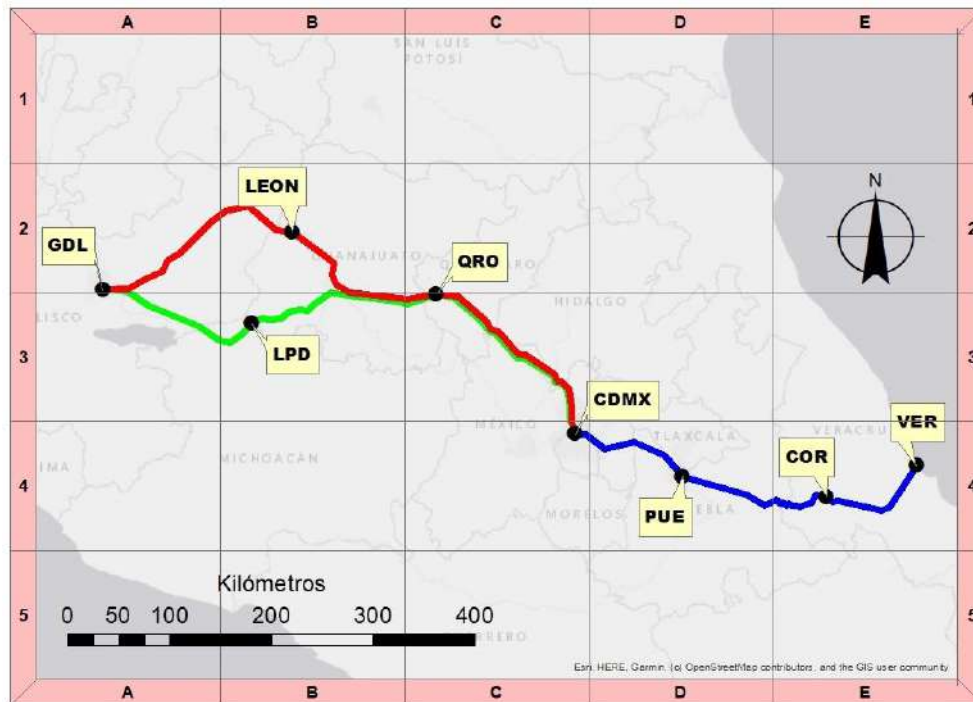


De la observación de las tres Figuras anteriores se dedujo que el factor de abatimiento de curvatura, carretera/LAV, alcanza un valor de 1.048 para las tres rutas, dato que se muestra consistente con lo expuesto por Herrera-García y Sánchez (2014), en donde se analizaron, además de las aquí plasmadas, otras diez posibles rutas, las cuales obtuvieron un índice de abatimiento similar.

De acuerdo a lo obtenido en los diagramas unifilares, y mediante un Sistema de Información Geográfico (SIG), se representó sobre un mapa del centro de la República Mexicana la traza aproximada para las LAV y las ciudades en las cuales se propuso localizar estaciones, tal como se muestra en la Figura 9, en donde la línea color rojo representa la ruta Guadalajara a Ciudad de México, pasando por León, mientras que la línea color verde es la opción que pasa por La

Piedad. Puede observarse que ambas opciones confluyen en la ciudad de Querétaro previo a llegar a la Ciudad de México; esto implica que, entre ambas ciudades, el recorrido fue el mismo, pero, para efectos de una mejor visualización, se dibujaron de manera separada. La línea color azul indica la ruta Ciudad de México al puerto de Veracruz, así como sus dos estaciones intermedias, una en la ciudad de Puebla y otra en Córdoba.

Figura 9:  
Líneas de alta velocidad propuestas.



El trazado de estas LAV se realizó siguiendo, de manera aproximada, el curso de las carreteras que “Traza tu ruta” (SCT, 2019) recomendó para realizar los recorridos en el autotransporte, tal como se describió previamente.

En lo que respecta a la longitud recorrida por los aviones, las distancias ortodrómicas se obtuvieron mediante las Ecuaciones (7) y (8), se utilizaron las coordenadas geográficas de los respectivos aeropuertos, que se investigaron en la Publicación de Información Aeronáutica

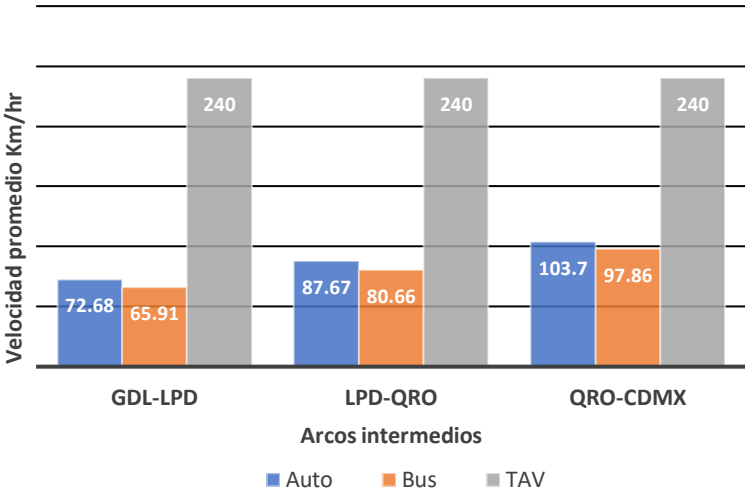
(SENEAM, 2012). De esta manera, para el par GDL-CDMX la distancia ortodrómica resultó de 459.04 Km, mientras que para el par CDMX-VER fue de 304.55 Km.

#### 4.2. Determinación de los tiempos de viaje

Haciendo uso de la información plasmada en SCT (2014, 2014, 2014c, 2014d, 2014e y 2014f) se obtuvieron las velocidades promedio para el automóvil y el autobús. La velocidad para el Tren de Alta Velocidad se adoptó del criterio establecido por Nash (2015) y Nishijima *et al.* (2013), donde se estableció que, en los trazados ferroviario diseñados para una velocidad de 300 Km/hr, el TAV logra una velocidad promedio de operación de 240 Km/hr. Ambas situaciones que se consideraron aplican para el presente estudio.

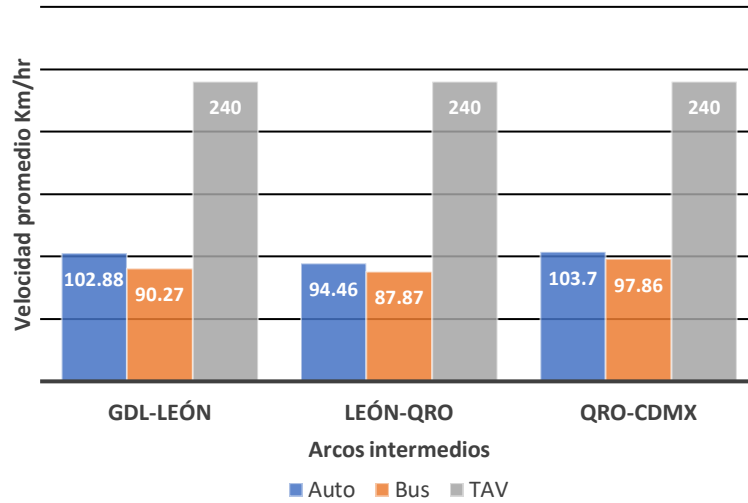
La Figura 10 resume las velocidades de operación promedio para la ruta Guadalajara – Ciudad de México, pasando por La Piedad.

Figura 10:  
Velocidad promedio ruta Guadalajara – Ciudad de México, por La Piedad.



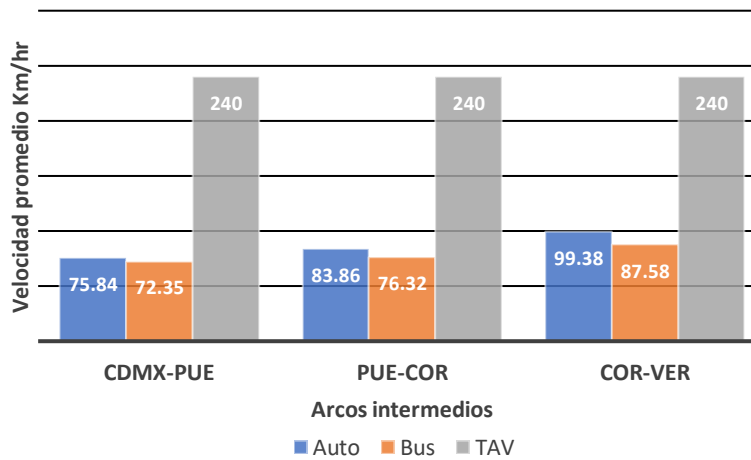
Con la misma metodología se formó la Figura 11, donde se muestran las velocidades de operación promedio para la ruta Guadalajara – Ciudad de México, pasando por León:

Figura 11:  
Velocidad promedio ruta, Guadalajara – Ciudad de México, por León.



De manera análoga se elaboró la Figura 12, donde se resumieron las velocidades para la ruta Ciudad de México – Veracruz.

Figura 12:  
Velocidad promedio ruta, Ciudad de México – Veracruz



Para los medios de transporte en el modo carretero, así como para el tren de alta velocidad, al conjuntar la información de las tablas donde se plasmaron las distancias y aquellas donde se registraron las velocidades de operación, dividiendo las primeras entre las segundas, se obtuvieron los tiempos promedio de recorrido entre cada uno de los pares origen-destino. Para el transporte aéreo se obtuvieron directamente los tiempos de recorrido en las plataformas electrónicas que las diferentes aerolíneas comerciales tienen disponibles al público; en el presente trabajo se consultó a las cinco empresas que, al momento de la investigación, prestan servicio entre los puentes aéreos considerados, Aeromar (2019), Aeromexico (2019), Interjet (2019), Viva Aerobus (2019) y Volaris (2019). Con estos tiempos de recorrido se formaron las matrices de impedancia, de acuerdo al arreglo matricial propuesto por Rodrigue *et al.* (2009).

Figura 13:  
Matrices de impedancia, corto itinerario

Tiempo de recorrido, ruta GDL-CDMX por La Piedad (min)				
GDL	0, 0, 0			
LPD	141.97, 156.56, 41.04	0, 0, 0		
QRO	273.62, 299.17, 86.78	131.65, 142.61, 45.74	0, 0, 0	
CDMX	396.57, 429.46, 137.48	253.8, 272.71, 96.44	122.95, 130.29, 50.7	0, 0, 0
	GDL	LPD	QRO	CDMX

Tiempo de recorrido, ruta GDL-CDMX por León (min)				
GDL	0, 0, 0			
LEÓN	131.41, 149.77, 53.76	0, 0, 0		
QRO	242.43, 269.11, 95.46	111.02, 119.34, 41.7	0, 0, 0	
CDMX	365.38, 399.4, 146.16	235.2, 251.54, 127.76	122.95, 130.29, 50.7	0, 0, 0
	GDL	LEÓN	QRO	CDMX

Tiempo de recorrido, ruta CDMX-VER (min)				
CDMX	0, 0, 0			
PUE	102.74, 107.69, 30.98	0, 0, 0		
COR	224.11, 241.05, 71.46	121.37, 133.36, 40.48	0, 0, 0	
VER	295.35, 321.89, 99.62	192.6, 214.21, 71.46	71.24, 80.84, 28.16	0, 0, 0
	CDMX	PUE	COR	VER



Los valores en las matrices de impedancia de la Figura 13, representan únicamente el tiempo de recorrido efectivo durante el viaje de corto itinerario entre todos los pares origen-destino dentro de las rutas estudiadas, utilizando los modos carretero y ferroviario de alta velocidad. Los tiempos de acceso, espera y egreso se tomaron por separado, al considerarlos en el cálculo de los índices de accesibilidad, y en el cálculo del valor del tiempo para los usuarios como se verá más adelante. En estas matrices los tiempos de recorrido resultantes se ordenaron en series de tres números, donde el primero de estos corresponde al automóvil, el segundo al autobús y el tercero al tren de alta velocidad. Debido a que estas matrices de impedancia resultaron simétricas, únicamente se reportaron los valores por debajo de la diagonal de ceros. Se sombrearon en color amarillo a las celdas que consideraron viajes de corto itinerario, en color gris a los viajes de mediano itinerario y en color azul a los viajes de itinerario completo.

Figura 14:  
Matrices de impedancia, itinerario completo

Tiempo de recorrido, par GDL-CDMX por La Piedad (min)		
GDL	0, 0, 0	80.10, 396.57, 429.46, 137.48
CDMX	75.30, 396.57, 429.46, 137.48	0, 0, 0
	GDL	CDMX

Tiempo de recorrido, par GDL-CDMX por León (min)		
GDL	0, 0, 0	80.10, 365.38, 399.40, 146.16
CDMX	75.30, 365.38, 399.40, 146.16	0, 0, 0
	GDL	CDMX

Tiempo de recorrido, par CDMX-VER (min)		
CDMX	0, 0, 0	62.40, 295.35, 321.89, 99.62
VER	70.20, 295.35, 321.89, 99.62	0, 0, 0
	CDMX	VER

Las matrices de impedancia donde se comparan los tiempos efectivos de viaje entre los nodos extremos, que se denominaron viajes de itinerario completo, se presentaron en la Figura 14. Se analizó de manera independiente a estas matrices debido a que, por las distancias de recorrido, el modo aéreo comienza a representar competencia a los otros modos de transporte en el corredor. De igual manera a lo descrito previamente, los tiempos de acceso, espera y egreso se

tomaron por separado, y se consideraron más adelante en el cálculo de los índices de accesibilidad, y en el cálculo del valor del tiempo para los usuarios.

En las dos primeras matrices de la Figura 14, se plasmaron los tiempos de viaje efectivo para el par GDL-CDMX en sus dos alternativas, pasando por La Piedad y por León, respectivamente. Si bien para el modo aéreo la ruta elegida no es determinante, si lo es para el modo de alta velocidad ferroviario y para el carretero, siendo este el motivo por el cual también los viajes de itinerario completo se analizaron en las dos opciones. La tercera matriz de esta misma figura muestra el tiempo de viaje efectivo para el par CDMX-VER.

Los resultados en estas matrices de impedancia se ordenaron en series de tres números. El primero de estos números representa el tiempo promedio efectivo de viaje en el avión, el cual es el promedio de lo que cada compañía aérea comercial reporta en sus plataformas digitales (Aeromar, 2019; Aeromexico, 2019; Interjet, 2019; Viva Aerobus, 2019; Volaris, 2019); el segundo número en la serie corresponde al tiempo de recorrido que el automóvil efectúa, en viaje directo, entre los nodos extremos, el tercer número indica el tiempo efectivo del viaje directo realizado en autobús, y el cuarto número representa este tiempo utilizando el tren de alta velocidad. Estos tres últimos valores se obtuvieron de las matrices y arcos correspondientes previamente analizados para los viajes de corto itinerario.

Resultó notorio como las matrices en la Figura 14, a diferencia de las matrices en la Figura 13, no son geométricas en lo que atañe al modo aéreo. Esto es debido a los distintos tiempos de viaje que las empresas aeronáuticas consideran para un mismo par origen – destino, entre el vuelo de ida y el vuelo de regreso.

Respecto al tiempo consumido en el acceso, espera y egresos que cada medio de transporte requiere, se consideró que este adquiere el valor de cero minutos en el caso de que el medio de transporte sea el automóvil (De Rus e Inglada, 1993, p. 30), 88 minutos en el caso del autobús, 84 minutos para el tren de alta velocidad y 180 minutos para el avión.

Para el autobús, de acuerdo a lo que reportó De Rus y Román (2006), y se recomienda por PP (2019), la composición de esta penalización temporal consta de 29 minutos para el acceso, 30 minutos para la espera y 29 minutos para el egreso. Para el tren de alta velocidad, por la experiencia española que investigó De Rus y Román (2006), se conforma por 27 minutos de

acceso, 23 de espera y 34 de egreso. En el caso del avión, de acuerdo a las cinco aerolíneas consultadas, el tiempo consumido previo al vuelo se conforma por 30 minutos para el acceso, 120 la espera, y 30 minutos para el egreso. En los tres casos, estos tiempos incluyen, para el origen, la llegada a la terminal/estación, el paso por los dispositivos de seguridad de ese sitio, la documentación de equipaje y la espera por la salida del vehículo; y para el destino, la espera por la recolección de equipaje y la actividad de trasladarse desde la terminal/estación hasta el destino de cada usuario.

De esta forma, las matrices de impedancia se adecuaron mediante la inclusión de la penalización al tiempo, sumando las cantidades previamente expuestas, y se llegó a los resultados que se muestran en la Figura 15 y en la Figura 16. De nueva cuenta, para los viajes de corto itinerario, los valores de la impedancia se ordenaron en series de tres números: el primero de estos corresponde al tiempo total de viaje en automóvil, el segundo al del autobús y el tercero al del tren de alta velocidad. Al igual que en el procedimiento anterior, las matrices de impedancia para los viajes de corto itinerario resultaron simétricas, motivo por el cual únicamente se reportaron los valores por debajo de la diagonal de ceros. El código de colores para las celdas de las matrices fue el mismo que se empleó anteriormente: en color amarillo se sombrearon los viajes de corto itinerario, en color gris a los viajes de mediano itinerario y en color azul a los viajes de itinerario completo.

Figura 15:  
Matrices de impedancia, corto itinerario, más tiempo de terminales.

Tiempo total de viaje, ruta GDL-CDMX por La Piedad (min)				
GDL	0, 0, 0			
LPD	141.97, 244.56, 125.04	0, 0, 0		
QRO	273.62, 387.17, 170.78	131.65, 230.61, 129.74	0, 0, 0	
CDMX	396.57, 517.46, 221.48	253.80, 360.71, 180.44	122.95, 218.29, 134.70	0, 0, 0
	GDL	LPD	QRO	CDMX

Tiempo total de viaje, ruta GDL-CDMX por León (min)				
GDL	0, 0, 0			
LEÓN	131.41, 237.77, 137.76	0, 0, 0		
QRO	242.43, 357.11, 179.46	111.02, 207.34, 125.70	0, 0, 0	
CDMX	365.38, 487.40, 230.16	235.20, 339.54, 211.76	122.95, 218.29, 134.70	0, 0, 0
	GDL	LEÓN	QRO	CDMX

Tiempo total de viaje, ruta CDMX-VER (min)				
CDMX	0, 0, 0			
PUE	102.74, 195.69, 114.98	0, 0, 0		
COR	224.11, 329.05, 155.46	121.37, 221.36, 124.48	0, 0, 0	
VER	295.35, 409.89, 183.62	192.60, 302.21, 155.46	71.24, 168.84, 112.16	0, 0, 0
	CDMX	PUE	COR	VER

Los resultados que se obtuvieron en las matrices de la Figura 15, indicaron que el empleo de un tren de alta velocidad, circulando a una velocidad promedio de 240 Km/hr, en los viajes de corto itinerario resulta más atractivo en todos los arcos en comparación a que si se hiciera uso del autobús. Sin embargo, esta situación no se cumplió al cuando se comparó al TAV contra el automóvil: en los viajes de corto itinerario el automóvil mostró menores tiempos de recorrido en casi todos los arcos, exceptuando los pares GDL-LPD y QRO-LPD. Respecto a los viajes de mediano y largo itinerario, se observó que el modo ferroviario de alta velocidad ofreció tiempos totales de viaje menores a los que brindaron los dos medios del modo carretero analizados.

En los viajes de largo itinerario, o itinerario completo, se realizó una tercera comparativa modal, al incluir dentro de la oferta de transporte al avión. En la Figura 16, se muestran las matrices de impedancia que se obtuvieron para estos viajes. Los tiempos se organizaron dentro de su respectiva casilla en series de cuatro números, el primero corresponde al tiempo total de viaje en el avión, el segundo al del automóvil, el tercero al del autobús y el cuarto al del TAV.

Figura 16:  
Matrices de impedancia, itinerario completo, más tiempo de terminales.

Tiempo de recorrido, par GDL-CDMX por La Piedad (min)		
GDL	0, 0, 0	260.10, 396.57, 517.46, 221.48
CDMX	255.30, 396.57, 517.46, 221.48	0, 0, 0
	GDL	CDMX
Tiempo de recorrido, par GDL-CDMX por León (min)		
GDL	0, 0, 0	260.10, 365.38, 487.40, 230.16
CDMX	255.30, 365.38, 487.40, 230.16	0, 0, 0
	GDL	CDMX
Tiempo de recorrido, par CDMX-VER (min)		
CDMX	0, 0, 0	242.40, 295.35, 409.89, 183.62
VER	250.20, 295.35, 409.89, 183.62	0, 0, 0
	CDMX	VER

En estas matrices de impedancia se obtuvo que el empleo de un tren de alta velocidad, circulando a una velocidad promedio de 240 Km/hr, ofrece menores tiempos totales de viaje que cualquiera de los otros modos estudiados. Esto aplica inclusive para las dos alternativas del viaje entre el par GDL-CMDX ya que, si bien el recorrido que pasa por León resultó consumir cerca de nueve minutos adicionales respecto a la opción que pasa por La Piedad, el tren de alta velocidad en esta ruta ahorró 29.94 minutos en el trayecto de ida y 25.14 minutos en el trayecto de regreso, respecto a su competidor más cercano, el avión. Para el par CDMX-VER, al comparar a estos mismos modos de transporte, el tren de alta velocidad resultó con una ganancia de 58.78 minutos, en el trayecto de ida, y de 66.58 minutos en el trayecto de regreso.

### **4.3. Determinación de la demanda**

Se realizaron dos comparativas: una para los viajes de corto itinerario, aquellos que implican el movimiento de personas entre los nodos intermedios de cada línea considerada y otra para los viajes de itinerario completo, que se realizan entre los nodos extremos de las líneas estudiadas. En la primera se compararon los medios del modo carretero y el propuesto modo ferroviario de alta velocidad; en la segunda se incluyó al avión. En ambas comparativas se consideraron dos escenarios, uno de los cuales representó la situación real, abarcando los medios de transporte existentes para pasajeros, y el segundo escenario configuró la situación propuesta o hipotética, en la que se incluyó al tren de alta velocidad en la oferta de transporte.

#### **4.3.1. Los aforos vehiculares**

El escenario de transporte actual se dividió en dos categorías de viaje: i) viajes de corto itinerario, es decir aquellos que se realizaron entre los nodos extremos de cada ruta y su nodo intermedio más cercano, o bien entre dos nodos intermedios, siempre y cuando sean inmediatos; y ii) viajes de itinerario completo, o viajes directos entre los nodos extremos de cada ruta considerada. Cada una de las categorías de viaje se analizaron para un escenario actual, que contempla los servicios de transporte ofertados actualmente, y para un escenario hipotético, en donde se incluyó al nuevo servicio ferroviario de alta velocidad.

##### ***Viajes de corto itinerario***

En el escenario actual, se cuantificaron los vehículos según su tipología en cada arco de recorridos intermedios; para el escenario hipotético, la cuantificación de trenes de alta velocidad requeridos para prestar el servicio en los viajes de corto itinerario se realizó mediante cuatro pasos: i) se obtuvo la cantidad de personas y toneladas transportadas en cada arco, de acuerdo a los promedios de ocupación para cada tipo de vehículo reportados por SCT (2017a, 2018, 2018a, y 2018b); ii) se calculó la cantidad de viajeros que migrarán y serán atraídos al TAV, al adoptar los porcentajes indicados por Modelística (2014), Fernández (2012) y García (2016),

respectivamente; iii) se calculó la cantidad de toneladas que serán transportadas por el TAV, de acuerdo a lo que se estimó en Liang *et al.* (2016); y iv) se obtuvo la cantidad de trenes requeridos en cada arco, al dividir la cantidad de viajeros y de carga entre la capacidad de cada tren, cuyos valores se mencionaron en la metodología de esta investigación. La Tabla 10 muestra la comparativa de aforos vehiculares que se realizó entre el escenario actual y el hipotético. Debido a las distancias en cada categoría de viaje, para los de corto itinerario se consideró que el TAV representó competencia con el autotransporte, y para los directos lo hizo, además, con el transporte aéreo.

El desglose de la cantidad de viajeros y carga que migraron, así como los pasajeros atraídos, se puede observar en la Tabla 13, la cual se colocó en el apartado 4.3.2, que hace referencia a la cantidad de usuarios, por ser esta y la cantidad de vehículos, una referencia circular.

El análisis de la Tabla 10, puso de manifiesto la magnitud en la cual la cantidad de vehículos en el escenario actual se vio reducida tras la inclusión del TAV en los corredores debido a los viajeros y tonelaje de carga atraídos hacia este medio de transporte.

Tabla 10:  
Aforos vehiculares, viajes de corto itinerario, año 2013.

<b>Par</b>	<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Escenario actual</b>	<b>Escenario hipotético</b>	<b>Par</b>	<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Escenario actual</b>	<b>Escenario hipotético</b>
<b>GDL-LPD</b>	<b>A</b>	459,999	381,799	<b>QRO-CDMX</b>	<b>A</b>	13,669,894	11,346,012
	<b>B</b>	58,492	53,795		<b>B</b>	907,465	834,596
	<b>C</b>	67,573	60,816		<b>C</b>	3,645,305	3,280,775
	<b>TAV</b>	---	1,018		<b>TAV</b>	---	33,609
<b>LPD-QRO</b>	<b>A</b>	2,898,301	2,405,590	<b>CDMX-PUE</b>	<b>A</b>	21,414,170	17,773,761
	<b>B</b>	227,318	209,064		<b>B</b>	565,472	520,065
	<b>C</b>	463,728	417,355		<b>C</b>	654,328	588,895
	<b>TAV</b>	---	6,074		<b>TAV</b>	---	32,424
<b>GDL-LEÓN</b>	<b>A</b>	2,443,719	2,028,287	<b>PUE-COR</b>	<b>A</b>	4,625,602	3,839,250
	<b>B</b>	256,497	235,900		<b>B</b>	435,595	400,617
	<b>C</b>	297,537	267,783		<b>C</b>	500,455	450,409
	<b>TAV</b>	---	4,934		<b>TAV</b>	---	9,622
<b>LEÓN-QRO</b>	<b>A</b>	2,855,925	2,370,417	<b>COR-VER</b>	<b>A</b>	1,124,078	932,984
	<b>B</b>	223,994	206,007		<b>B</b>	152,417	140,178
	<b>C</b>	456,948	411,253		<b>C</b>	176,331	158,698
	<b>TAV</b>	---	5,941		<b>TAV</b>	---	2,794



### *Viajes directos*

El análisis de los viajes directos en el escenario actualmente ofrecido a los usuarios, se realizó de manera análoga al de los viajes de corto itinerario, pero se incluyó al avión en la oferta del transporte de los corredores. Al utilizar los datos públicos disponibles más recientes de las estaciones de aforo mostradas en SCT (2013 y 2013b), se sumaron los porcentajes del total de vehículos que realizan el recorrido completo. Se determinó que, para GDL-CDMX, el 5.85% de estos recorren la totalidad del trayecto en ambos sentidos. Para CDMX-VER se procedió de manera análoga, y se observó que el 5.11% de los vehículos, en ambos sentidos, recorren la totalidad del itinerario. Para el transporte aéreo, la cuantía de vuelos que realizaron el viaje entre los nodos extremos de cada ruta estudiada se obtuvo al consultar el sitio electrónico de acceso público Expedia (2019) y la base de datos de SCT (2018d); ); Expedia (2019) mostró que, para el trayecto redondo directo GDL-CDMX, hay cuatro compañías aéreas que ofertan el servicio: Aeromexico, Interjet, Viva Aerobus y Volaris, y para el trayecto redondo directo CDMX-VER son tres las compañías que lo ofrecen: Aeromar, Aeromexico y Viva Aerobus; SCT (2018d) mostró la cantidad de vuelos, en el año de estudio, entre cada par origen-destino, la cual se cotejó con la cantidad de vuelos diarios, por compañía, que se expone en Expedia, para llegar a la cantidad de vuelos que se consideraron en el presente trabajo.

Los pasajeros en el TAV se obtuvieron de manera análoga a como se realizó para los viajes de corto itinerario, pero ahora también se incluyó a los que migran desde el avión hacia este, al utilizar los porcentajes de atracción e inducción que indicaron Herrera y Sánchez (2014), para el primero, así como Fernández (2012) y García (2016), para el segundo.

En el caso de la carga, para el transporte carretero su proporción fue la misma que la obtenida previamente en el escenario actual ofertado; en el transporte aéreo se tomó el valor que SCT (2017d) reportó respecto al tonelaje total transportado en el año de estudio, y se desgregó en los porcentajes de participación por ruta, que también indicó SCT. La carga en el TAV se obtuvo al aplicar el porcentaje promedio que se mencionó en la metodología.

Con esta información se formó la Tabla 11, donde se presenta la cantidad total de vehículos que realizaron el viaje completo directo entre los nodos extremos de las rutas en el año estudiado.

Tabla 11:  
Aforos vehiculares, viajes directos, año 2013.

<b>Par</b>	<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Escenario actual</b>	<b>Escenario hipotético</b>
<b>GDL- CDMX</b>	A	343,852	285,397
	B	39,936	36,729
	C	293,086	263,777
	Avión	9,099	7,512
	TAV	---	3,031
	A	429,663	356,620
<b>CDMX- VER</b>	B	48,521	44,625
	C	160,246	144,221
	Avión	2,643	2,183
	TAV	---	1,546

El análisis de la Tabla 11, para los viajes directos, al igual que para los viajes de corto itinerario, puso de manifiesto la magnitud en la cual la cantidad de vehículos en el escenario actual se vio reducida tras la inclusión del TAV en los corredores debido a los viajeros y tonelaje de carga atraídos hacia este medio de transporte.

#### 4.3.2. La Cantidad de usuarios

Para determinar la cantidad de viajeros y carga que circula en los corredores estudiados, se procedió de igual forma a lo previamente descrito anteriormente: se diferenció entre los viajes de corto y de largo itinerario en el escenario actual y en el escenario hipotético. Para los viajes entre nodos intermedios se consideró al autotransporte y al TAV, mientras que para los viajes entre nodos extremos se incluyó en la comparativa al avión.

### ***Viajes de corto itinerario***

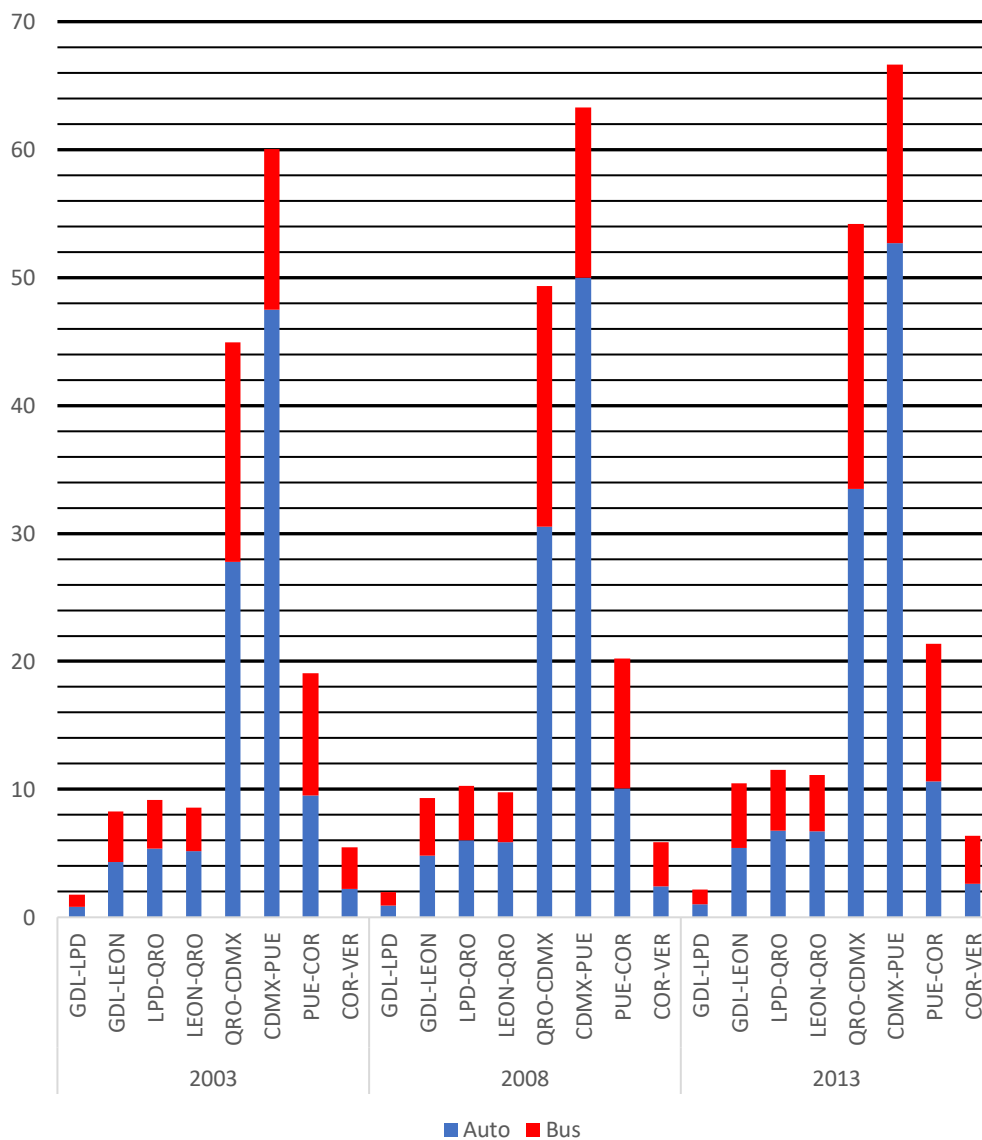
La cantidad de vehículos, en el escenario actual, que resultaron en el aforo del año 2013, se multiplicó por la tasa de viajeros y carga promedio por unidad reportada por SCT (2013 y 2013b), y se obtuvo la cantidad de personas y carga que circularon por cada uno de los arcos de corto itinerario estudiados. En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para el año en estudio.

Tabla 12:  
 Usuarios, corto itinerario, escenario actual, año 2013.

<b>Par</b>	<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Total (veh/año)</b>	<b>Tasa de ocupación</b>		<b>Viajeros (Pax/año)</b>	<b>Carga (Ton/año)</b>
			<b>(Pax/veh)</b>	<b>(Ton/veh)</b>		
<b>GDL-LPD</b>	<b>A</b>	459,999	2.23	---	1,025,798	---
	<b>B</b>	58,492	19.8	---	1,158,142	---
	<b>C</b>	67,573	---	15.7	---	1,060,896
<b>LPD-QRO</b>	<b>A</b>	2,898,301	2.33	---	6,753,041	---
	<b>B</b>	227,318	21.05	---	4,785,044	---
	<b>C</b>	463,728	---	15.7	---	7,280,530
<b>GDL-LEÓN</b>	<b>A</b>	2,443,719	2.22	---	5,425,056	---
	<b>B</b>	256,497	19.67	---	5,045,296	---
	<b>C</b>	297,537	---	15.7	---	4,671,331
<b>LEÓN-QRO</b>	<b>A</b>	2,855,925	2.35	---	6,711,424	---
	<b>B</b>	223,994	19.7	---	4,412,682	---
	<b>C</b>	456,948	---	15.7	---	7,174,084
<b>QRO-CDMX</b>	<b>A</b>	13,669,894	2.45	---	33,491,240	---
	<b>B</b>	907,465	22.79	---	20,681,127	---
	<b>C</b>	3,645,305	---	15.7	---	57,231,289
<b>CDMX-PUE</b>	<b>A</b>	21,414,170	2.46	---	52,678,858	---
	<b>B</b>	565,472	24.7	---	13,967,158	---
	<b>C</b>	654,328	---	15.7	---	10,272,950
<b>PUE-COR</b>	<b>A</b>	4,625,602	2.3	---	10,638,885	---
	<b>B</b>	435,595	24.67	---	10,746,129	---
	<b>C</b>	500,455	---	15.7	---	7,857,144
<b>COR-VER</b>	<b>A</b>	1,124,078	2.31	---	2,596,620	---
	<b>B</b>	152,417	24.66	---	3,758,603	---
	<b>C</b>	176,331	---	15.7	---	2,768,397

Para la estimación de la cohesión territorial, la cantidad de pasajeros por año se proyectó a cada año censal en estudio con la tasa de crecimiento poblacional que se muestra en el epígrafe 4.5.1 y la Ecuación (5) de crecimiento geométrico. Los resultados para la cantidad de pasajeros, se ordenaron gráficamente y son los que se muestran en la Figura 17, donde se puede observar la cantidad de usuarios que utilizaron alguno de los medios terrestres existentes en los arcos intermedios al par Guadalajara – Ciudad de México, en sus dos opciones de recorrido, así como al par Ciudad de México – Veracruz. La cantidad de carga no se incluyó en esta gráfica, debido a que esta se utilizó para la valoración del tiempo y estimación de la cohesión territorial, parámetros en los cuales únicamente se consideraron a las personas usuarias; sin embargo, la masa de mercancías transportada se tomó en consideración para la estimación del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Figura 17:  
Viajeros (millones), corto itinerario, escenario actual.



Se observó que la cantidad de usuarios es creciente en el tiempo, independientemente del medio de transporte terrestre elegido, y que los pares QRO-CDMX y CDMX-PUE presentan la mayor sumatoria de viajeros; por ejemplo, para el 2013, con poco más de 54 millones para el primero y 66 millones para el segundo. De este total, en el par QRO-CDMX, 33 millones eligieron el automóvil mientras que 21 millones eligieron el autobús, y en el par CDMX-PUE, 53 millones utilizaron el automóvil mientras que 13 millones optaron por el autobús. El arco que menor

cantidad de usuarios reportó fue el GDL-LPD, en los tres años considerados. Por ejemplo, en el 2013, presentó un valor ligeramente mayor a los dos millones de viajeros, desagregados prácticamente en la misma cantidad: 1.03 optaron por el automóvil y 1.16 por el autobús.

En lo que respecta al escenario hipotético, donde incluyó al tren de alta velocidad, la cantidad de usuarios en este medio se obtuvo sumando la demanda proveniente de dos fuentes: los viajeros que migraron hacia este hipotético medio de transporte, provenientes del automóvil y el autobús, más la cantidad de personas que no realizaban el viaje, pero viajaron en el TAV motivados por su inclusión en la oferta de transporte. Respecto a la cantidad de carga que se consideró fue desviada de los camiones hacia el TAV, se consideró que esta representa el 10% de la que utiliza los medios convencionales, por ser el promedio que obtuvo Liang *et al.* (2016), tal como se explicó en la metodología de esta investigación. En la Tabla 13, se muestra, entonces, los usuarios que utilizaron la hipotética LAV, en el año de estudio.

Tabla 13:  
Composición de usuarios del TAV, corto itinerario, año 2013.

Par	Tipo de vehículo	Pasajeros en TAV		Carga en TAV (ton/año)
		Atraídos (Pax/año)	Inducidos (Pax/año)	
GDL-LPD	A	174,386		---
	B	92,999	26,739	---
	C	---		106,090
LPD-QRO	A	1,148,017	153,226	---
	B	384,239		---
	C	---		728,053
GDL-LEÓN	A	922,260		---
	B	405,137	132,740	---
	C	---		467,133
LEÓN-QRO	A	1,140,942		---
	B	354,338	149,528	---
	C	---		717,408
QRO-CDMX	A	5,693,511		---
	B	1,660,694	735,420	---
	C	---		5,723,129
CDMX-PUE	A	8,955,406		---
	B	1,121,563	1,007,697	---
	C	---		1,027,295
PUE-COR	A	1,808,610		---
	B	862,914	267,152	---
	C	---		785,714
COR-VER	A	441,425		---
	B	301,816	74,325	---
	C	---		276,840

El número de viajeros que fueron atraídos al TAV se obtuvo al estimar que el 17% de usuarios del automóvil migraron hacia este, y que el 8.04% de usuarios del autobús actuaron de manera análoga, de acuerdo al estudio realizado por Modelística (2014). La cantidad de viajeros inducidos a este medio corresponde al 10% de la demanda atraída, de acuerdo a la experiencia de García-Álvarez (2016) y Fernández-Jañez (2012), estos corresponden a aquellas personas que viajaron por primera vez y eligieron el TAV debido a que se incluyó en la oferta de transporte. La cantidad de carga que migró al nuevo medio, proveniente de los vehículos tipo C, corresponde 10% del total reportado en la Tabla 12, de acuerdo al promedio de lo que obtuvo Liang *et al.* (2016). En la Tabla 14 se ordenaron la cantidad de pasajeros y carga que, durante el 2013, hipotéticamente utilizaron el servicio del TAV; esta información se utilizó para calcular la cantidad de trenes que prestaron el servicio en los ocho corredores de corto itinerario. Para



el caso de los pasajeros, se consideraron trenes tipo Renfe 112, con capacidad de 365 pax/tren (Ferropedia, 2019), y para el transporte de mercancías, se consideraron trenes con capacidad de 500 ton (Liang *et al.*, 2016).

Tabla 14:  
TAV para prestar servicio en corto itinerario, año 2013.

Par	Pax/año	Ton/año	Trenes por año		
			Pasajeros	Carga	Total
<b>GDL-LPD</b>	294,124	106,090	806	212	1,018
<b>LPD-QRO</b>	1,685,482	728,053	4,618	1,456	6,074
<b>GDL-LEÓN</b>	1,460,137	467,133	4,000	934	4,934
<b>LEÓN-QRO</b>	1,644,808	717,408	4,506	1,435	5,941
<b>QRO-CDMX</b>	8,089,625	5,723,129	22,163	11,446	33,609
<b>CDMX-PUE</b>	11,084,666	1,027,295	30,369	2,055	32,424
<b>PUE-COR</b>	2,938,676	785,714	8,051	1,571	9,622
<b>COR-VER</b>	817,566	276,840	2,240	554	2,794

La disgregación entre trenes de pasajeros y trenes de mercancías, se utilizó en el cálculo del consumo energético y la subsecuente emisión de GEI, debido a que cada tipo representa una masa diferente. La cantidad de pasajeros y carga atraídos al TAV, se consideró propiamente como la liberación de espacio en los medios carreteros actuales. De esta manera, al restar estas cantidades, de la correspondiente que utilizó el autotransporte, para el año 2013, se obtuvo la cantidad de usuarios que durante ese año utilizaron cada medio de transporte en el escenario hipotético. En la Tabla 15 se ordenó esta información.

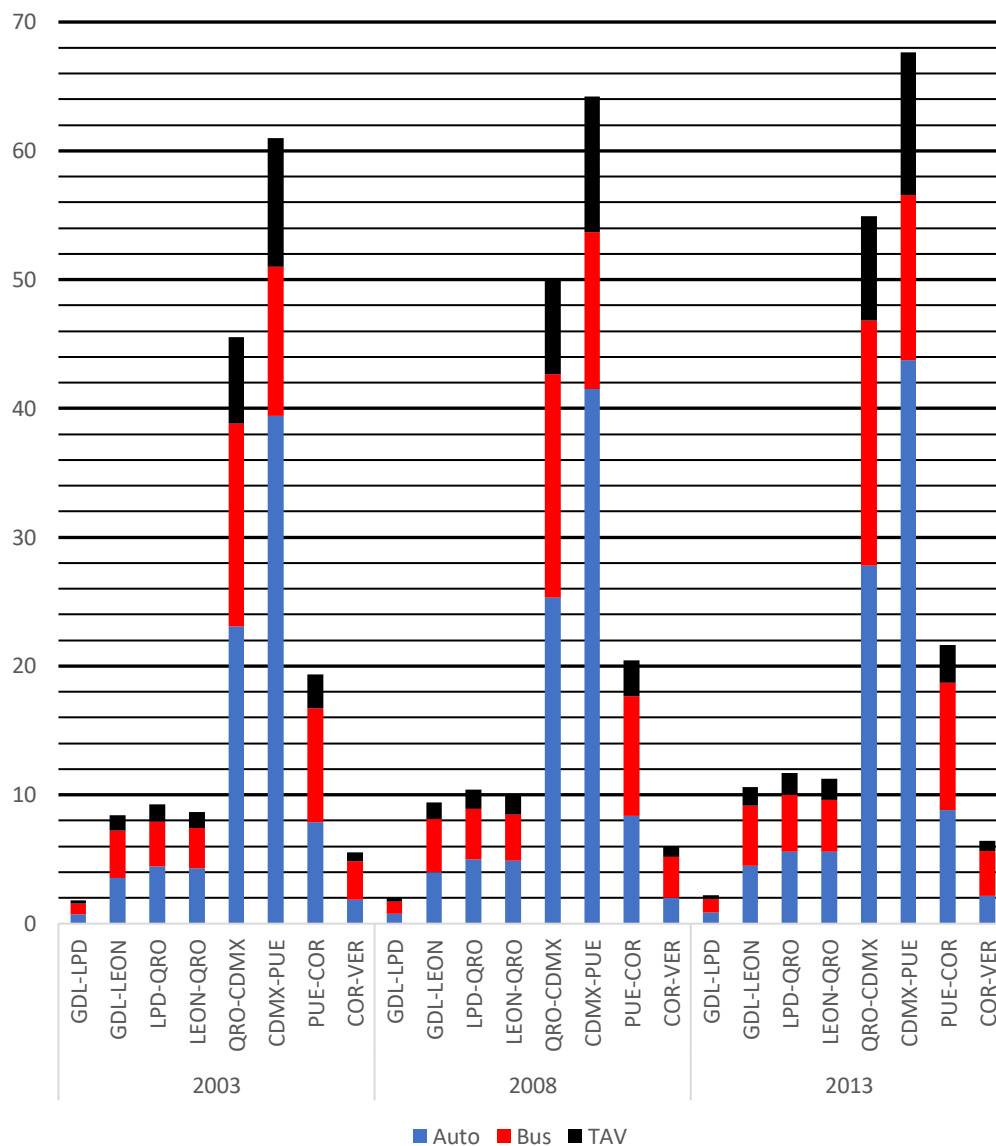
Tabla 15:  
 Usuarios, corto itinerario, escenario hipotético, año 2013.

<b>Par</b>	<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Viajeros (Pax/año)</b>	<b>Carga (Ton/año)</b>
<b>GDL-LPD</b>	<b>A</b>	851,412	---
	<b>B</b>	1,065,143	---
	<b>C</b>	---	954,806
	<b>TAV</b>	294,124	106,090
<b>LPD-QRO</b>	<b>A</b>	5,605,024	---
	<b>B</b>	4,400,805	---
	<b>C</b>	---	6,552,477
	<b>TAV</b>	1,685,482	728,053
<b>GDL-LEÓN</b>	<b>A</b>	4,502,796	---
	<b>B</b>	4,640,159	---
	<b>C</b>	---	4,204,198
	<b>TAV</b>	1,460,137	467,133
<b>LEÓN-QRO</b>	<b>A</b>	5,570,482	---
	<b>B</b>	4,058,344	---
	<b>C</b>	---	6,456,676
	<b>TAV</b>	1,644,808	717,408
<b>QRO-CDMX</b>	<b>A</b>	27,797,729	---
	<b>B</b>	19,020,433	---
	<b>C</b>	---	51,508,160
	<b>TAV</b>	8,089,625	5,723,129
<b>CDMX-PUE</b>	<b>A</b>	43,723,452	---
	<b>B</b>	12,845,595	---
	<b>C</b>	---	9,245,655
	<b>TAV</b>	11,084,666	1,027,295
<b>PUE-COR</b>	<b>A</b>	8,830,275	---
	<b>B</b>	9,883,215	---
	<b>C</b>	---	7,071,430
	<b>TAV</b>	2,938,676	785,714
<b>COR-VER</b>	<b>A</b>	2,155,195	---
	<b>B</b>	3,456,787	---
	<b>C</b>	---	2,491,557
	<b>TAV</b>	817,566	276,840

Para estimar la cohesión territorial, en el apartado 4.5, se proyectó la cantidad de viajeros de la

Tabla 15, desde el año 2013 hacia los precedentes años censales, 2003 y 2008, haciendo uso de la Ecuación (5). La cantidad de carga no se consideró en el cálculo de la cohesión territorial, pero fue un dato que se utilizó posteriormente en la obtención de la energía consumida y los GEI emitidos. De esta forma, de manera análoga al procedimiento que dio lugar a la Figura 17 del escenario actual, se formó la Figura 18, que resume las cantidades de pasajeros que se movilizaron en los tres medios de transporte (los actualmente ofertados más el hipotético TAV) durante los tres años censales, en los ocho pares de corto itinerario considerados.

Figura 18:  
Viajeros (millones), corto itinerario, escenario hipotético.



En los arcos con mayor demanda, en el año con más tráfico, resultó que, para el caso del QRO-CDMX, poco más de 8 millones de pasajeros utilizaron el TAV, mientras que en el CDMX-PUE, la cantidad superó ligeramente los 11 millones de pasajeros. Comparando ambas gráficas se observó que en, en el primer caso, la cantidad total de usuarios subió a un valor cercano a los 55 millones, y en el segundo caso se acercó a los 68 millones. El diferencial de usuarios totales entre la primera y la segunda gráfica se debe a la demanda que fue inducida por la existencia del TAV en la oferta del transporte. Por otro lado, el arco con menor demanda continuó siendo el GDL-LPD, siendo poco significativo el aporte que los nuevos usuarios atraídos por el TAV representó al total de viajes que se realizaron. El total reportado en la gráfica del primer escenario se incrementó tan solo en 30 mil usuarios, llegando a una sumatoria de 2.21 millones de pasajeros con los tres medios de transporte.

### *Viajes directos*

En lo que respecta a los viajes de itinerario completo, o directos, se determinó la cantidad de usuarios que realizan el trayecto en su totalidad. En el transporte carretero, las encuestas origen-destino son la fuente de información más fidedigna para conocer las tendencias en los movimientos dentro del corredor estudiado. en este documento se utilizarán los datos públicos disponibles más recientes, que fueron obtenidos por SCT (2013 y 2013b) en las estaciones “P.C. Palmillas” y “P.C. San Martín Texmelucan”, respectivamente, mediante entrevista directa a los vehículos que circularon por dichas estaciones entre los días 30 de julio al 02 de agosto del 2013, en el caso de la primera, y entre el 13 y 16 de agosto del mismo año para la segunda estación. En estas entrevistas SCT obtuvo, entre otros datos, el promedio de ocupantes por tipo de vehículo, los motivos del viaje, y las principales rutas de origen-destino. Para el transporte aéreo, la cuantía de viajeros se obtuvo directamente de los estadísticos elaborados por la autoridad aeronáutica con los reportes disponibles en SCT (2018d y 2018e), obtenidos por la Dirección General de Aeronáutica Civil.

Para el modo carretero en la ruta Guadalajara – Ciudad de México, se obtuvo que, de la totalidad de vehículos que circularon por la estación Palmillas, el 5.85% de los usuarios en estos recorren

la totalidad del itinerario entre las dos Zonas Metropolitanas en ambos sentidos. Respecto a la ruta Ciudad de México-Veracruz, con los datos de la estación San Martín Texmelucan, se observó que el 5.11% de los usuarios, en ambos sentidos, recorren la totalidad del itinerario. Para el modo aéreo, se obtuvo la cantidad total de pasajeros que realizaron el viaje completo entre los nodos extremos de cada par directamente de los reportes elaborados por SCT (20118d y 2018e). En la Tabla 16 se organizó la cantidad de usuarios (pasajeros y carga), para los viajes directos, en el año 2013.

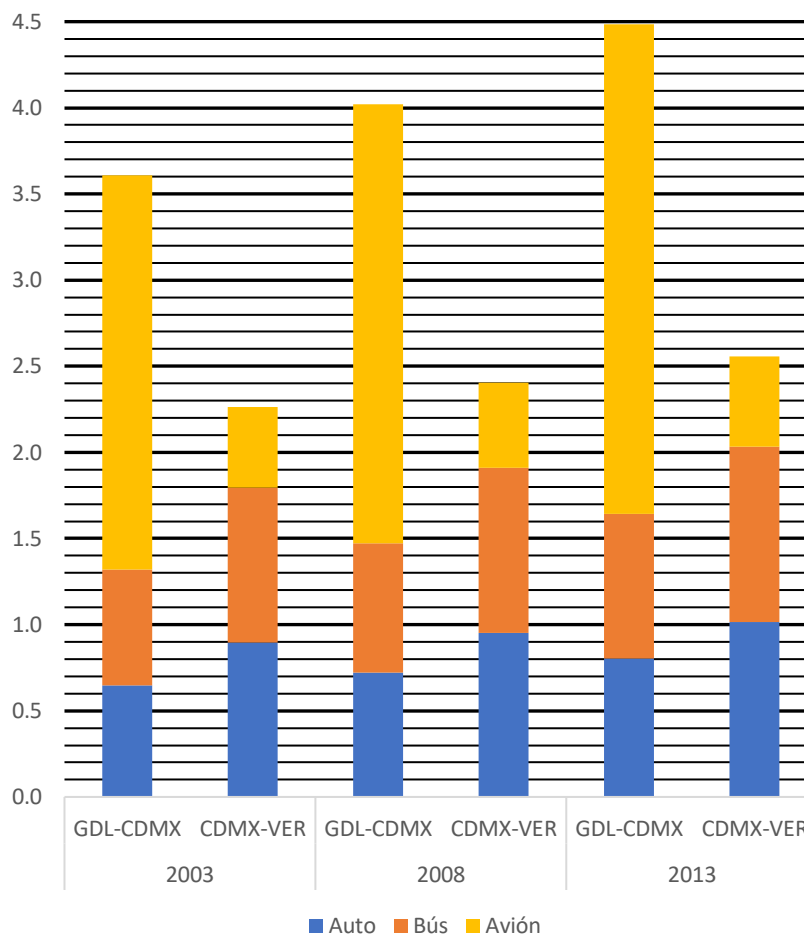
Tabla 16:  
Usuarios, viajes directos, escenario actual, año 2013.

<b>Par</b>	<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Total (veh/año)</b>	<b>Tasa de ocupación</b>		<b>Viajeros (Pax/año)</b>	<b>Carga (Ton/año)</b>
			<b>(Pax/veh)</b>	<b>(Ton/veh)</b>		
<b>GDL- CDMX</b>	<b>A</b>	343,852	2.34	---	804,614	---
	<b>B</b>	39,936	20.97	---	837,458	---
	<b>C</b>	293,086	---	15.7	---	4,601,450
	<b>Avión</b>	---	---	---	2,840,855	15,706
<b>CDMX- VER</b>	<b>A</b>	429,663	2.36	---	1,014,005	---
	<b>B</b>	48,521	20.97	---	1,017,485	---
	<b>C</b>	160,246	---	15.7	---	2,515,862
	<b>Avión</b>	---	---	---	526,981	2,700

Para efectos del cálculo de la cohesión territorial, la cantidad de los viajeros tanto del modo carretero como del aéreo se proyectó hacia los dos años censales inmediatos anteriores al de estudio, de manera análoga a lo previamente explicado en los viajes de corto itinerario, y se formó la Figura 19. La cantidad de carga no se consideró en esta figura, pero se reservó la información para emplearse en los apartados donde se estimó en consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero.

De igual forma a lo que se observó para los viajes de corto itinerario, en los trayectos completos la demanda de viajeros es creciente con el tiempo, siendo el año censal 2013 el que mayor cantidad de pasajeros reportó para los medios de transporte ofertados actualmente.

Figura 19:  
Viajeros (millones), itinerario completo, escenario actual.



En este año el par GDL-CDMX reportó poco más de 4.4 millones de viajeros, y destacó el hecho de que la mayoría lo efectuaron en modo aéreo, con 2.84 millones de personas que eligieron al avión. El automóvil y el autobús participaron con 0.80 y 0.84 millones de viajeros, respectivamente.

Respecto al par CDMX-VER, en 2013, entre los nodos extremos viajaron un poco más de 2.55 millones de personas; la mayor parte de estas eligieron el automóvil, 1.01 millones, mientras que 1.02 y 0.53 millones de viajeros optaron por emplear el autobús, los primeros, y el avión, los segundos.

En el escenario hipotético, la cantidad de usuarios en la LAV se obtuvo, de nueva cuenta, tal como se hizo en los viajes de corto itinerario, sumando la demanda compuesta por los viajeros

que migraron provenientes del automóvil, el autobús y el avión, más la cantidad de viajeros inducidos a realizar el viaje gracias a la presencia del nuevo medio ofertado. Igualmente, la cantidad de carga que se consideró fue desviada de los camiones y la aviación hacia el TAV, se consideró que esta representa el 10% de la que utiliza estos medios, por ser el promedio que obtuvo Liang *et al.* (2016). En la Tabla 17, se muestran la cantidad de usuarios y mercancías que utilizaron la hipotética LAV, en el año de estudio.

Tabla 17:  
Composición de usuarios del TAV, viajes directos, año 2013.

Par	Tipo de vehículo	Pasajeros en TAV		Carga en TAV (ton/año)
		Atraídos (Pax/año)	Inducidos (Pax/año)	
GDL- CDMX	A	136,784		---
	B	67,248		---
	C	---	69,948	460,145
	Avión	495,445		1,571
CDMX- VER	A	172,381		---
	B	81,704		---
	C	---	34,599	251,586
	Avión	91,905		270

Para los viajes directos, en la Tabla 17 se puede observar como el número de viajeros que fueron atraídos al TAV corresponde al 17% de usuarios del automóvil, al 8.04% de usuarios del autobús y al 17.44% de los usuarios del avión, porcentajes acordes a lo que reportó Modelística (2014) y se dedujo de Herrera-García y Sánchez-López (2014), respectivamente. De nueva cuenta, al igual que en los viajes de corto itinerario, los viajeros inducidos representan el 10% de la demanda atraída, de acuerdo a la experiencia de García-Álvarez (2016) y Fernández-Jañez (2012). La cantidad de carga, proveniente de los vehículos tipo C y de los aviones, corresponde al 10% del total que estos medios transportaron en el año de estudio, de acuerdo al promedio de lo que obtuvo Liang *et al.* (2016). En la Tabla 18 se ordenaron la cantidad de pasajeros y carga que, durante el 2013, hipotéticamente utilizaron el servicio del TAV; esta información se utilizó para calcular la cantidad de trenes que prestaron el servicio en los dos corredores de itinerario completo. Se consideraron de nuevo, trenes tipo Renfe 112, con capacidad de 365 pax/tren (Ferropedia, 2019), y trenes con capacidad de 500 ton (Liang *et al.*, 2016), para

diferenciar entre los que fueron empleados para transporte de personas y para transporte de mercancías.

Tabla 18:  
TAV para prestar servicio en viajes directos, año 2013.

Par	Pax/año	Ton/año	Trenes por año		
			Pasajeros	Carga	Total
<b>GDL-CDMX</b>	769,425	461,716	2,108	923	3,031
<b>CDMX-VER</b>	380,589	251,856	1,043	504	1,546

Tal como se explicó para los viajes de corto itinerario, el diferenciar entre trenes de pasajeros y trenes de mercancías fue útil en el cálculo del consumo energético y la subsecuente emisión de GEI, ya que cada tipo de tren representa una masa distinta. En viajes directos, la liberación de espacio debida a la inclusión de la LAV en los corredores de transporte, se materializó en la cantidad de pasajeros y carga atraídos hacia esta. Al restar estas magnitudes de la correspondiente que utilizó en los medios ofertados en el escenario actual, para el año 2013, se obtuvo la cantidad de pasajeros y carga que durante ese año utilizaron cada medio de transporte en el escenario hipotético, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19:  
Usuarios, viajes directos, escenario hipotético, año 2013.

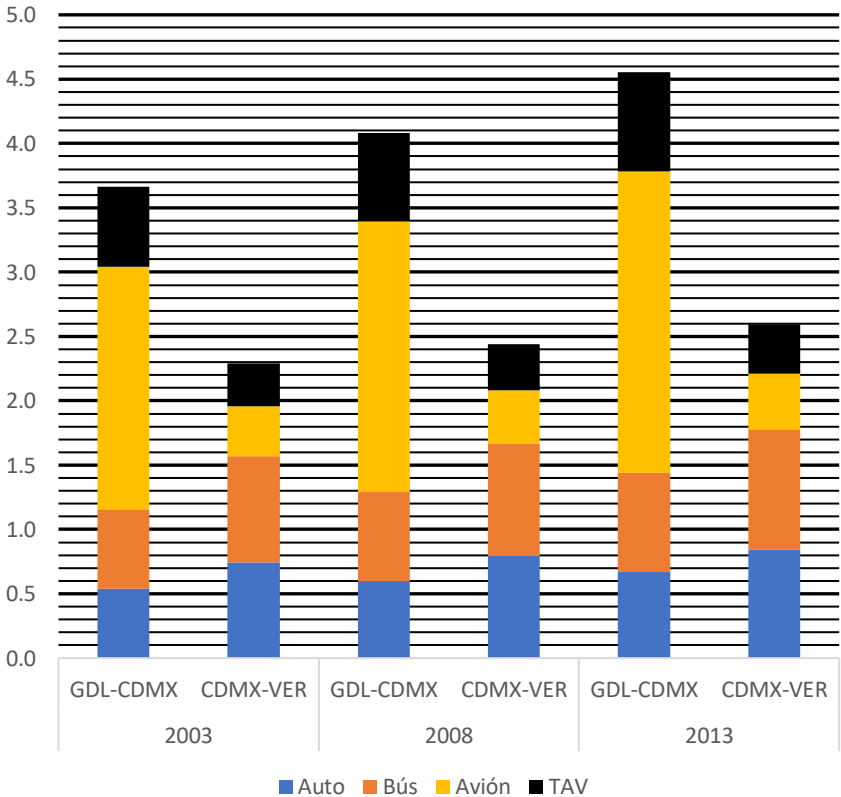
Par	Tipo de vehículo	Viajeros (Pax/año)	Carga (Ton/año)
<b>GDL-CDMX</b>	<b>A</b>	667,829	---
	<b>B</b>	770,210	---
	<b>C</b>	---	4,141,305
	<b>Avión</b>	2,345,410	14,135
	<b>TAV</b>	769,425	461,716
<b>CDMX-VER</b>	<b>A</b>	841,624	---
	<b>B</b>	935,781	---
	<b>C</b>	---	2,264,276
	<b>Avión</b>	435,076	2,430
	<b>TAV</b>	380,589	251,856

Para estimar la cohesión territorial, en el apartado 0, se proyectó la cantidad de viajeros de la Tabla 19, desde el año 2013 hacia los precedentes años censales, 2003 y 2008, haciendo uso de



la Ecuación (5). La cantidad de carga no se consideró en el cálculo de la cohesión territorial, pero fue un dato que se utilizó posteriormente en la obtención de la energía consumida y los GEI emitidos. De esta forma, se elaboró la Figura 20, que resume las cantidades de pasajeros que se movilizaron en los tres medios de transporte (los actualmente ofertados más el hipotético TAV) durante los tres años censales, en los dos pares de itinerario completo considerados.

Figura 20:  
Viajeros (millones), itinerario completo, escenario hipotético.



En la Figura 20 se plasmó el escenario propuesto para los viajes de itinerario completo, agregado a los medios ofertados actualmente, el servicio del tren de alta velocidad. La cantidad de usuarios que emplearon este último modo se obtuvo al considerar que desde el automóvil migraron el 17% de viajeros, desde el autobús el 8.04% (Modelística, 2014) y desde el avión el 17.44% (Herrera-García y Sánchez-López, 2014). Además, la cantidad total de personas viajó

en el tren de alta velocidad se incrementó en un 10% por concepto de viajeros inducidos, de acuerdo a lo investigado por García-Álvarez, 2016 y Fernández-Jañez, 2012.

Para el año 2013, el que mayor cantidad de viajes registró, el par GDL-CDMX tuvo un incremento de 0.07 millones de personas, pasó de 4.48 millones, con los medios existentes, a 4.55 millones de viajeros sumando a estos el TAV. En este par la tendencia continuó indicando que la mayor parte de los usuarios eligieron el avión, con 2.35 millones de estos, seguido por el autobús y el TAV, ambos con 0.77 millones, en tercero y último lugar de las preferencias se encontró al automóvil, con 0.67 millones de pasajeros. Respecto al par CDMX-VER, el escenario propuesto presentó 2.59 millones de usuarios, lo que representa un aumento de 0.03 millones respecto al escenario ofertado actualmente. Esta cantidad de usuarios se desagregó de la siguiente manera: 0.84 millones de personas viajaron en automóvil, 0.94 millones en autobús, 0.38 millones en el TAV y 0.44 millones en avión. En este caso, el automóvil acaparó la mayor parte de las preferencias por viajar en este par origen-destino.

Para ambos arcos, los incrementos que se obtuvieron para la cantidad de personas viajando, se explican debido a los viajes que fueron inducidos al enriquecer la oferta de transporte con el tren de alta velocidad.

#### **4.4. El valor del tiempo de los usuarios**

Para el año 2013, CONASAMI (2018) estableció un valor para el salario mínimo general de \$64.76 pesos mexicanos por día para los trabajadores dentro de la denominada zona “A”, que incluía las Entidades Federales de Baja California, Baja California Sur y Distrito Federal, y municipios de Guerrero, Chihuahua, Jalisco, Estado de México, Nuevo León, Sonora, Tamaulipas y Veracruz, y de \$61.38 pesos mexicanos por día para el resto de Entidades. Debido a que los corredores que se analizaron en la presente investigación involucran entidades tanto en la zona “A” como en la zona “B”, para efectos prácticos se adoptó como valor el promedio de ambos salarios mínimos, resultando en \$63.07 pesos mexicanos por día. Para ese mismo año, con datos de INEGI (2019), se obtuvo que las horas promedio trabajadas por semana son 43.975 horas y el factor de ingreso promedio de la población es de 3.027 salarios mínimos; por lo tanto, al tomar como referencia estos valores y el criterio de Alberro-Semerena (2008), al

sustituir los datos en las Ecuaciones (9) y (10) obtendremos el valor del tiempo al viajar en carretera y avión con motivo de trabajo y ocio. Estos valores del tiempo aplicaron para los viajeros que se mantuvieron en su actual modo de transporte, así como para aquellos que, provenientes de alguno de estos, migraron hacia el tren de alta velocidad propuesto, es decir, el tráfico atraído. En cuanto a las personas que conforman el tráfico inducido, aquellos usuarios que viajaron por primera vez motivados por la existencia del nuevo modo en la oferta de transporte, se les asignó un valor de tiempo promedio entre los consumidores del modo carretero y el modo aéreo, los resultados se ordenaron en la Tabla 20.

Tabla 20:  
Valores del tiempo, año 2013, pesos mexicanos por hora.

<b>Motivo del viaje</b>	<b>Modo de transporte</b>		
	<b>Carretero</b>	<b>Avión</b>	<b>TAV</b>
<b>Trabajo</b>	\$30.39/hr	\$91.17/hr	\$60.78/hr
<b>Ocio</b>	\$18.23/hr	\$54.69/hr	\$36.46/hr

En cuanto a la desagregación de la cantidad de usuarios por cada motivo de viaje, como ya se explicó previamente se obtuvo en las encuestas origen-destino realizadas por SCT (2013 y 2013b) y por ISA (2015) en los modos carretero y aéreo respectivamente; de esta forma se determinaron los motivos del viaje entre los pares origen-destino estudiados.

Tabla 21:  
Motivo del viaje en los pares origen-destino analizados.

	<b>Motivo del viaje</b>	<b>Modo de transporte</b>		
		<b>Carretero</b>	<b>Avión</b>	<b>TAV</b>
<b>GDL - CDMX</b>	Trabajo	48%	42%	45%
	Ocio	52%	58%	55%
<b>CDMX - VER</b>	Trabajo	55%	42%	49%
	Ocio	45%	58%	51%

En la Tabla 21 se plasmaron los motivos de viaje para los usuarios de los tres modos de transporte considerados en el presente estudio; y se adoptaron tanto para los arcos intermedios de cada par, como para los viajes completos entre los nodos extremos.

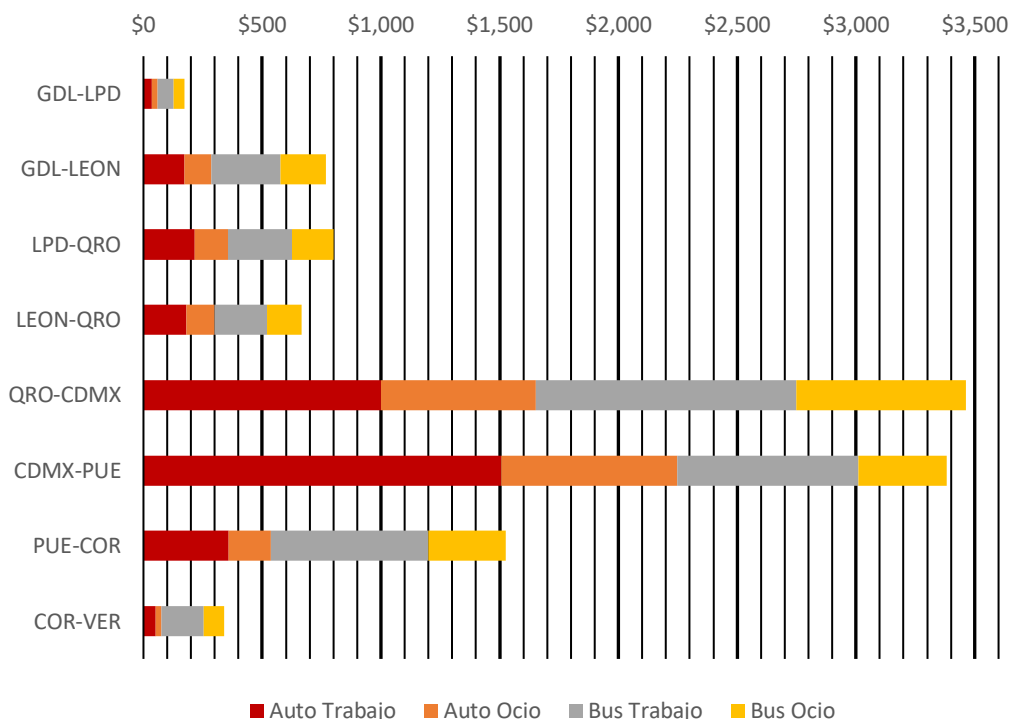
En el modo carretero, SCT (2013 y 2013b) reportó el motivo del viaje únicamente para los viajeros en los automóviles, no obstante, en la presente investigación se adoptaron esos mismos porcentajes para los usuarios de autobús. Esta consideración resultó congruente con lo reportado por Modelística (2014), que realizó encuestas para los motivos de viaje a los usuarios de este último medio y obtuvo resultados muy similares a los que se reportaron en este documento.

Para el modo aéreo, ISA (2015) realizó encuestas a los usuarios del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México para conocer sus motivos de viaje; la categoría que ISA identifica como negocios en su encuesta, en el presente documento se consideró para los viajes por motivo de trabajo, las demás categorías de ISA, que son ajenas al trabajo/negocio, se entenderán como actividades de ocio.

En lo que respecta al tren de alta velocidad, la participación porcentual de cada motivo de viaje se consideró un promedio de aquella que reportaron los otros modos de transporte. Esto resultó coherente con el hecho de que los usuarios del TAV provienen mayormente de la atracción desde los otros modos de transporte, es decir, aquellos pasajeros que realizaban el viaje en automóvil, autobús, o avión, pero que prefirieron utilizar el TAV una vez que se incluyó en la oferta de transporte.

Se analizó el año 2013 para comparar en este el valor total del tiempo consumido por los usuarios en el escenario con los medios actualmente ofrecidos y el escenario donde se agregó a estos el tren de alta velocidad.

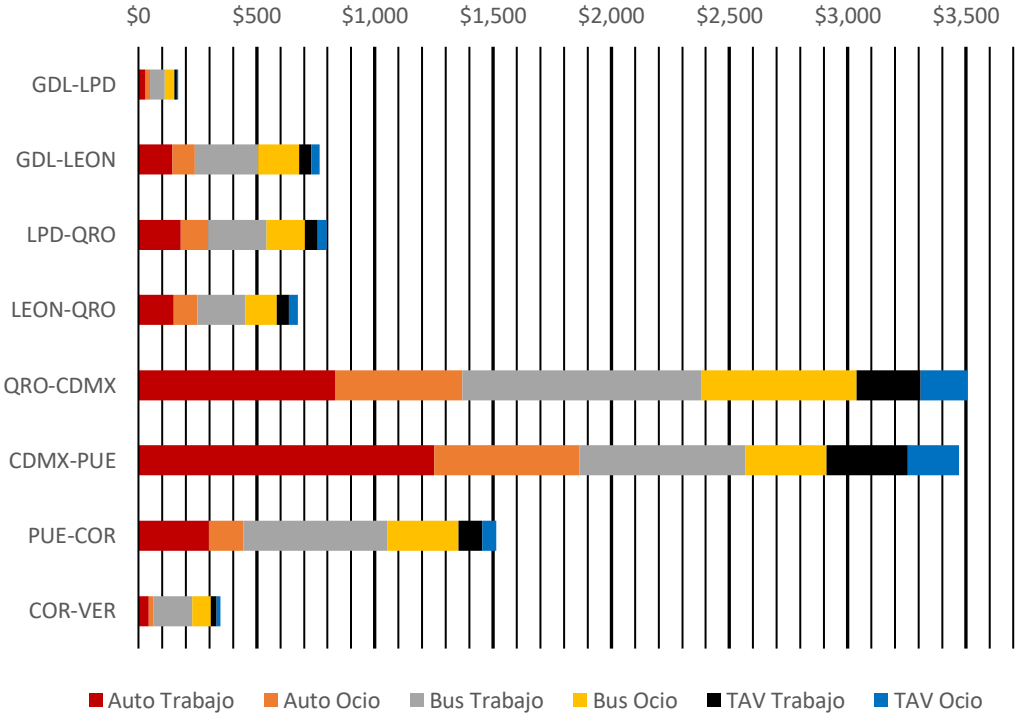
Figura 21:  
Costo del tiempo (millones MXN). Corto itinerario, escenario actual, año 2013.



En los viajes de corto itinerario, para el escenario actual, cuya oferta para transporte de pasajeros existente en cada uno de los arcos consiste en el automóvil y el autobús, al aplicar los porcentajes correspondientes a cada motivo de viaje se obtuvieron los costos del tiempo que se muestran en la Figura 21, para el año 2013. Se observó que en los pares QRO-CDMX y CDMX-PUE, los costos del tiempo se separaron considerablemente respecto a los de otros pares. Durante todo el año 2013 el total del tiempo consumido por los usuarios viajando en los modos actualmente ofrecidos, para el par QRO-CDMX llegó a poco más de los 3,400 millones de pesos, mientras que al par CDMX-PUE le faltó poco para alcanzar dicho monto. Esta situación se explicó por la gran cantidad de viajeros que realizan el viaje en los arcos mencionados. Los arcos que menor costo del tiempo arrojaron fueron el COR-VER y el GDL-LPD, el primero de estos alcanzó poco más de los 170 millones de pesos, mientras que el segundo llegó a los 340 millones de pesos. Llamó la atención el hecho de que el costo del tiempo empleado en el viaje LPD-QRO adquirió un monto superior al que reportó el par LEÓN-QRO. El primero llegó a los 800 millones de pesos y el segundo a los 660 millones de pesos. Esto hizo manifiesto la valía implícita que los tiempos de recorrido adquieren en el análisis, ya que, si bien la cantidad

de usuarios en ambos pares es similar, el tiempo de viaje para el arco LPD-QRO es mayor que para el arco LEÓN-QRO, como puede observarse en las matrices de impedancia correspondientes.

Figura 22:  
Costo del tiempo (millones MXN). Corto itinerario, escenario hipotético, año 2013.



Para el escenario propuesto en los viajes de corto itinerario, en donde la oferta para transporte de pasajeros existente, el modo carretero, se enriqueció con el modo ferroviario de alta velocidad, se aplicaron los correspondientes porcentajes que desagregan los motivos de viaje en el modo existente y el modo propuesto, además, para este último, se diferencié entre los usuarios que migraron del automóvil y el autobús, a los cuales se les aplicó su correspondiente valor del tiempo, y aquellos que fueron inducidos por el TAV, a quienes se les consideró el valor del tiempo que atañe a este. En la Figura 22, se plasmaron los resultados obtenidos para el costo del tiempo en cada arco de corto itinerario del escenario propuesto. La comparación de las gráficas de ambos escenarios nos indicó que solo algunos los arcos de corto itinerario presentaron ahorros por la inclusión del TAV en el corredor de transporte, mientras que en otros no se lograron ahorros e, inclusive, se incrementó el costo. Ejemplos de la primera situación se observó en el par PUE-COR, y GDL-LPD, donde los ahorros en el costo total anual del tiempo

empleado al implementar el TAV en sus respectivos corredores fue de 9.69 y 3.21 millones de pesos, respectivamente. Sin embargo, los ejemplos de la segunda situación arrojaron cifras con incrementos en los costos que superaron a los ahorros mencionados: los pares QRO-CDMX y CDMX-PUE incrementaron su costo total de tiempo, al implementar el servicio del TAV en sus respectivos corredores, de 43.25 y 87.14 millones de pesos respectivamente, para el año considerado. Este resultado puso de manifiesto la importancia que representan los tiempos de acceso y egresos de las terminales en los nodos de origen y destino ya que, como puede observarse en sus respectivas matrices de impedancia, estos son los que incrementaron el tiempo de viaje por encima del ofrecido en el automóvil.

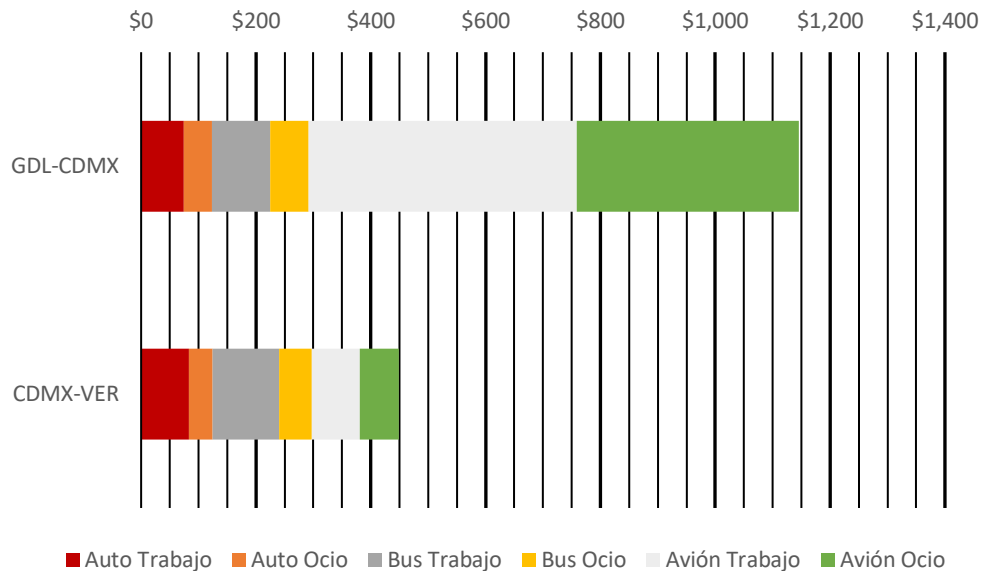
Tabla 22:  
Costo del tiempo (millones MXN), corto itinerario, año 2013.

	<b>Costo del tiempo</b>	
	<b>Escenario existente</b>	<b>Escenario propuesto</b>
<b>GDL-LPD</b>	\$172.04	\$168.82
<b>GDL-LEON</b>	\$767.20	\$766.60
<b>LPD-QRO</b>	\$799.29	\$797.32
<b>LEON-QRO</b>	\$665.91	\$674.71
<b>QRO-CDMX</b>	\$3,462.78	\$3,506.03
<b>CDMX-PUE</b>	\$3,383.03	\$3,470.17
<b>PUE-COR</b>	\$1,524.25	\$1,514.56
<b>COR-VER</b>	\$340.40	\$346.49
<b>Total</b>	<b>\$11,114.89</b>	<b>\$11,244.68</b>

En lo que respecta al costo total en el año considerado para toda la red, se efectuó el resumen que se muestra en la Tabla 22, en la cual, al sumar los resultados para cada par origen-destino de corto itinerario, se observó como el escenario propuesto representó un costo adicional en el tiempo de 129.79 millones de pesos.

Para los viajes de itinerario completo, como ya se mencionó previamente, se incluyó al modo aéreo en la oferta de transporte para pasajeros entre los nodos extremos de cada arco considerado. De esta manera, en la Figura 23, se plasmaron los resultados para el costo total del tiempo en el escenario existente.

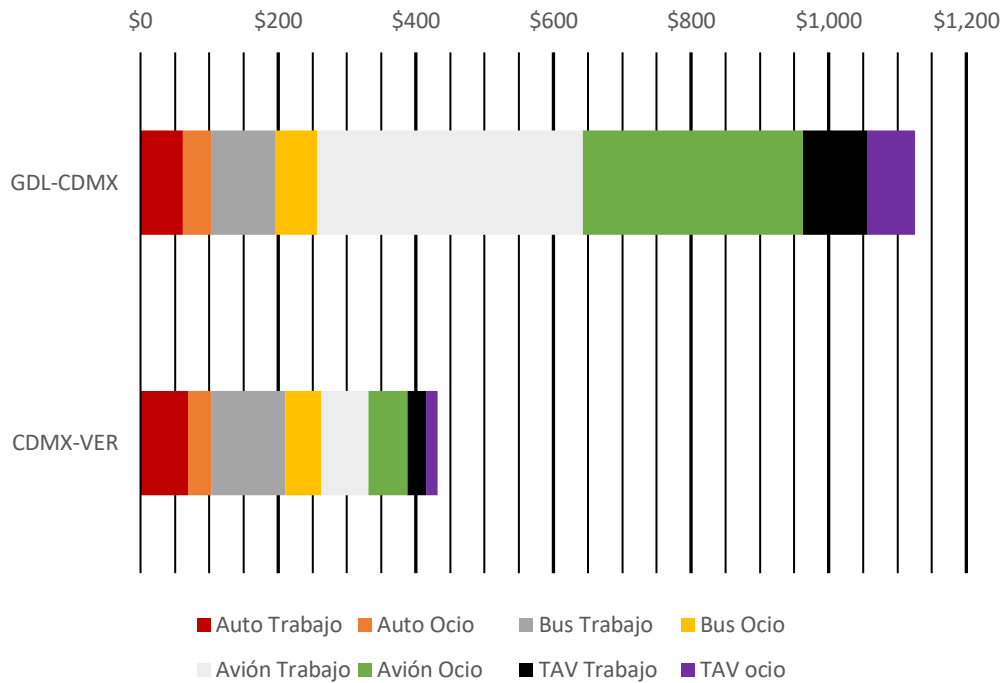
Figura 23:  
Costo del tiempo (millones MXN). Largo itinerario, escenario existente, año 2013.



En este escenario se observó que el par GDL-CDMX alcanzó un costo total del tiempo de sus viajeros de 1,146 millones de pesos. El costo del tiempo con motivo de trabajo utilizando el avión ascendió a casi 470 millones de pesos, siendo el que más participó en el total para este par en el año considerado, le sigue en magnitud el motivo de ocio, también en el avión, con cerca de 390 millones de pesos, de tal forma que, al sumar ambos motivos para el modo aéreo, resultó notorio como el avión participó con el 72% del costo total en este par para el año 2013, dejando el restante 28% repartido entre los medios del modo carretero. El par CDMX-VER indicó un costo total de tiempo, en el año 2013, de aproximadamente 450 millones de pesos. El automóvil implicó 124 millones de pesos y el autobús 173 millones de pesos, sumando ambos motivos de viaje. Mientras que el avión, sumando los motivos de trabajo o de ocio, arrojó un total de 151.5 millones de pesos.



Figura 24:  
Costo del tiempo (millones MXN). Largo itinerario, escenario propuesto, año 2013.



Para el escenario propuesto, en el cual se incluyó al tren de alta velocidad, resultó que, para los viajes de largo itinerario, si hubo ahorros en el tiempo, tal como puede observarse en la gráfica de la Figura 24. Gracias a esta se observó que, con este nuevo esquema en la oferta de transporte, en el par GDL-CDMX el costo por consumo del tiempo en los usuarios ascendió a poco más de 1,125 millones de pesos, lo que significó un ahorro de 20 millones de pesos, aproximadamente, respecto al escenario actualmente ofertado, tan solo en el año 2013. En el escenario hipotético, al igual que en el escenario existente, al sumar ambos motivos de viaje, la mayor parte del costo es absorbida por el avión, con 705 millones de pesos, distribuyendo el resto en los otros modos de transporte: justo debajo del aéreo sigue el TAV, con 163 millones de pesos, posteriormente se posicionó el autobús, con 155 millones de pesos y, en último lugar, se colocó el automóvil, con 102 millones de pesos.

En el par CDMX-VER el costo total del consumo de tiempo se acercó a los 432 millones de pesos, que, al comparar con el escenario existente, representó ahorros un poco mayores a los 17 millones de pesos, contabilizando únicamente al año 2013. Para el escenario propuesto la

distribución modal del costo en el tiempo de viaje, sumando los que son por trabajo y los que son por ocio, ordenando de mayor a menor, dejó en primer lugar al autobús, con poco más de 159 millones de pesos, seguido por el avión y el automóvil, con costos aproximados de 125 y 103 millones de pesos, respectivamente. En esta línea la participación del TAV se posicionó en último lugar, con un consumo de tiempo que supera con poco a los 44 millones de pesos.

Tabla 23:  
Costo del tiempo (millones MXN), itinerario completo, año 2013.

	<b>Escenario existente</b>	<b>Escenario propuesto</b>
<b>GDL-CDMX</b>	\$1,146.09	\$1,125.91
<b>CDMX-VER</b>	\$449.07	\$431.93
<b>Total</b>	<b>\$1,595.15</b>	<b>\$1,557.84</b>

Al comparar el costo total en el año considerado para toda la red, se efectuó el resumen que se muestra en la Tabla 23. En este, al sumar los resultados para cada par origen-destino de largo itinerario, se observó como el escenario propuesto representó ahorros en el costo del tiempo de 37.31 millones de pesos, tan solo en el año 2013.

## 4.5. La productividad y la cohesión territorial

### 4.5.1. Obtención de la población en cada nodo

En la Tabla 24, se plasma la población que INEGI (2000 y 2010) contabilizó en cada una de las ciudades en las que se propuso emplazar estaciones para la línea de alta velocidad ferroviaria. Además, en base a la información reportada en estos años, se presenta la tasa de crecimiento anual promedio, que se calculó mediante la Ecuación (6). El prefijo ‘ZM’ que puede observarse en la mayoría de las localidades presentadas, hace referencia a que se consideró el tamaño poblacional de la respectiva zona metropolitana, de acuerdo a la información que se obtuvo de INEGI (2000 y 2010). En aquellas localidades que no cuentan con dicho prefijo, la población se refiere al valor específico obtenido para ese municipio en los mismos censos del INEGI.

Tabla 24:  
Cantidad de habitantes (miles), y tasa de crecimiento.

	Año		<i>r</i>
	2000	2010	
<b>ZMGDL</b>	3,477.10	4,380.60	0.0234
<b>LPD</b>	83.38	99.58	0.0179
<b>ZMQRO</b>	874.42	1,161.46	0.0288
<b>ZMVM</b>	18,396.68	20,106.63	0.0089
<b>ZMLEÓN</b>	1,414.20	1,791.87	0.0240
<b>ZMPUE</b>	2,288.53	2,578.10	0.0120
<b>COR</b>	176.45	196.54	0.0108
<b>VER</b>	453.36	552.16	0.0199

Estas poblaciones se proyectaron para los años 2003, 2008 y 2013, debido a que son los años correspondientes a los censos económicos que realizó INEGI (2020) y que reportó al año siguiente de levantado el correspondiente censo; por lo tanto, haciendo uso de la Ecuación (5), y la tasa de crecimiento anual promedio previamente obtenida, proyectamos la población en cada una de las localidades para estos años. Estos valores se plasmaron en la Tabla 25.

Tabla 25:  
Cantidad de habitantes (miles), años de censo económico

	Año		
	2003	2008	2013
<b>ZMGDL</b>	3,726.59	4,182.83	4,694.92
<b>LPD</b>	87.92	96.11	105.03
<b>ZMQRO</b>	952.15	1,097.36	1,264.71
<b>ZMVM</b>	18,893.80	19,752.37	20,649.96
<b>ZMLEÓN</b>	1,518.27	1,709.02	1,923.73
<b>ZMPUE</b>	2,371.81	2,517.39	2,671.92
<b>COR</b>	182.25	192.35	203.00
<b>VER</b>	480.98	530.81	585.80

Las magnitudes de estas poblaciones se utilizaron en el cálculo de los índices de accesibilidad, como se verá en apartados siguientes, y se utilizaron cifras en miles de habitantes para que dichos índices resultaran con una cantidad de cifras fácilmente manejable en las subsecuentes etapas del procedimiento.

#### 4.5.2. La accesibilidad potencial y los índices de accesibilidad

Identificando matrices de accesibilidad potencial para cada medio de transporte y cada año en estudio, se realizaron las operaciones aritméticas requeridas para alimentar cada matriz de accesibilidad potencial y considerando los respectivos tiempos de acceso, espera y egreso. Los resultados se ordenaron en sus respectivas casillas, de acuerdo al arreglo matricial, y se formaron así las matrices correspondientes a cada par origen destino. Por ejemplo, en la Figura 25, se muestra la matriz de accesibilidad potencial obtenida para el arco de corto itinerario GDL-LEON, viajando en automóvil, en el año 2013.

Figura 25:  
Matriz de accesibilidad potencial GDL-LEON, en automóvil, año 2013.

	GDL	LEON
GDL	0	54.64
LEÓN	133.36	0

Aplicando la sumatoria indicada por la ecuación de la accesibilidad potencial, a su respectiva matriz, se llegó al valor de accesibilidad potencial de 192.43 para el par ejemplificado.

En lo que respecta a los viajes de itinerario completo, pasando por cada uno de los nodos intermedios, por ejemplo, para el par GDL-CDMX en la alternativa que cruza la ciudad de León, utilizando automóvil, en el año 2013, la matriz de accesibilidad potencial quedó como se muestra a continuación, en la Figura 26:

Figura 26:  
Matriz de accesibilidad potencial GDL-CDMX, por León, en automóvil, año 2013.

	GDL	LEÓN	QRO	CDMX
GDL		54.64	22.97	278.05
LEÓN	133.36		40.63	383.50
QRO	85.29	61.80		615.77
CDMX	63.22	35.73	37.71	

De igual manera a como se realizó previamente, a la matriz de accesibilidad que se muestra en la Figura 26, se le aplicó la sumatoria requerida por la Ecuación (11), resultando un valor de 1,812.67, el cual representa la accesibilidad potencial para el par GDL-CDMX en la ruta por León, utilizando automóvil y considerando paradas en cada nodo intermedio, para el año 2013. Este mismo procedimiento se aplicó a cada uno de los pares origen-destino, en primer lugar, en corto itinerario, considerando paradas en todos los nodos, y posteriormente en itinerario completo, considerando viajes directos entre los nodos extremos de cada ruta. Los resultados de la sumatoria de cada matriz de accesibilidad potencial, para cada medio de transporte en cada año de estudio, se resumió de manera ordenada en tablas donde se incluyeron los medios de transporte existentes y el propuesto tren de alta velocidad.

Como puede observarse, en la Tabla 26 y en la Tabla 27, se plasmaron los valores de accesibilidad potencial para cada par origen-destino en corto itinerario. En la primera se consideraron las dos opciones para la ruta Guadalajara – Ciudad de México, y en la segunda se incluyó la accesibilidad potencial para la ruta Ciudad de México – Veracruz.

Respecto a la Tabla 26, al comparar las dos alternativas para realizar el viaje, se observó que las variaciones en los valores de la Accesibilidad Potencial para el arco GDL-LEON, estuvieron en torno al 46% más altos a los que se obtuvieron para el arco GDL-LPD cuando se empleó el automóvil, alrededor del 41% mayores con el autobús, y rondando el 28% superior con el tren de alta velocidad. Mientras que los valores del arco LEON-QRO, respecto a los del arco LPD-QRO, son superiores en una media del 166%, cuando se utilizó el automóvil, rondando el 153% cuando se empleó el autobús, y un aproximado del 140% con el tren de alta velocidad. Cada año en estudio registró variaciones porcentuales al comparar la accesibilidad potencial de un mismo medio de transporte, debido a los cambios que presentó cada nodo en su cantidad de habitantes, como se observó en el apartado correspondiente.

Tabla 26:  
Accesibilidad potencial, corto itinerario, GDL-CDMX, en sus dos opciones.

<b>OPCIÓN POR LA PIEDAD</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>GDL-LPD</b>	<b>LPD-QRO</b>	<b>QRO-CDMX</b>
<b>2003</b>	<b>Automóvil</b>	102.41	29.50	591.79
	<b>Autobús</b>	68.85	19.60	389.20
	<b>TAV</b>	112.36	29.82	553.65
<b>2008</b>	<b>Automóvil</b>	114.88	33.86	621.73
	<b>Autobús</b>	77.24	22.49	408.89
	<b>TAV</b>	126.03	34.22	581.65
<b>2013</b>	<b>Automóvil</b>	128.86	38.86	653.48
	<b>Autobús</b>	86.64	25.81	429.77
	<b>TAV</b>	141.38	39.27	611.36
<b>OPCIÓN POR LEÓN</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>GDL-LEÓN</b>	<b>LEÓN-QRO</b>	<b>QRO-CDMX</b>
<b>2003</b>	<b>Automóvil</b>	148.98	79.36	591.79
	<b>Autobús</b>	96.58	50.27	388.94
	<b>TAV</b>	143.94	72.49	553.65
<b>2008</b>	<b>Automóvil</b>	167.36	90.16	621.73
	<b>Autobús</b>	108.49	57.10	408.62
	<b>TAV</b>	161.69	82.34	581.65
<b>2013</b>	<b>Automóvil</b>	188.01	102.43	653.48
	<b>Autobús</b>	121.87	64.88	429.49
	<b>TAV</b>	181.64	93.55	611.36

En la misma Tabla 26, se pudo observar que la accesibilidad potencial para el arco QRO-CDMX es idéntico en ambas alternativas del trayecto. Esto se debió a la utilización de una misma ruta para las dos opciones, partiendo de la ciudad de Querétaro hacia la Ciudad de México.

Para la tercera línea que se estudió en el presente trabajo, enlazando el par CDMX-VER, se observó, a partir de la información vertida en la Tabla 27, que el arco CDMX-PUE es el que presentó una mayor accesibilidad potencial respecto a los otros dos arcos. Esto se debió, de nueva cuenta tal como se explicó para las líneas anteriores, a la gran concentración poblacional existente en las zonas metropolitanas de las ciudades de México y Puebla. Resultó notorio como, en la totalidad de la ruta CDMX-VER, la accesibilidad potencial va decreciendo conforme el viaje se aleja del nodo CDMX, mientras que para la ruta GDL-CDMX, en sus dos opciones de recorrido, los nodos extremos adquirieron un valor más alto de accesibilidad potencial, respecto al nodo intermedio.

Tabla 27:  
Accesibilidad potencial, corto itinerario, CDMX-VER.

<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>CDMX-PUE</b>	<b>PUE-COR</b>	<b>COR-VER</b>
<b>2003</b>	<b>Automóvil</b>	722.95	76.88	29.46
	<b>Autobús</b>	451.35	49.55	15.68
	<b>TAV</b>	665.92	75.48	21.15
<b>2008</b>	<b>Automóvil</b>	757.09	81.57	32.12
	<b>Autobús</b>	472.66	52.57	17.09
	<b>TAV</b>	697.37	80.08	23.06
<b>2013</b>	<b>Automóvil</b>	792.85	86.54	35.03
	<b>Autobús</b>	494.99	55.77	18.64
	<b>TAV</b>	730.31	84.96	25.15

En lo que respecta a los viajes de itinerario completo, los respectivos valores de accesibilidad potencial se ordenaron y resumieron en la Tabla 28. En esta, el par GDL-CDMX se presentó en dos columnas, aquella con el superíndice 1, indica la ruta pasando por La Piedad, mientras que el superíndice 2 se refiere al mismo par, pero utilizando la ruta pasando por León.

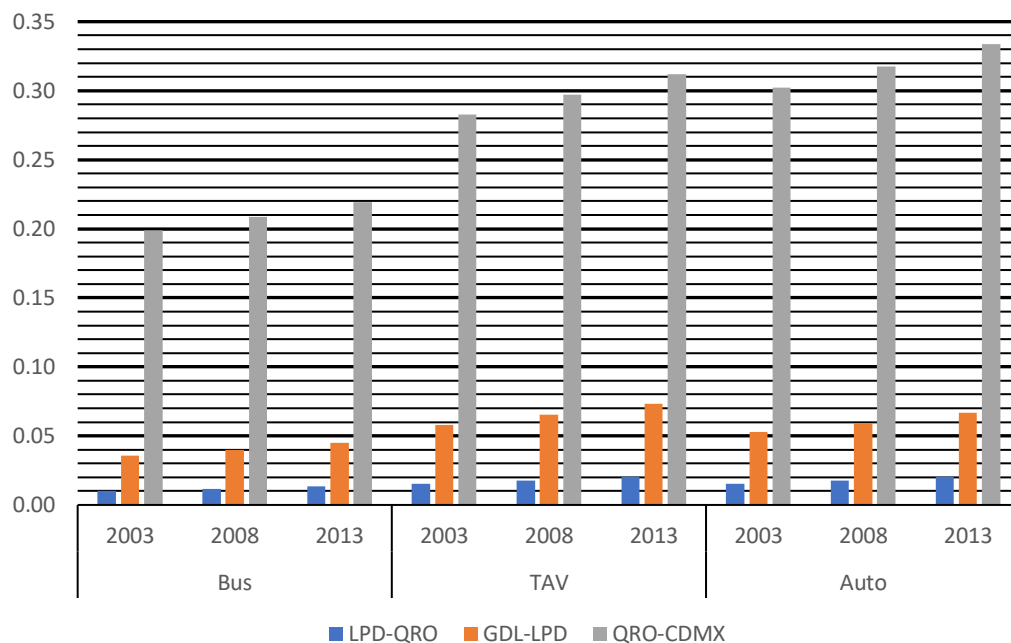
Tabla 28:  
Accesibilidad potencial, itinerario completo.

<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>GDL- CDMX<sup>1</sup></b>	<b>GDL- CDMX<sup>2</sup></b>	<b>CDMX- VER</b>
<b>2003</b>	<b>Automóvil</b>	1,421.88	1,588.80	1,562.29
	<b>Autobús</b>	1,032.29	1,136.38	1,077.60
	<b>TAV</b>	1,672.30	1,712.01	1,744.60
<b>2008</b>	<b>Automóvil</b>	1,510.54	1,696.02	1,638.97
	<b>Autobús</b>	1,096.52	1,212.27	1,130.23
	<b>TAV</b>	1,777.54	1,827.08	1,829.50
<b>2013</b>	<b>Automóvil</b>	1,606.38	1,812.67	1,719.59
	<b>Autobús</b>	1,165.94	1,294.77	1,185.54
	<b>TAV</b>	1,891.37	1,952.22	1,918.70

Destaca el hecho de que, en lo que atañe exclusivamente a la accesibilidad potencial, tanto en viajes de corto itinerario y de itinerario completo, se obtuvo que los pares QRO-CDMX y CDMX-PUE resultaron con los valores más altos, situación que resultó natural debido a la cantidad de población que los tres nodos concentran. No obstante, la tabla con los datos de la accesibilidad potencial para los viajes de itinerario completo solo se utilizó para seleccionar el valor patrón de accesibilidad; este correspondió a la accesibilidad ofrecida por el hipotético tren de alta velocidad en el par Guadalajara – Ciudad de México, pasando por León, para el año 2013. A partir de este se obtuvieron los índices de accesibilidad en cada arco de corto itinerario para cada ruta, dividiendo las correspondientes accesibilidades potenciales entre el valor patrón.

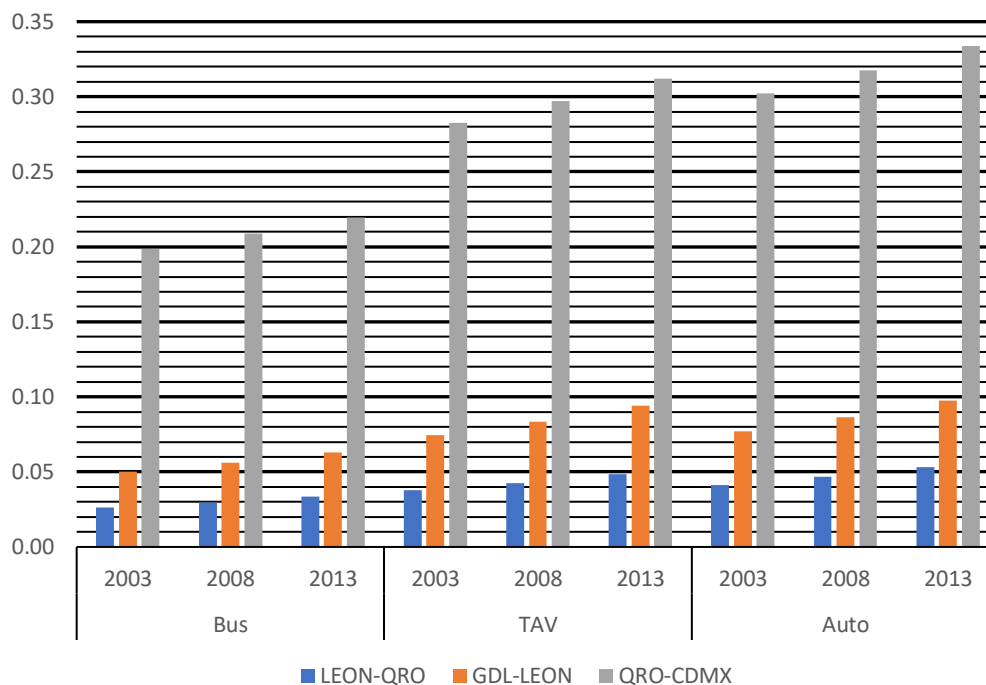


Figura 27:  
Índices de accesibilidad, ruta GDL-CDMX, por La Piedad



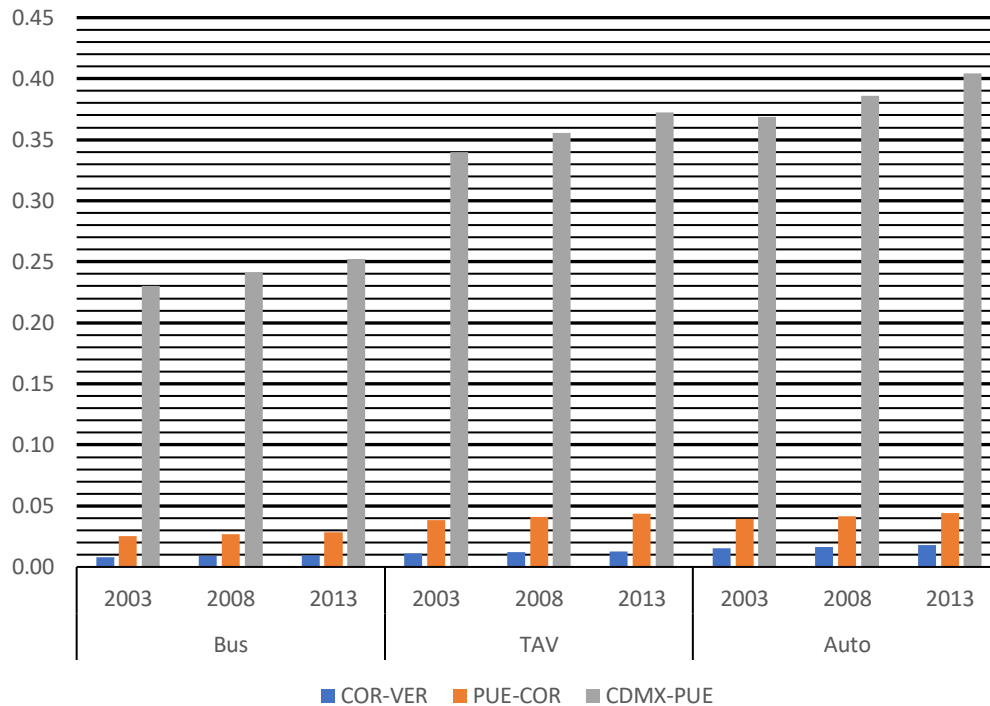
Los índices de accesibilidad se representaron de manera gráfica, ordenando de menor a mayor el valor que este parámetro va adquiriendo, agrupándolo por pares y medios de transporte; de esta manera se logró destacar que, que para todas las rutas que se investigaron en esta investigación, el índice es creciente conforme avanza el tiempo.

Figura 28:  
Índices de accesibilidad, ruta GDL-CDMX, por León



En la Figura 27, se muestra el gráfico obtenido para los índices de accesibilidad en los arcos intermedios a la ruta GDL-CDMX, pasando por La Piedad. El par LPD-QRO es el que manifestó los menores índices en los tres medios de transporte, seguido por el par GDL-LPD, teniendo un incremento considerable en el par QRO-CDMX. Destacó el hecho de que, al comparar los índices de accesibilidad del TAV contra los del automóvil, estos fueron menores en el par QRO-CDMX, muy similares en el GDL-LPD, y ligeramente superiores en el par LPD-QRO. Resultados similares se obtuvieron para la opción de esta ruta que pasa por León, tal como se plasma en la gráfica de la Figura 28, en la cual se observó, además, que los índices de accesibilidad para los arcos intermedios LEÓN-QRO y GDL-LEÓN, resultaron mayores a los análogos de la primera alternativa.

Figura 29:  
Índices de accesibilidad, ruta CDMX-VER



Respecto a los arcos intermedios a la ruta Ciudad de México – Veracruz, en la Figura 29 se graficaron los valores para sus índices de accesibilidad. Es notorio como par CDMX-PUE reportó valores muy altos respecto a los otros dos arcos, inclusive mayores que los obtenidos para el arco QRO-CDMX, previamente descrito. Para los arcos intermedios PUE-COR y COR-VER, los índices de accesibilidad son pequeños en esta ruta, inclusive menores que los emanados de los arcos intermedios en la ruta GDL-CDMX, en sus dos alternativas. El par de nodos en cuyas zonas metropolitanas se cuantificó gran cantidad de habitantes, Ciudad de México y Puebla, alcanzó un índice de accesibilidad en automóvil mayor que al TAV, para los tres años estudiados. Sin embargo, este último medio de transporte logro índices de accesibilidad mayores al autobús y al automóvil en los pares COR-VER y PUE-COR.

El siguiente paso consistió en asignar la jerarquía correspondiente a cada índice de accesibilidad. Esta jerarquía tomó como base la cantidad de usuarios que realizaron el viaje en cada uno de los arcos considerados en el presente trabajo, utilizando los dos medios realmente disponibles y el propuesto tren de alta velocidad que transportaron pasajeros en los años

censales estudiados. La magnitud de la jerarquía se materializó en forma de ponderador, que afectó a su respectivo índice de accesibilidad.

De esta manera se consideraron dos escenarios: el primero representó la situación real, abarcando los medios de transporte existentes para pasajeros, el automóvil y el autobús; y en el segundo se configuró la situación propuesta, que consideró al tren de alta velocidad en la oferta de transporte.

A partir de la cantidad de usuarios mostrada en los apartados precedentes, se definieron ponderadores que multiplicaron a cada índice de accesibilidad y se obtuvo el valor observado para la variable de accesibilidad del modelo en la Ecuación 22. Los ponderadores para cada medio de transporte se obtuvieron en base a la cantidad de personas que hacen uso de estos, tomando como referencia la cantidad total de viajeros que utilizaron cualquiera de los medios realmente disponibles y, al igual como se hizo para el número de viajeros, desagregando en dos escenarios: el primero para los medios de transporte realmente ofertados y el segundo incluyó al TAV.

En la Tabla 29 se muestran los índices de accesibilidad ponderados que se obtuvieron para el primer escenario, que contempló únicamente a los medios existentes. En el par Guadalajara – Ciudad de México, los ponderados para el arco QRO-CDMX resultaron idénticos en ambas opciones de recorrido, situación que resulta congruente con el hecho de que ambas alternativas confluyen en la ciudad de Querétaro y, a partir de ahí se tomó un único camino hacia la Ciudad de México.

De nueva cuenta, en ambas rutas, es notorio como los arcos que contienen a la Ciudad de México presentan valores altos con respecto a los obtenidos en cualquier otro de los arcos; inclusive esta situación se presentó de manera más drástica en la ruta Ciudad de México-Puebla, circunstancia que se explica debido a la gran cantidad de habitantes presentes en ambas zonas metropolitanas.

Tabla 29:  
Índice de accesibilidad ponderado, escenario actual.

<b>GUADALAJARA – CIUDAD DE MÉXICO, POR LA PIEDAD</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>GDL-LPD</b>	<b>LPD-QRO</b>	<b>QRO-CDMX</b>
<b>2003</b>	<b>Auto</b>	0.025	0.009	0.187
	<b>Bus</b>	0.019	0.004	0.076
	<b>SUM</b>	0.044	0.013	0.263
<b>2008</b>	<b>Auto</b>	0.028	0.010	0.196
	<b>Bus</b>	0.021	0.005	0.080
	<b>SUM</b>	0.049	0.015	0.276
<b>2013</b>	<b>Auto</b>	0.031	0.012	0.206
	<b>Bus</b>	0.024	0.006	0.084
	<b>SUM</b>	0.055	0.017	0.290
<b>GUADALAJARA – CIUDAD DE MÉXICO, POR LEÓN</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>GDL-LEON</b>	<b>LEON-QRO</b>	<b>QRO-CDMX</b>
<b>2003</b>	<b>Auto</b>	0.040	0.025	0.187
	<b>Bus</b>	0.024	0.010	0.076
	<b>SUM</b>	0.064	0.035	0.263
<b>2008</b>	<b>Auto</b>	0.045	0.028	0.196
	<b>Bus</b>	0.027	0.012	0.080
	<b>SUM</b>	0.072	0.040	0.276
<b>2013</b>	<b>Auto</b>	0.050	0.032	0.206
	<b>Bus</b>	0.030	0.013	0.084
	<b>SUM</b>	0.081	0.045	0.290
<b>CIUDAD DE MÉXICO - VERACRUZ</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>CDMX-PUE</b>	<b>PUE-COR</b>	<b>COR-VER</b>
<b>2003</b>	<b>Auto</b>	0.291	0.020	0.006
	<b>Bus</b>	0.048	0.013	0.005
	<b>SUM</b>	0.340	0.032	0.011
<b>2008</b>	<b>Auto</b>	0.305	0.021	0.007
	<b>Bus</b>	0.051	0.014	0.005
	<b>SUM</b>	0.356	0.034	0.012
<b>2013</b>	<b>Auto</b>	0.320	0.022	0.007
	<b>Bus</b>	0.053	0.014	0.006
	<b>SUM</b>	0.373	0.036	0.013

La suma de los índices de accesibilidad ponderados para el escenario actual se utilizó para alimentar la variable independiente  $X_4$  del modelo presentado en la Ecuación (17), como valor

observado. De esta forma se obtuvieron cuatro ecuaciones del comportamiento predicho: una para la totalidad de la red, considerando las tres rutas y sus ocho nodos; dos para la ruta GDL-CDMX, considerando de manera individual cada alternativa de recorrido, con cuatro nodos en cada opción; y una para la ruta CDMX-VER, donde se incluyeron sus cuatro nodos.

Los índices de accesibilidad ponderados que contienen la inclusión del servicio ferroviario de alta velocidad en la oferta a los pasajeros se alimentaron, posteriormente, en la mencionada variable independiente  $X_4$  para cada una de las ecuaciones mencionadas, y así se compararon las variaciones que se obtuvieron en la productividad predicha.

Estos índices de accesibilidad ponderados con el TAV incluido en la oferta se plasmaron en la Tabla 30. Para la ruta Guadalajara-Ciudad de México incluyeron sus dos opciones de recorrido. Los valores para el arco QRO-CDMX en ambas rutas resultaron idénticos, análogamente a como se ha explicado previamente, y se notó que en general los resultados en la alternativa que pasa por León son más altos que los obtenidos en la opción por La Piedad; de nueva cuenta, la cantidad de habitantes fue el factor decisivo que justificó estos efectos, ya que el nodo de la Zona Metropolitana de León, reportó una población mayor a la del nodo de La Piedad.

También la Tabla 30 resume el índice de accesibilidad ponderado para cada arco en la ruta Ciudad de México-Veracruz, una vez que se incluyó al tren de alta velocidad. Los incrementos en los valores para este índice en el escenario propuesto no resultaron muy notorios con respecto a los que se obtuvieron en el primer escenario, inclusive, en el arco COR-VER la suma arrojó el mismo valor en ambos casos para cada año estudiado; esta situación se explicó al notar la baja demanda que tiene este arco, lo que derivó en poca cantidad de usuarios que se desviaron desde los medios existentes hacia el TAV y, a razón de esto último, una baja demanda inducida.

Tabla 30:  
Índice de accesibilidad ponderado, escenario hipotético

<b>GUADALAJARA – CIUDAD DE MÉXICO, POR LA PIEDAD</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>GDL-LPD</b>	<b>LPD-QRO</b>	<b>QRO-CDMX</b>
<b>2003</b>	<b>Auto</b>	0.021	0.007	0.155
	<b>Bus</b>	0.017	0.004	0.07
	<b>TAV</b>	0.008	0.002	0.042
	<b>SUM</b>	0.046	0.014	0.267
<b>2008</b>	<b>Auto</b>	0.023	0.009	0.163
	<b>Bus</b>	0.019	0.004	0.073
	<b>TAV</b>	0.009	0.003	0.044
	<b>SUM</b>	0.051	0.016	0.28
<b>2013</b>	<b>Auto</b>	0.026	0.01	0.171
	<b>Bus</b>	0.022	0.005	0.077
	<b>TAV</b>	0.01	0.003	0.047
	<b>SUM</b>	0.058	0.018	0.295
<b>GUADALAJARA – CIUDAD DE MÉXICO, POR LEÓN</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>GDL-LEON</b>	<b>LEON-QRO</b>	<b>QRO-CDMX</b>
<b>2003</b>	<b>Auto</b>	0.033	0.021	0.155
	<b>Bus</b>	0.022	0.01	0.07
	<b>TAV</b>	0.01	0.006	0.042
	<b>SUM</b>	0.066	0.036	0.267
<b>2008</b>	<b>Auto</b>	0.037	0.023	0.163
	<b>Bus</b>	0.025	0.011	0.073
	<b>TAV</b>	0.012	0.006	0.044
	<b>SUM</b>	0.074	0.041	0.28
<b>2013</b>	<b>Auto</b>	0.042	0.027	0.171
	<b>Bus</b>	0.028	0.012	0.077
	<b>TAV</b>	0.013	0.007	0.047
	<b>SUM</b>	0.083	0.046	0.295

Tabla 30: Índice de accesibilidad ponderado, escenario hipotético. (Continuación)

<b>CIUDAD DE MÉXICO - VERACRUZ</b>				
<b>Año</b>	<b>Medio</b>	<b>CDMX- PUE</b>	<b>PUE- COR</b>	<b>COR- VER</b>
<b>2003</b>	<b>Auto</b>	0.242	0.016	0.005
	<b>Bus</b>	0.044	0.012	0.004
	<b>TAV</b>	0.057	0.005	0.001
	<b>SUM</b>	0.343	0.033	0.011
<b>2008</b>	<b>Auto</b>	0.253	0.017	0.006
	<b>Bus</b>	0.046	0.012	0.005
	<b>TAV</b>	0.059	0.006	0.002
	<b>SUM</b>	0.359	0.035	0.012
<b>2013</b>	<b>Auto</b>	0.265	0.018	0.006
	<b>Bus</b>	0.049	0.013	0.005
	<b>TAV</b>	0.062	0.006	0.002
	<b>SUM</b>	0.376	0.037	0.013

En los escenarios propuestos para el índice de accesibilidad ponderado, para ambas rutas, en la opción que se escoja para realizar el recorrido GDL-CDMX, pero exceptuando el arco COR-VER por lo previamente explicado, se observó una disminución en el valor que se reportó para el automóvil y el autobús respecto al escenario verdadero. Esto se explica por el hecho de que, una vez que se incluyó al TAV en la gama de servicios ofertados para el transporte de pasajeros, hubo que restar a los medios existentes la cantidad de personas que migraron al nuevo medio. En el presente trabajo esto se interpretó como que la jerarquía del automóvil y el autobús disminuyó para dar cabida al tren de alta velocidad dentro de la oferta. Además, se consideró dentro del índice de accesibilidad ponderado para el TAV, la demanda inducida, cuya cantidad de usuarios, al no existir en los escenarios primeros, no se contabilizaba para los medios existentes. Esto pudo interpretarse como la importancia que representó esta nueva cuantía de viajeros para que el TAV ganara jerarquía en el presente estudio.

#### **4.5.3. Datos económicos y la adaptación del modelo**

Con los datos de INEGI (2020) se determinó que son 13 los sectores de actividad económica afines a los ocho nodos que conforman la red de alta velocidad ferroviaria. La nomenclatura y



nombre de cada una de estas actividades económicas, de acuerdo a INEGI, son las que se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31:  
Sector de actividad económica comunes en los arcos estudiados

<b>Clave del sector económico</b>	<b>Nombre de la actividad económica</b>
<b>23</b>	Construcción
<b>31</b>	Industrias manufactureras
<b>43</b>	Comercio al por mayor
<b>46</b>	Comercio al por menor
<b>48</b>	Transportes, correos y almacenamiento
<b>52</b>	Servicios financieros y de seguros
<b>53</b>	Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles
<b>54</b>	Servicios profesionales científicos y técnicos
<b>56</b>	Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación
<b>61</b>	Servicios educativos
<b>62</b>	Servicios de salud y de asistencia social
<b>72</b>	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas
<b>81</b>	Otros servicios excepto actividades gubernamentales

Además, también de INEGI (2020), y de acuerdo a los datos requeridos para la variable independiente  $Y$ , así como para las variables independientes  $X_1$ , y  $X_2$ , como puede observarse en las ecuaciones correspondientes mencionadas en la metodología, las características principales investigadas fueron, respetando las claves y nomenclaturas de INEGI (2020), las que se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32:  
Características económicas involucradas

<b>Clave de la característica</b>	<b>Nombre de la característica</b>
<b>H001A</b>	Personal ocupado total
<b>A121A</b>	Consumo intermedio
<b>A131A</b>	Valor agregado censal bruto
<b>Q000A</b>	Acervo total de activos fijos

En INEGI (2020), y en la presente investigación, el personal ocupado total se reportó por número de personas, el consumo intermedio, el valor agregado censal bruto y el acervo total de activos fijos, en millones de pesos mexicanos.

Los datos observados por INEGI (2020), la variable dependiente definida en la Ecuación (17), las variables independientes  $X_1$  y  $X_2$ , así como la dicotómica  $X_3$ , y la de accesibilidad  $X_4$ , se organizaron en cinco diferentes hojas de cálculo para facilitar el manejo de la información.

La primera hoja de cálculo se alimentó con el año en estudio, la totalidad de los pares origen destino, la clave de la actividad económica, las características económicas censales y las variables del modelo, la dependiente  $Y$ , así como las independientes  $X_1$ ,  $X_2$ , y  $X_3$ . En esta hoja de cálculo se omitió la variable independiente de accesibilidad  $X_4$  debido a que se utilizó esta hoja de cálculo para realizar una regresión lineal múltiple que demostró la conveniencia de establecer a  $X_3$  como variable independiente dicotómica del sector 52, y la cantidad de veces que este sector reportó mayor productividad respecto a los demás sectores considerados en la Tabla 31.

La segunda hoja de cálculo se cargó con la misma información que la incluida en la primera y, además, se agregó la variable independiente  $X_4$  con el índice de accesibilidad ponderado logrado en el escenario primero, por los medios existentes, para cada par origen-destino. A partir de esta hoja de cálculo se realizó la segunda regresión lineal, se corroboró la funcionalidad del modelo a la vez que sirvió para mostrar que tan precisamente se explicó la relación entre las variables consideradas.

La tercera y cuarta hojas de cálculo se elaboraron con los datos del par Guadalajara – Ciudad de México, para cada una de las dos opciones en específico: pasando por La Piedad y pasando por León, respectivamente. La quinta hoja de cálculo se realizó con los datos del par Ciudad de México – Veracruz. El modelo para cada una de estas tres hojas de cálculo se evaluó considerando la variable independiente del índice de accesibilidad ponderado  $X_4$  otorgado por los medios existentes; posteriormente, una vez obtenida cada ecuación, se sustituyó el valor del índice de accesibilidad ponderado que incluye al TAV propuesto; se obtuvieron valores predichos para la variable dependiente de productividad y se comparó, en el caso del par Guadalajara – Ciudad de México, la alternativa que arroja un mayor valor y, además, cuanto se incrementó la productividad al pasar del escenario verdadero al hipotético. En el caso del par Ciudad de México – Veracruz se realizó un procedimiento análogo, pero el resultado del escenario hipotético se contrastó únicamente con la productividad predicha que fue otorgada al contar únicamente con los medios de transporte terrestre actuales.

#### **4.5.4. Análisis de regresión para el modelo**

Las regresiones hechas al modelo se realizaron utilizando el método de mínimos cuadrados y se resumieron en las figuras mostradas en el presente apartado. Para todos los resúmenes, se reportó la significancia de la siguiente manera: \*\*\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*  $p < 0.1$ ; mientras que los errores de arranque se indicaron entre paréntesis. El valor que se colocó entre estos dos parámetros corresponde al coeficiente de su respectiva variable.

La Tabla 33 muestra de manera separada, los resultados de la estimación a dos versiones del modelo. En la parte izquierda se incluyó la versión que no considera a la variable de accesibilidad, y en la parte derecha si se admitió a esta variable.

Tabla 33:  
Análisis de regresión para la totalidad de la red

	<b>Sin restricción de accesibilidad</b>	<b>Con restricción de accesibilidad</b>
	9.007E-33***	9.419E-34***
<b>Constante</b>	5.050 (0.375)	5.147 (0.375)
	1.163E-22***	5.343E-21***
<b>Consumo por trabajador</b>	0.434 (0.041)	0.418 (0.041)
	0.0006***	0.0004***
<b>Capital por trabajador</b>	0.138 (0.040)	0.142 (0.040)
	2.295E-21***	6.742E-22***
<b>Dicotomía</b>	1.002 (0.098)	1.012 (0.097)
	---	0.0209*
<b>Accesibilidad</b>	---	0.482 (0.208)
<b>Observaciones</b>	312	312
<b>R-cuadrada</b>	0.623	0.630
<b>R<sup>2</sup> ajustada</b>	0.620	0.625

(Los valores en cada celda se organizaron en series de tres, y corresponden, de arriba hacia abajo, a la significancia, el coeficiente estimado y el error de arranque.)

La primera de estas versiones solo consideró los factores de producción (el valor agregado, el personal ocupado, el consumo intermedio y el acervo en capital fijo), incluyendo la variable independiente ficticia dicotómica. En esta estimación se comprobó que fue correcto estimar una mayor productividad en el sector 52 y evaluar la cantidad de veces que esta productividad supera a la de los otros sectores. La primera regresión se conformó con la información de los 13 sectores económicos coincidentes en los 8 pares origen-destino estudiados, para los tres años censales más recientes, arrojando un total de 312 observaciones. En esta estimación el sector 52, representado por la variable  $X_3$ , obtuvo un coeficiente de 1.00, lo cual puede interpretarse como que el sector 52 tiene 2.72 veces más productividad que el resto de los sectores económicos entre los pares origen-destino estudiados en el presente trabajo; este valor, de acuerdo a Giles (2011), se obtuvo de efectuar la operación inversa al logaritmo natural existente en el modelo de la Ecuación (17), para la variable en cuestión, es decir:  $e^{\beta_3} = e^{1.00}$ . Para esta primera regresión, al tratarse de una regresión lineal múltiple, el valor del  $R^2$  ajustado nos

mostró que el modelo considerado explica el 62% de la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media; además, los valores de  $P$  cercanos a cero, para las tres variables independientes consideradas, nos indicaron que las variaciones de estas muy probablemente representarán adiciones o disminuciones significativas en el modelo.

En la segunda versión del modelo se consideraron las mismas variables que en la primera, al mismo tiempo que se incluyó la variable independiente de accesibilidad  $X_4$ . El propósito de esta regresión fue evaluar la funcionalidad del modelo, y mostrar que tan precisamente se explicó la relación entre las variables, dado el caso de que se optase por analizar la red en su totalidad. Para la segunda regresión, es notorio que la inclusión de la variable de accesibilidad no modificó sustancialmente los valores para los coeficientes de las otras variables independientes. El valor del  $R^2$  ajustado reveló que el modelo considerado explica el 62.5% de la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media, y los valores de  $P$  cercanos a cero, para las tres primeras variables independientes, revelaron que las variaciones de estas muy probablemente representarán una adición significativa en el modelo, interpretaciones que se emitieron en base a cuantías muy similares a las que se obtuvieron en la primera regresión. Respecto a  $X_4$ , que representa el índice de accesibilidad ponderado, destacó el hecho de que su valor de probabilidad  $P$  resultó mucho mayor al de las otras tres variables independientes, pero sin llegar a un valor que hiciera menospreciar su significancia; es decir, los cambios en las variables independientes del consumo por trabajador y el capital fijo por trabajador, muy probablemente representarán mayores adiciones o disminuciones en el valor predicho del modelo, que aquellas aportadas por los cambios en la variable independiente del índice de accesibilidad ponderado. Esta situación se cotejó con las regresiones donde se evaluaron los pares origen-destino en cada una de sus líneas individuales.

Las siguientes regresiones, de la tercera a la quinta, consideraron de manera independiente a cada una de las hipotéticas LAV estudiadas en el presente documento. En estas regresiones se constataron 117 observaciones, obtenidas a partir de la información en los 13 sectores económicos previamente descritos, coincidentes en los tres pares origen-destino estudiados en cada línea individual, para los tres años censales más recientes. En todas las evaluaciones se

introdujeron los valores observados de la variable independiente de accesibilidad  $X_4$ . En la Tabla 34 se muestran de manera sucinta los valores que se obtuvieron para cada una de estas tres regresiones.

En la regresión que estima la LAV Guadalajara – Ciudad de México, en su opción pasando por La Piedad, el coeficiente de determinación  $R^2$  ajustado nos indicó que el modelo aplicado a esta ruta, explica el 63% de la variabilidad en los datos de respuesta respecto a su media. Los valores de  $P$ , por su parte, mostraron que las variables independientes que mayor significancia tienen sobre la productividad predicha son el consumo intermedio por trabajador y la pertenencia, o no, al sector económico 52 (variables  $X_1$  y  $X_3$ , respectivamente). El capital fijo por trabajador, la variable independiente  $X_2$ , es menos significativa que las dos anteriores, y el índice de accesibilidad ponderado, la variable independiente  $X_4$ , es la que menor significancia aporta al modelo.

Tabla 34:  
Análisis de regresión para las líneas independientes.

	<b>GDL-CDMX, por La Piedad</b>	<b>GDL-CDMX, por León</b>	<b>CDMX-VER</b>
	4.853E-15***	1.48E-15***	6.791E-12***
<b>Constante</b>	5.438 (0.600)	5.499 (0.592)	4.864 (0.634)
	9.108E-09***	1.459E-15***	4.642E-9***
<b>Consumo por trabajador</b>	0.390 (0.063)	0.367 (0.060)	0.497 (0.078)
	0.0149**	0.0063*	0.2707
<b>Capital por trabajador</b>	0.147 (0.059)	0.163 (0.058)	0.083 (0.075)
	5.9145E-10***	3.357E-16***	3.294E-06***
<b>Dicotomía</b>	1.002 (0.148)	1.362 (0.142)	0.917 (0.187)
	0.1261	0.1470	0.1016
<b>Accesibilidad</b>	0.520 (0.337)	0.525 (0.359)	0.510 (0.309)
<b>Observaciones</b>	117	117	117
<b>R-cuadrada</b>	0.642	0.720	0.612
<b>R2 ajustada</b>	0.629	0.710	0.598

(Los valores en cada celda se organizaron en series de tres, y corresponden, de arriba hacia abajo, a la significancia, el coeficiente estimado y el error de arranque.)

En lo que respecta a la opción de esta misma línea, pero en la alternativa pasando por León, el modelo explica en un 71%, respecto a su media, la variabilidad en los datos de respuesta, de nueva cuenta, la variable independiente de accesibilidad presentó menor significancia respecto a las otras tres variables independientes, tal como puede observarse en los valores de  $P$  que reportó la Tabla 34. En esta regresión llamó la atención el hecho de que la significancia del índice de accesibilidad ponderado es inclusive menor a la que se encontró en la alternativa de la línea pasando por La Piedad, sin embargo, ambas opciones se valoraron para comparar los valores predichos de productividad que arrojaron, como se verá más adelante.

Para el caso Ciudad de México – Veracruz, de todas las regresiones obtenidas, está es la que menor explicación otorgó respecto a la media de la variabilidad en los datos de respuesta, con

un 60%, como se observó de acuerdo a su  $R^2$  ajustada. Las variables independientes que más significancia aportan al valor predicho de la productividad son, al igual que en la línea Guadalajara-Ciudad de México, en sus dos opciones, el consumo intermedio por trabajador y lo concerniente al sector económico 52; las otras dos variables independientes (el capital por trabajador y el índice de accesibilidad ponderado) presentaron una menor significancia, pero, dentro de esto, se notó que las modificaciones en la accesibilidad podrían representar mayores variaciones en el modelo, que las causadas por cambios en el capital.

A partir del análisis de las cuatro estimaciones realizadas que incluyeron a la variable de accesibilidad ponderada  $X_4$ , se hizo manifiesto que esta tiene mayor significancia en la regresión elaborada para la totalidad de la red, con respecto a aquellas que se efectuaron para cada línea en particular, que con aquellas evaluadas para las líneas individuales. Debido a esto, el impacto que sobre la productividad predicha tendrá la implementación del tren de alta velocidad se evaluó tanto con el modelo que consideró a la totalidad de la red, como a cada uno de los modelos obtenidos para cada ruta particular; de esta manera se probó la consistencia en los resultados del presente documento.

#### **4.5.5. La productividad predicha y la cohesión territorial**

De cada modelo resultante en su respectiva regresión, primero para la red en su totalidad, cuyos coeficientes de la evaluación se mostraron en la Tabla 33, y posteriormente para cada LAV en lo individual, con los coeficientes evaluados que se plasmaron en la Tabla 34, se obtuvo el valor predicho de la productividad por cada ruta estudiada, en los años censales 2003 y 2013; se comparó el valor que adquiere esta productividad al evaluar cada uno de los modelos en dos escenarios: i) con la oferta de transporte para pasajeros existente (automóvil y autobús), y ii) enriqueciendo esta oferta con el proyecto del tren de alta velocidad. Al realizar esta comparativa, se consideró que los incrementos en la productividad acarrearán crecimiento económico y, de acuerdo a lo que se deduce de Sala-i-Martin (1996) y Cabeza-Morales y Gutiérrez-Rey (2015), a mayor crecimiento económico sobrevendrá una mayor cohesión territorial entre las regiones enlazadas por algún medio de transporte.



Tabla 35:  
Productividad predicha y variación en la cohesión territorial para toda la red

<b>Productividad laboral (Miles MXN)</b>	<b>GDL-CDMX (La Piedad)</b>	<b>GDL-CDMX (León)</b>	<b>CDMX-VER</b>
<b>A. Sin TAV, 2003</b>	5,730.55	5,724.01	6,097.42
<b>B. Sin TAV, 2013</b>	7,848.28	7,892.87	7,727.58
<b>C. Con TAV, 2013</b>	7,860.48	7,904.09	7,733.57
<b>Variación en la cohesión <math>= (C-B) / A</math></b>	0.21%	0.20%	0.10%
<b>Tasa decenal de cohesión</b>	2.13%	1.96%	0.98%

Bajo este criterio, en la evaluación de los valores predichos, los valores reportados por INEGI (2020) de cada característica económica, correspondientes a las variables independientes del modelo, se sumaron por cada par de ciudades en estudio; de esta manera, se cohesionó el personal ocupado, el consumo intermedio y el acervo de activos fijos, obteniendo un valor único en cada una de estas características para cada ruta.

Al sustituir los valores correspondientes de cada variable independiente se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 35, en la cual se muestran los valores de la productividad predicha en el escenario con los medios de transporte existentes y en aquel donde se incluyó al tren de alta velocidad. Tomando como año base al 2003, se observó que, sin considerar al tren de alta velocidad en la oferta de transporte, al paso de diez años, es predecible un incremento en la productividad debido exclusivamente al propio crecimiento de las características económicas involucradas en los arcos que conforman la totalidad de cada ruta. Sin embargo, con la inclusión del TAV el incremento en la productividad resultó mayor en las tres rutas estudiadas. La diferencia de la productividad en el escenario con TAV menos la del escenario sin TAV, porcentualmente respecto al año base, arrojó como resultado la variación en la

cohesión territorial lograda en cada itinerario, siendo la ruta GDL-CDMX, en su alternativa que pasa por La Piedad, la que reportó un mayor incremento en este parámetro.

A continuación, se realizó un ejercicio análogo al previamente descrito, pero ahora se obtuvo la productividad predicha para cada ruta al analizar cada línea de manera independiente. En la Tabla 36 se plasmaron los resultados obtenidos.

Tabla 36:  
Productividad predicha y variación en cohesión territorial; líneas individuales

<b>Productividad laboral (Miles MXN)</b>	<b>GDL-CDMX (La Piedad)</b>	<b>GDL-CDMX (León)</b>	<b>CDMX-VER</b>
<b>A. Sin TAV, 2003</b>	6,415.39	6,638.18	5,717.91
<b>B. Sin TAV, 2013</b>	8,175.02	8,531.27	7,588.09
<b>C. Con TAV, 2013</b>	8,188.78	8,544.66	7,594.31
<b>Variación en la cohesión <math>= (C-B) / A</math></b>	0.21%	0.20%	0.11%
<b>Tasa decenal de cohesión</b>	2.14%	2.02%	1.09%

En ambas alternativas de la línea GDL-CDMX, la variación en la cohesión territorial resultó positiva y muy similar. Sin embargo, la productividad predicha es superior en la opción que pasa por La Piedad, además, la cohesión resultó mayor en la opción que pasa por esta última localidad, situación que corrobora lo que se obtuvo en el análisis que englobó a las tres líneas en una misma red.

La productividad predicha en la ruta CDMX-VER, al incluir el TAV en la oferta del transporte, se incrementó en poco más de dos mil millones de pesos para el año 2013, lo que representó un incremento en la cohesión territorial del 1.09% para la totalidad de la ruta. Valor muy similar al que se obtuvo en la evaluación de la red completa.

Tabla 37:  
Incremento de productividad predicha (miles MXN), año 2013

	<b>GDL-CDMX (La Piedad)</b>	<b>GDL-CDMX (León)</b>	<b>CDMX-VER</b>
<b>Red completa</b>	\$12.20	\$11.22	\$5.99
<b>Líneas individuales</b>	\$13.76	\$13.39	\$6.22

En la Tabla 37, se realizó la comparativa para el año 2013 entre el escenario que ofrece únicamente al modo carretero para transporte de pasajeros y el escenario hipotético donde se incluye al modo ferroviario de alta velocidad en la oferta de transporte. Se restó el resultado la Productividad con TAV menos el resultado de la Productividad con TAV (renglón C menos renglón B), tanto en la Tabla 35 (red completa), como en la Tabla 36 (líneas individuales), y se obtuvo que, al considerar una red completa que incluya a las LAV en cada uno de los tres corredores estudiados, la productividad en el par GDL-CDMX se incrementó aproximadamente en 11,710 pesos por trabajador, al promediar lo obtenido para la alternativa que pasa por La Piedad y la que pasa por León. Mientras que, para el corredor CDMX-VER, con una LAV formando parte de una red, la productividad se incrementó en un valor cercano a los seis mil pesos por trabajador.

En la consideración de líneas individuales entre sí, para los mismos corredores de transporte, resultó que, para el par GDL-CDMX, en su opción por La Piedad, la productividad predicha se acrecentó en poco más de 13,700 pesos por trabajador; mientras que en la opción por León el incremento fue cercano a los 13,400 pesos por trabajador. Para el par CDMX-VER, se encontró un crecimiento que supera por poco a los 6,200 pesos por trabajador.

#### 4.6. El consumo energético

Al calcular el consumo energético se realizó una comparativa entre el escenario actual, los corredores con los modos de transporte realmente ofertados, y el escenario hipotético, donde se incluyó a la LAV como otra opción en la oferta de transporte. Cada escenario de transporte se

dividió en dos categorías de viaje: i) viajes de corto itinerario, es decir aquellos que se realizaron entre los nodos extremos de cada ruta y su nodo intermedio más cercano, o bien entre dos nodos intermedios, siempre y cuando sean inmediatos; y ii) viajes de itinerario completo, o viajes directos entre los nodos extremos de cada ruta considerada. Debido a las distancias en cada categoría de viaje, para los de corto itinerario se consideró que el TAV representó competencia con el autotransporte, y para los directos lo hizo, además, con el transporte aéreo.

#### **4.6.1. Viajes de corto itinerario**

En el escenario actual, el primer paso consistió en cuantificar los vehículos según su tipología en cada arco de recorridos intermedios, información que ya se obtuvo en apartados anteriores y se muestra en la columna “Escenario actual”, de la Tabla 10. El segundo paso fue desagregar cada cantidad vehicular de acuerdo al tipo de combustible que cada tipo utiliza (Cadengo et al, 2018). En el tercer paso se determinó, mediante la Ecuación (18), la cantidad de energía que fue consumida por cada tipo de vehículo en cada arco. En la Tabla 38 se ordenaron los resultados obtenidos para la oferta de transporte existente.

Tabla 38:  
Energía consumida. Corto itinerario, escenario actual. Año 2013.

Par	Distancia (Km)	Tipo de vehículo	Cantidad de vehículos		Energía consumida (PJ)		
			Gasolina	Diésel	Gasolina	Diesel	Total, por tipo
GDL-LPD	171.98	A	446,245	13,754	0.270	0.007	0.277
		B	10,950	47,542	0.022	0.089	0.111
		C	6,940	60,633	0.006	0.132	0.138
LPD-QRO	191.71	A	2,811,642	86,659	1.896	0.049	1.945
		B	42,554	184,764	0.096	0.386	0.481
		C	47,625	416,103	0.046	1.013	1.059
QRO-CDMX	212.50	A	13,261,164	408,730	9.914	0.255	10.168
		B	169,877	737,588	0.423	1.707	2.130
		C	374,373	3,270,933	0.400	8.830	9.230
GDL-LEÓN	225.33	A	2,370,652	73,067	1.879	0.048	1.928
		B	48,016	208,481	0.127	0.512	0.638
		C	30,557	266,980	0.035	0.764	0.799
LEÓN-QRO	174.78	A	2,770,533	85,392	1.704	0.044	1.747
		B	41,932	182,063	0.086	0.346	0.432
		C	46,929	410,019	0.041	0.910	0.952
CDMX-PUE	129.86	A	20,773,887	640,284	9.490	0.244	9.734
		B	105,856	459,616	0.161	0.650	0.811
		C	67,199	587,128	0.044	0.969	1.012
PUE-COR	169.64	A	4,487,296	138,305	2.678	0.069	2.747
		B	81,543	354,052	0.162	0.654	0.816
		C	51,397	449,058	0.044	0.968	1.012
COR-VER	118.00	A	1,090,468	33,610	0.453	0.012	0.464
		B	28,533	123,885	0.039	0.159	0.199
		C	18,109	158,222	0.011	0.237	0.248

Para realizar las operaciones que dieron lugar a la energía consumida por tipo de combustible en la Tabla 38, haciendo uso de la ecuación (18), se consideró la intensidad de combustible que se muestra en la Tabla 39, tal cual se obtuvo al ponderar los rendimientos de cada tipo vehicular con la información mostrada en Sheinbaum y Chávez (2011).

Tabla 39:  
Intensidad del combustible para cada tipo vehicular (lt/km)

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diésel</b>
<b>A</b>	0.1000	0.0769
<b>B</b>	0.3333	0.2857
<b>C</b>	0.1429	0.3333

El poder calorífico de cada combustible se obtuvo de CONUEE (2020), adquiere el valor de 35.18 MJ/lt, para la gasolina, y 38.11MJ/lt, para el diésel.

Para el escenario hipotético, en el primer paso del procedimiento descrito anteriormente se incluyó al TAV en la oferta de transporte; esto provocó una liberación de espacio en el modo carretero que se refleja como una disminución en la cantidad de vehículos automotores, tal como puede verse en la columna “Escenario hipotético” de la Tabla 10; de nueva cuenta, como segundo paso, se disgregó la cantidad de vehículos según el combustible utilizado y, para el TAV, se diferencié entre aquellos que transportan pasajeros y los que transportan mercancías, tal como se obtuvo en la Tabla 14. El tercer paso consistió en calcular el consumo energético: para el autotransporte se empleó nuevamente la Ecuación (18), con la intensidad de combustible y el poder calorífico previamente descritos, y para el TAV, se utilizó la Ecuación (20), con la distancia de recorrido para los trenes que se plasmó en los diagramas unifilares correspondientes a cada arco (ver Figura 6 a Figura 8), una masa de 384.62 Ton/tren, para el caso de los que transportan pasajeros (Ferropedia, 2019), y de 822 Ton/tren, para el caso de los que transportan mercancías (Liang *et al.*, 2016). Los resultados que se obtuvieron para el escenario hipotético se presentan en la Tabla 40.

Los totales por tipo vehicular del consumo energético, tanto del escenario actual como del escenario hipotético, se sumaron en cada par origen-destino, con lo cual se formó la Figura 30, donde se realizó la comparativa entre ambos escenarios.

Tabla 40:  
Energía consumida. Corto itinerario, escenario hipotético. Año 2013.

Par	Distancia (Km)	Tipo de vehículo	Cantidad de vehículos				Energía consumida (PJ)				Total, por tipo
			Gasolina	Diésel	Elect. Pax	Elect. carga	Gasolina	Diésel	Elect. Pax	Elect. carga	
<b>GDL-LPD</b>	<b>171.98</b>	<b>A</b>	370,383	11,416	---	---	0.224	0.006	---	---	0.23
		<b>B</b>	10,071	43,724	---	---	0.02	0.082	---	---	0.102
		<b>C</b>	6,246	54,570	---	---	0.005	0.119	---	---	0.125
	<b>164.14</b>	<b>TAV</b>	---	---	806	212	0	---	0.01	0.006	0.016
<b>LPD-QRO</b>	<b>191.71</b>	<b>A</b>	2,333,663	71,927	---	---	1.574	0.04	---	---	1.614
		<b>B</b>	39,137	169,927	---	---	0.088	0.355	---	---	0.443
		<b>C</b>	42,862	374,493	---	---	0.041	0.912	---	---	0.953
	<b>182.96</b>	<b>TAV</b>	---	---	4,618	1,456	0	---	0.065	0.044	0.109
<b>GDL-LEÓN</b>	<b>225.33</b>	<b>A</b>	1,967,641	60,646	---	---	1.56	0.04	---	---	1.6
		<b>B</b>	44,160	191,740	---	---	0.117	0.47	---	---	0.587
		<b>C</b>	27,501	240,282	---	---	0.031	0.688	---	---	0.719
	<b>215.05</b>	<b>TAV</b>	---	---	4,000	934	0	---	0.066	0.033	0.099
<b>LEÓN-QRO</b>	<b>174.78</b>	<b>A</b>	2,299,542	70,875	---	---	1.414	0.036	---	---	1.45
		<b>B</b>	38,565	167,443	---	---	0.079	0.319	---	---	0.398
		<b>C</b>	42,236	369,017	---	---	0.037	0.819	---	---	0.856
	<b>166.81</b>	<b>TAV</b>	---	---	4,506	1,435	0	---	0.058	0.039	0.097

Tabla 40: Energía consumida. Corto itinerario, escenario hipotético. Año 2013. (continuación)

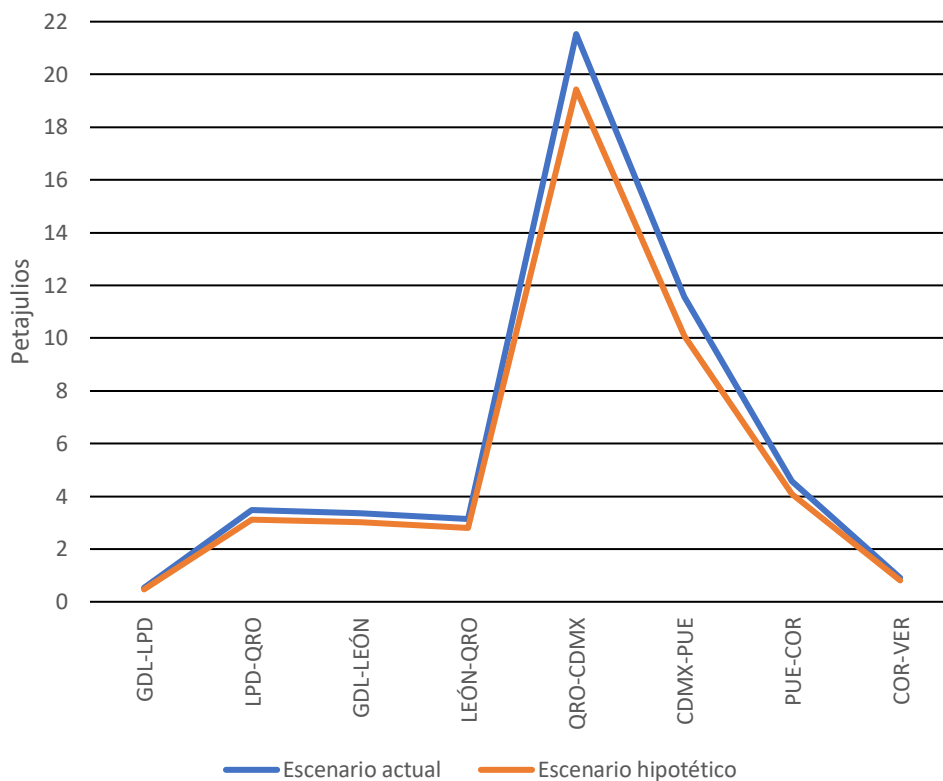


Par	Distancia (Km)	Tipo de vehículo	Cantidad de vehículos				Energía consumida (PJ)				Total, por tipo
			Gasolina	Diésel	Elect. Pax	Elect. carga	Gasolina	Diésel	Elect. Pax	Elect. carga	
QRO-CDMX	212.5	A	11,006,766	339,246	---	---	8.228	0.211	---	---	8.44
		B	156,236	678,360	---	---	0.389	1.57	---	---	1.959
		C	336,936	2,943,840	---	---	0.36	7.947	---	---	8.307
	202.8	TAV	---	---	22163	11446	0	---	0.346	0.382	0.727
CDMX-PUE	129.86	A	17,242,326	531,436	---	---	7.877	0.202	---	---	8.079
		B	97,356	422,709	---	---	0.148	0.598	---	---	0.746
		C	60,479	528,415	---	---	0.039	0.872	---	---	0.911
	123.93	TAV	---	---	30,369	2,055	0	---	0.29	0.042	0.331
PUE-COR	169.64	A	3,724,456	114,793	---	---	2.223	0.057	---	---	2.28
		B	74,995	325,622	---	---	0.149	0.601	---	---	0.751
		C	46,257	404,152	---	---	0.039	0.871	---	---	0.91
	161.9	TAV	---	---	8,051	1571	0	---	0.1	0.042	0.142
COR-VER	118	A	905,088	27,896	---	---	0.376	0.01	---	---	0.385
		B	26,242	113,937	---	---	0.036	0.146	---	---	0.183
		C	16,298	142,400	---	---	0.01	0.213	---	---	0.223
	112.62	TAV	---	---	2,240	554	0	---	0.019	0.01	0.03

En el escenario actual, en la ruta GDL-CDMX, el par GDL-LPD reportó un consumo energético, en el año estudiado, por un total de 0.53 PJ. La disgregación del cálculo de este total indicó que el 53% lo consumieron vehículos tipo A, el 21% los vehículos tipo B y el 26% los vehículos tipo C. En el par LPD-QRO se consumió un total de 3.49 PJ de energía, en esta total el tipo A participó con el 56%, el tipo B con el 14% y el tipo C con el 30%. En el par GDL-LEÓN se consumieron 3.36 PJ de energía, los vehículos tipo A participaron con el 57%, los vehículos tipo B con el 19% y los vehículos tipo C con el 24%. Respecto al par LEÓN-QRO, se observó un consumo energético de 3.13 PJ, valor que resultó muy similar al otro arco que confluye en Querétaro, ya descrito, y con una participación porcentual por tipo de vehículo idéntica a esta. Finalmente, el par QRO-CDMX representó un consumo energético de 21.53 PJ, donde los vehículos A, B y C participaron con el 47%, 10% y 43%, respectivamente; puede observarse el pico abrupto que ocasionó este alto valor de consumo, respecto al de los otros pares estudiados. Llamó la atención en este par como, a pesar de que en el aforo vehicular las unidades tipo C fueron el 27% de los vehículos tipo A, en la evaluación del consumo energético se obtuvieron resultados muy similares en ambos tipos vehiculares.

En lo que respecta a la ruta CDMX-VER, se observó, al igual que en la ruta anterior, como el par que confluye a la Ciudad de México tiene una participación mayor en el consumo energético respecto a los otros dos pares de esta ruta. Desde CDMX hasta PUE, el autotransporte consumió 11.56 PJ de energía, valor inferior al que se presentó para el par QRO-CDMX debido a dos circunstancias que diferencian a ambos arcos: la distancia entre los nodos es menor para el CDMX-PUE, así como la cantidad de vehículos tipo B y C. De la energía consumida entre Ciudad de México y Puebla, el 84% lo hizo el tipo vehicular A, un 7% el B y un 9% el C. El par PUE-COR utilizó 4.57 PJ, que se repartieron en un 60% para el tipo A, 18% para el tipo B y 22% para el C. Se observó que los autobuses y camiones de carga que circulan en los pares CDMX-PUE y PUE-COR consumen prácticamente una cantidad idéntica de energía. Por último, en el par COR-VER, el consumo energético llegó a 0.91 PJ, con una participación del 51% para los vehículos tipo A, el 22% para los vehículos tipo B y el 27% para los vehículos tipo C; en este último par los autobuses y camiones de carga consumieron una cantidad semejante de energía, mientras que los vehículos tipo A consumen una cantidad equivalente a la suma de los otros dos tipos.

Figura 30:  
Consumo de energía, corto itinerario, año 2013



En el escenario hipotético, para la ruta GDL-CDMX, el arco GDL-LPD presentó un consumo total de 0.47 PJ, distribuidos en un 49% por los vehículos tipo A, un 22% por el tipo B y un 26% por el tipo C; en último lugar, con una participación del 3% se situó el tren de alta velocidad. El viaje LPD-QRO consumió 3.12 PJ de energía, los vehículos automotores, participaron con la mayor proporción, el 52% los A, el 14% los B y el 31% los C; de nueva cuenta el TAV aportó el 3% de este consumo energético. En el arco GDL-LEÓN, los transportes consumieron 3.01 PJ de energía, el 53% por los vehículos A, el 20% por el tipo B, el 24% por el tipo C y el 3% por el TAV. En el LEÓN-QRO, se obtuvo un consumo energético de 2.80 PJ, el tipo A participó con un 52%, el tipo B con 14%, el tipo C con 31%, y el TAV con el 3%. Para la ruta proveniente de occidente, el escenario hipotético presentó un consumo energético menor en todos los arcos, respecto al escenario actual. Esto indicó que la reducción de vehículos automotores al migrar sus usuarios al TAV abonó positivamente a economizar en la energía.

Para la ruta CDMX-VER, se observó de nueva cuenta que el par con mayor consumo es el CDMX-PUE, con 10.07 PJ de energía; de los cuales un 80% fue aportado por el tipo A, un 7% por el tipo B, un 9% por el tipo C, y el 3% por el TAV. En orden de magnitud descendente, le siguió el par PUE-COR, con 4.08 PJ consumidos, el 56% por el tipo A, un 18% por el tipo B, y un 22% por el tipo C, mientras que el modo ferroviario aportó el 3%. El arco con menor consumo energético fue el COR-VER, su total de energía consumida alcanzó 0.82 PJ. A este consumo, los vehículos tipo A aportaron el 47%, los B el 22%, los C el 27% y el TAV el 4%. De nueva cuenta, se repitió lo observado en la ruta anterior: la migración de usuarios y carga al TAV, logró ahorros en términos de energía consumida.

#### **4.6.2. Viajes directos**

El análisis de los viajes directos en el escenario actualmente ofrecido a los usuarios, se realizó de manera análoga al de los viajes de corto itinerario, en los tres pasos mencionados, pero se incluyó al avión en la oferta del transporte de los corredores.

Al utilizar los datos públicos disponibles más recientes de las estaciones de aforo mostradas en SCT (2013), se sumaron los porcentajes del total de vehículos que realizan el recorrido completo. Se determinó que, para GDL-CDMX, el 5.85% de estos recorren la totalidad del trayecto en ambos sentidos. Para CDMX-VER se procedió de manera análoga, y se observó que el 5.11% de los vehículos, en ambos sentidos, recorren la totalidad del itinerario. Para el transporte aéreo, la cuantía de vuelos que realizaron el viaje entre los nodos extremos de cada ruta estudiada se obtuvo al consultar el sitio electrónico de acceso público Expedia (2019) y la base de datos de SCT (2018b); la primera referencia mostró que, para el trayecto redondo directo GDL-CDMX, hay cuatro compañías aéreas que ofertan el servicio: Aeromexico, Interjet, Viva Aerobus y Volaris, y para el trayecto redondo directo CDMX-VER son tres las compañías que lo ofrecen: Aeromar, Aeromexico y Viva Aerobus; la segunda referencia mostró la cantidad de vuelos, en el año de estudio, entre cada par origen-destino, la cual se cotejó con la cantidad de vuelos diarios, por compañía, que se expone en Expedia, para llegar a la cantidad de vuelos que se consideraron en el presente trabajo. Los resultados que se utilizaron pueden observarse en la columna “Escenario actual” de la Tabla 11; a partir de esta, los vehículos del

modo carretero se disgregaron de acuerdo al tipo de combustible, mientras que los del modo aéreo se presentaron en un solo valor, debido a que, como las compañías aeronáuticas consultadas no especificaron el tipo de combustible que utiliza cada una de sus aeronaves, se empleó el poder calorífico promedio del AVGAS y AVTUR, 43.26 MJ/kg, para calcular el consumo de energía. La Tabla 41 muestra los resultados del consumo energético, por tipo de vehículo, en el escenario actual de los viajes directos.

Tabla 41:  
Energía consumida. Viajes directos, escenario actual. Año 2013.

Par	Dist. (Km)	Tipo veh.	Cantidad veh.			Energía consumida (PJ)			Total, por tipo
			Gasolina	Diésel	AVGAS o AVTUR	Gasolina	Diesel	AVGAS o AVTUR	
GDL-CDMX	594.40	A	333,571	10,281	---	0.698	0.018	---	0.715
		B	7,476	32,460	---	0.052	0.210	---	0.262
	C	30,100	262,986	---	0.090	1.986	---	2.076	
	459.04	Avión	---	---	9,099	---	---	1.219	1.219
CDMX-VER	417.50	A	416,816	12,847	---	0.612	0.016	---	0.628
		B	9,083	39,438	---	0.044	0.179	---	0.224
	C	16,457	143,789	---	0.035	0.763	---	0.797	
	304.55	Avión	---	---	2,643	---	---	0.209	0.209

La cantidad de unidades aeronáuticas reportada en la Tabla 41, corresponde a la suma de los diversos modelos y compañías que realizan en vuelo en los puentes aéreos estudiados. Para el cálculo de la cantidad de combustible consumido, se realizó la disgregación de los aviones por empresa aeronáutica, y, promediando el consumo de cada modelo por compañía<sup>2</sup>, con los datos de la Tabla 8, se obtuvieron los kilogramos de AVGAS y/o AVTUR que cada empresa empleó durante el año de estudio, tal como se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42:  
Combustible consumido por aerolínea, escenario actual. Año 2013.

<b>Par</b>	<b>Distancia ortodrómica (Km)</b>	<b>Compañía</b>	<b>Viajes redondos</b>	<b>AVGAS ó AVTUR consumido por viaje (Kg)</b>	<b>AVGAS ó AVTUR consumido en el año (Kg)</b>
<b>GDL- CDMX</b>	<b>459.04</b>	<b>Aeromar</b>	0	0.00	0.00
		<b>Aeromexico</b>	4,696	2,869.77	13,476,819.14
		<b>Interjet</b>	587	3,645.22	2,139,804.35
		<b>Viva Aerobus</b>	1,174	3,645.22	4,279,608.70
		<b>Volaris</b>	2,642	3,137.07	8,286,803.58
<b>CDMX- VER</b>	<b>304.55</b>	<b>Aeromar</b>	294	563.45	165,377.23
		<b>Aeromexico</b>	2,055	1,925.76	3,956,585.25
		<b>Interjet</b>	0	0.00	0.00
		<b>Viva Aerobus</b>	294	2,385.96	700,298.97
		<b>Volaris</b>	0	0.00	0.00

Para el cálculo del consumo energético en los viajes directos, se definieron las distancias por recorrer en cada ruta. En el autotransporte, en el caso del itinerario GDL-CDMX, se tomó el promedio aritmético de la distancia total mostrada en la Figura 6 y en la Figura 7; para el caso del arco CDMX-VER esta distancia corresponde a la que resultó como total de la Figura 8. Para el transporte aéreo, en el epígrafe 4.1 se mencionaron las distancias ortodrómicas que los aviones recorren en cada arco, y este valor fue el empleado para calcular el correspondiente consumo de energía. De nueva cuenta, el consumo de energía para el autotransporte se calculó

<sup>2</sup> Se realizó este promedio de consumo por compañía aeronáutica debido a que estas no reportaron, en las fuentes de información disponibles al público, que modelo de aeronave en específico realiza cada vuelo.

empleando la Ecuación (18); y, en el caso de los viajes directos se incluyó al avión, cuyo consumo energético se calculó mediante la Ecuación (19).

En el escenario hipotético de los viajes directos, la cantidad de pasajeros en el TAV se obtuvo de manera análoga a como se realizó para los viajes de corto itinerario, pero ahora también se incluyó a los que migran desde el avión hacia este, al utilizar los porcentajes de atracción e inducción que indicaron Herrera y Sánchez (2014), para el primero, así como Fernández (2012) y García (2016), para el segundo.

En el caso de la carga, para el transporte carretero su proporción fue la misma que la obtenida previamente en el escenario actual ofertado; en el transporte aéreo se tomó el valor que SCT (2018b) reportó respecto al tonelaje total transportado en el año de estudio, y se desgregó en los porcentajes de participación por ruta, que también indicó SCT. La carga en el TAV se obtuvo al aplicar el porcentaje promedio del 10% que se mencionó en la metodología migrará, desde los modos convencionales, a nuevo modo. Los resultados que se utilizaron pueden observarse en la columna “Escenario hipotético” de la Tabla 11.

En la Tabla 43 se muestra la energía que se consumió en los viajes directos del escenario hipotético, durante el año de estudio. De igual forma que para el escenario hipotético de los viajes en corto itinerario, la cantidad de TAV se desgregó entre aquellos destinados al transporte de pasajeros, con una masa de 384.62 Ton/tren (Ferropedia, 2019), y los utilizados para el transporte de mercancías, con una masa de 822 Ton/tren (Liang *et al.*, 2016).



Tabla 43:  
Energía consumida. Viajes directos, escenario hipotético. Año 2013.

Par	Dist. (Km)	Tipo veh.	Cantidad veh.				
			Gasolina	Diésel	AVGAS o AVTUR	Elect. Pax	Elect. Carga
GDL-CDMX	594.4	A	276,864	8,533	---	---	---
		B	6,876	29,853	---	---	---
		C	27,090	236,687	---	---	---
	459.04	Avión	---	---	7,512	---	---
	567.28	TAV	---	---	---	2,108	923
CDMX-VER	417.5	A	345,957	10,663	---	---	---
		B	8,354	36,271	---	---	---
		C	14,812	129,409	---	---	---
	304.55	Avión	---	---	2,182	---	---
	398.45	TAV	---	---	---	1,043	504

Tabla 43: Energía consumida. Viajes directos, escenario hipotético. Año 2013. (Continuación)

Par	Dist. (Km)	Tipo veh.	Energía consumida (PJ)					Total, por tipo
			Gasolina	Diesel	AVGAS o AVTUR	Elect. Pax	Elect. Carga	
GDL-CDMX	594.4	A	0.579	0.015	---	---	---	0.594
		B	0.048	0.193	---	---	---	0.241
		C	0.081	1.787	---	---	---	1.868
	459.04	Avión	---	---	1.007	---	---	1.007
	567.28	TAV	---	---	---	0.069	0.065	0.134
CDMX-VER	417.5	A	0.508	0.013	---	---	---	0.521
		B	0.041	0.165	---	---	---	0.206
		C	0.031	0.686	---	---	---	0.717
	304.55	Avión	---	---	0.172	---	---	0.172
398.45	TAV	---	---	---	0.024	0.025	0.049	

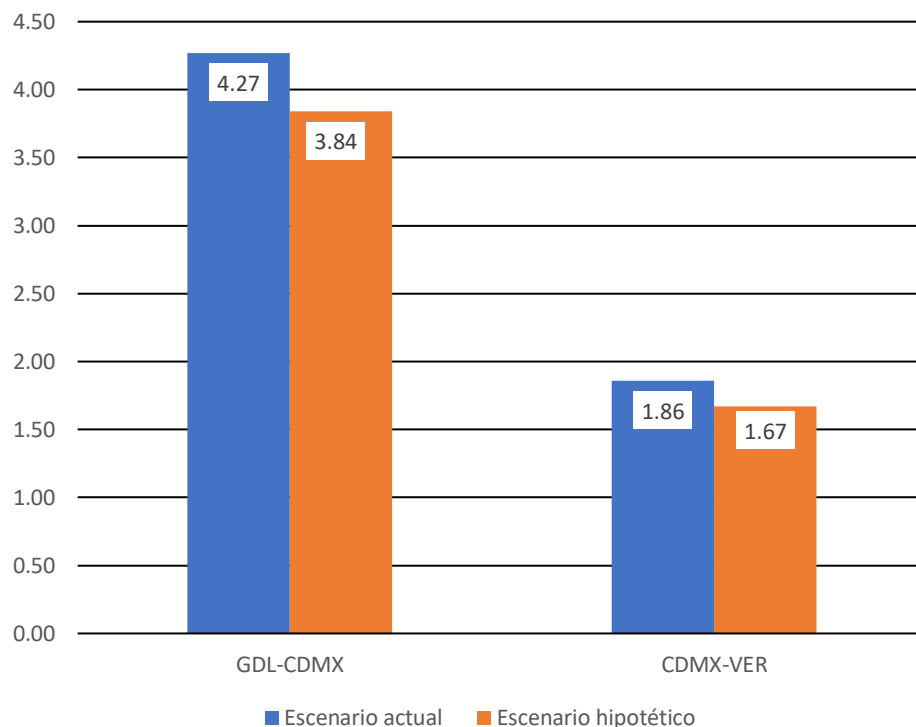
La proporción en la reducción de pasajeros y carga, cuando se realizó la migración de estos hacia el TAV, proveniente de los aviones, provocó una disminución en la cantidad de estos que cubren los itinerarios en estudio. Esta disminución se repartió de manera proporcional en las cinco compañías aéreas que prestan el servicio en los puentes aéreos estudiados, de tal forma que el consumo de combustible, en el escenario hipotético, quedó como se muestra en la Tabla 44, donde se puede corroborar que la disminución en la cantidad de combustible consumido en el año de estudio, entre el escenario hipotético y el actual, corresponde porcentualmente a la cantidad de usuarios que migraron del modo aéreo hacia el TAV.

Tabla 44:  
Combustible consumido por aerolínea, escenario hipotético. Año 2013.

Par	Distancia ortodrómica (Km)	Compañía	Viajes redondos	AVGAS ó AVTUR consumido por viaje (Kg)	AVGAS ó AVTUR consumido en el año (Kg)
GDL- CDMX	459.04	Aeromar	0	0	0.00
		Aeromexico	3,877	2,870	11,126,148.80
		Interjet	485	3,645	1,766,572.76
		Viva	969	3,645	3,533,145.52
		Aerobus	2,181	3,137	6,842,687.51
		Volaris	243	563	136,764.19
CDMX- VER	304.55	Aeromexico	1,697	1,926	3,267,259.82
		Interjet	0	0	0.00
		Viva	243	2,386	579,135.48
		Aerobus	0	0	0.00
		Volaris	0	0	0.00

De igual forma a como se hizo con los viajes de corto itinerario, en los viajes directos los totales del consumo energético por tipo vehicular, en su respectivo escenario, se sumaron para obtener una suma por cada par origen-destino. Con estos resultados por par, se formó la Figura 31, donde se realizó la comparativa entre ambos escenarios.

Figura 31:  
Consumo de energía, viajes directos, año 2013



En el escenario actual, para el viaje directo GDL-CDMX, durante el año estudiado se consumieron 4.27 PJ de energía, de los cuales la mayor parte fue consumida por los vehículos automotores tipo C, 2.08 PJ, seguido por el avión, con 1.22, en tercer lugar, los vehículos tipo A, 0.72 y, finalmente, los B, que consumieron 0.26 PJ. En lo que respecta al viaje CDMX-VER, el consumo energético total, fue de 1.86 PJ, al igual que en la ruta anterior, los vehículos C participaron con la mayor cantidad de este consumo, 0.80 PJ, los A se situaron en segundo lugar, con 0.63 PJ, y los autobuses y el avión en un valor muy similar: 0.22 PJ y 0.21 PJ, respectivamente.

En el escenario hipotético, la ruta GDL-CDMX, reportó un consumo energético total de 3.84 PJ. Al realizar el cálculo, se observó los vehículos C son los que más consumieron en este recorrido, con 1.87 PJ, seguidos por el avión con 1.01 PJ, los vehículos A, 0.59 PJ, los B, 0.24 PJ, y finalmente el TAV, con 0.13 PJ. En cuanto a la ruta CDMX-VER, resultó un consumo energético total de 1.67 PJ. De nueva cuenta los automotores tipo C dominaron, con 0.72 PJ,

en segundo lugar, quedaron los A, con 0.52 PJ, seguido por los B, con 0.21 PJ, el avión con 0.17 PJ y, de nueva cuenta el TAV en último lugar, con 0.05 PJ.

El motivo del menor consumo energético, en ambos escenarios, del par CDMX-VER respecto al GDL-CDMX, se explicó debido a las magnitudes de los recorridos, las distancias carretera y ortodrómica son menores en el primero que en el segundo; y a la cantidad de vehículos (de cualquier medio) que realizan el viaje son mayores en el primer arco respecto al segundo. Ambos son un parámetro que afecta directamente el resultado, como se constata en la Ecuación (18), para el caso del autotransporte, y en la Tabla 8, para el caso del transporte aéreo.

#### **4.7. Las emisiones de GEI**

De manera análoga a como se realizó en el cálculo del consumo energético, para calcular la masa que se emite de GEI en los corredores estudiados se diferenció entre el escenario actual, con los modos de transporte realmente ofrecidos, y el escenario hipotético, incluyendo el modo FAV, en dos esquemas de recorrido: viajes de corto itinerario, entre nodos adyacentes, y viajes directos, entre los nodos extremos de cada ruta.

##### **4.7.1. Viajes de corto itinerario**

En el escenario actual, para los arcos que unen nodos adyacentes entre sí, se consideraron los tres medios de transporte disponibles en el modo carretero, disgregados por tipo de combustible y sus correspondientes consumos de energía. Esta información se presentó en la Tabla 38, la cual se multiplicó por el correspondiente factor de emisión, tanto para la gasolina como para el diésel, que se muestra en el epígrafe 3.8 de la metodología del presente estudio. Los resultados se colocaron en la Tabla 45, donde se observa un total de GEI emitidos por tipo vehicular, así como un total por cada par origen-destino.

Tabla 45:  
GEI emitidos (Ton), viajes de corto itinerario, modo carretero. Escenario actual, año 2013.

Par	Tipo de vehículo	CO <sub>2</sub>		Total, por par
		Gasolina	Diésel	
GDL-LPD	A	18,710.28	513.83	37,582.70
	B	1,530.32	6,596.91	
	C	415.67	9,815.69	
LPD-QRO	A	131,411.66	3,608.89	248,499.27
	B	6,629.68	28,579.30	
	C	3,179.87	75,089.88	
GDL-LEÓN	A	130,231.45	3,576.48	239,530.05
	B	8,792.57	37,903.12	
	C	2,398.07	56,628.36	
LEÓN-QRO	A	118,054.94	3,242.08	223,241.73
	B	5,955.83	25,674.49	
	C	2,856.67	67,457.72	
QRO-CDMX	A	687,020.42	18,867.27	1,543,677.74
	B	29,336.11	126,462.46	
	C	27,707.31	654,284.18	
CDMX-PUE	A	657,691.50	18,061.83	809,891.01
	B	11,171.21	48,156.98	
	C	3,039.29	71,770.22	
PUE-COR	A	185,584.66	5,096.61	325,127.40
	B	11,241.51	48,460.06	
	C	3,036.65	71,707.90	
COR-VER	A	31,370.69	861.52	65,081.88
	B	2,736.09	11,794.76	
	C	744.24	17,574.58	

En el escenario actual de los viajes de corto itinerario, únicamente se consideraron los medios del modo carretero para atender la demanda de transporte, debido a esto, y de acuerdo a lo indicado por IPCC (2014), únicamente se consideraron las emisiones del CO<sub>2</sub>, ya que las de CH<sub>4</sub> y de N<sub>2</sub>O son menores al 2% del total.

Al incluir el TAV dentro de la oferta de transporte, se propició la liberación de espacio en el modo carretero mediante la reducción de vehículos automotores, lo que acarreó un menor consumo energético y la subsecuente disminución en la emisión de GEI de este modo al pasar del escenario actual al hipotético, tal como puede observarse en la Tabla 46, la cual se formó al

multiplicar el consumo energético del modo carretero en el escenario hipotético de la Tabla 40 por el factor de emisión correspondiente a la gasolina y al diésel.

Tabla 46:  
GEI emitidos (Ton), viajes de corto itinerario, modo carretero. Escenario hipotético, año 2013.

Par	Tipo de vehículo	CO <sub>2</sub>		Total, por par
		Gasolina	Diesel	
GDL-LPD	A	15,529.52	426.49	32,639.05
	B	1,407.53	6,067.18	
	C	374.12	8,834.21	
LPD-QRO	A	109,071.67	2,995.37	214,891.49
	B	6,097.34	26,284.29	
	C	2,861.86	67,580.96	
GDL-LEÓN	A	108,092.10	2,968.50	207,130.34
	B	8,086.47	34,859.50	
	C	2,158.24	50,965.53	
LEÓN-QRO	A	97,985.58	2,690.91	193,049.79
	B	5,477.60	23,612.77	
	C	2,570.99	60,711.93	
QRO-CDMX	A	570,226.94	15,659.84	1,342,967.20
	B	26,980.44	116,307.57	
	C	24,936.60	588,855.81	
CDMX-PUE	A	545,883.93	14,991.32	682,767.96
	B	10,274.19	44,289.99	
	C	2,735.36	64,593.17	
PUE-COR	A	154,035.28	4,230.18	280,443.10
	B	10,338.81	44,568.77	
	C	2,732.97	64,537.09	
COR-VER	A	26,037.67	715.05	56,603.70
	B	2,516.39	10,847.63	
	C	669.81	15,817.15	

Para estimar las emisiones de GEI del TAV, en primer lugar, se desagregó la cantidad de energía que consumió, de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 40, en base al combustible utilizado en las plantas estacionarias productoras de la energía eléctrica que le otorga tracción a este medio de

transporte. En la Tabla 47 se presentan los resultados obtenidos para cada arco de corto itinerario.

Tabla 47:  
Desagregación de la energía consumida (TJ) por el TAV, viajes de corto itinerario, año 2013.

<b>Par</b>	<b>Hidro-carburos</b>	<b>Carbón</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Hidro-eléctrica</b>	<b>Geo-termoeléctrica</b>	<b>Eolo-eléctrica</b>
<b>GDL-LPD</b>	11.92	0.99	0.57	2.04	0.37	0.01
<b>LPD-QRO</b>	81.60	6.78	3.89	13.97	2.50	0.04
<b>GDL-LEÓN</b>	74.40	6.18	3.55	12.74	2.28	0.04
<b>LEÓN-QRO</b>	72.89	6.05	3.48	12.48	2.23	0.04
<b>QRO-CDMX</b>	545.59	45.31	26.04	93.39	16.73	0.29
<b>CDMX-PUE</b>	248.57	20.65	11.86	42.55	7.62	0.13
<b>PUE-COR</b>	106.58	8.85	5.09	18.24	3.27	0.06
<b>COR-VER</b>	22.25	1.85	1.06	3.81	0.68	0.01

La desagregación tomó en cuenta lo que encontró Ramos y Montenegro (2012), donde se menciona que la energía eléctrica en México se genera en un 75.01% a partir de hidrocarburos, en un 6.23% a partir del carbón, en un 3.58% por reacción nuclear, en un 12.84% por métodos hidroeléctricos, en un 2.30% por geo-termoeléctricos y el 0.04% por eolo-eléctricos. Por lo tanto, el total de energía consumida por el TAV, de la Tabla 40, se convirtió de Petajulios a Terajulios y se multiplicó por cada uno de estos porcentajes en la correspondiente casilla de la Tabla 47.

De acuerdo a IPCC (2006), de los combustibles precursores de energía eléctrica mencionados, únicamente los hidrocarburos y carbones son los que aportan GEI a la atmosfera. Además, especifica que estos, al utilizarse en las plantas estacionarias generadoras de electricidad, producirán CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O que serán dispersados al aire.

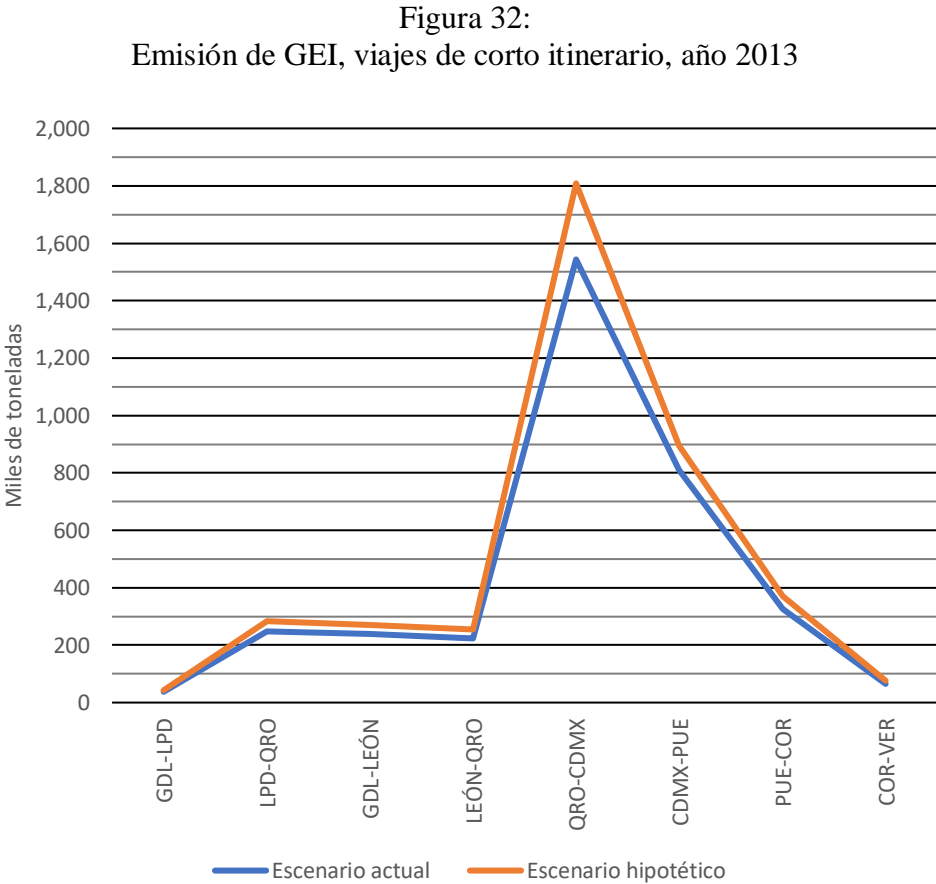


Tabla 48:  
GEI emitidos (Ton), corto itinerario en TAV. Escenario hipotético, año 2013.

Par	CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O		Total, por par
	Hidro-carbuos	Carbón	Hidro-carbuos	Carbón	Hidro-carbuos	Carbón	
<b>GDL-LPD</b>	994.08	100.30	3,976.33	3,911.56	994.08	200.59	10,176.95
<b>LPD-QRO</b>	6,802.59	686.34	27,210.38	26,767.18	6,802.59	1,372.68	69,641.77
<b>GDL-LEÓN</b>	6,202.46	625.79	24,809.85	24,405.76	6,202.46	1,251.58	63,497.90
<b>LEÓN-QRO</b>	6,076.25	613.05	24,304.99	23,909.12	6,076.25	1,226.11	62,205.78
<b>QRO-CDMX</b>	45,482.26	4,588.87	181,929.05	178,965.85	45,482.26	9,177.74	465,626.03
<b>CDMX-PUE</b>	20,721.53	2,090.67	82,886.10	81,536.08	20,721.53	4,181.34	212,137.24
<b>PUE-COR</b>	8,884.43	896.38	35,537.74	34,958.91	8,884.43	1,792.76	90,954.66
<b>COR-VER</b>	1,854.83	187.14	7,419.30	7,298.46	1,854.83	374.28	18,988.83

En la Tabla 48, se muestran los resultados obtenidos para las emisiones que, de estos gases, emite la LAV en funcionamiento, provenientes de cada combustible precursor. Los resultados se obtuvieron al multiplicar el factor de emisión correspondiente a cada gas y a cada combustible, de la Tabla 9, por el correspondiente consumo energético, de la Tabla 47.

Se realizó la suma aritmética de la masa total emitida de GEI, por par, que se obtuvo para el modo carretero, en la Tabla 46, con la correspondiente del modo FAV, en la Tabla 48, y se formó la Figura 32, a partir de la cual se realizó la comparativa entre el escenario actual y el hipotético, para los viajes de corto itinerario.



En el escenario actual, las emisiones GEI en la ruta GDL-CDMX, en la opción que pasa por La Piedad, arrojaron en total 1,830,000 toneladas. El desglose de esta cantidad en sus arcos intermedios arrojó que, entre GDL-LPD se emitieron 37,600, para el par LPD-QRO 248,400 y, para el par QRO-CDMX, 1,544,000. En esta misma ruta, pero para la opción que pasa por León, las emisiones de GEI en el año estudiado fueron 2,006,000 toneladas, el par QRO-CDMX cubre

la misma ruta que en la alternativa anterior, por lo tanto, su participación fue idéntica, mientras que los pares GDL-LEÓN y LEÓN-QRO presentaron una pequeña variación entre ellos, en el primero se emitieron 240,000 ton y en el segundo 222,000. Para la ruta hacia el oriente, CDMX-VER, el total emitido fue de 1,200,000 toneladas, de esta cantidad, el arco CDMX-PUE emitió 810,000, el PUE-COR 325,000, y el COR-VER 65,000.

Las emisiones que el corredor de transporte hipotético GDL-CDMX, por La Piedad, arrojó a la atmosfera totalizaron 2,136,000 toneladas. En arco que mayor cantidad aportó fue el QRO-CDMX, con 1,809,000, seguido por el LPD-QRO, donde se emitieron 285,000. El par que participó con la menor cantidad fue el GDL-LPD, con 43,000 ton. Para esta misma ruta, pero en la alternativa que pasa por León, se emitieron en total 2,334,000 toneladas. El arco QRO-CDMX, aportó la cantidad ya descrita previamente; le siguió el arco GDL-LEÓN, en el que se emitieron 271,000 ton, mientras que las restantes 254,000 fueron emitidas en el par LEÓN-QRO. En el corredor CDM-VER, los servicios de transporte emitieron 1,342,000 toneladas de GEI. De estas, 895,000 emanaron del arco CDMX-PUE, 371,000 del PUE-COR, y 76,000 de COR-VER.

Se pudo observar como el escenario hipotético emitió una mayor cantidad de GEI respecto al escenario actual. Esto se debió a que, si bien el TAV abonó positivamente a una reducción en el consumo energético, ya que la electricidad tiene altos factores de emisión gracias a sus combustibles precursores.

#### **4.7.2. Viajes directos**

En el escenario actual, para los viajes entre nodos extremos de cada ruta, se consideraron los tres medios de transporte disponibles en el modo carretero, disgregados por tipo de combustible, así como los aviones que forman los puentes aéreos entre estos nodos, agrupados en la mezcla de combustibles, con sus correspondientes consumos de energía, tal como se presentó en la Tabla 41.

Debido a que, de acuerdo a IPCC (2006), se consideró únicamente al CO<sub>2</sub> para la emisión de los medios del modo carretero, mientras que para el avión se consideraron, además, el CH<sub>4</sub> y el N<sub>2</sub>O, se presentan de manera separada la masa de GEI emitida por cada uno de estos vehículos

en cada arco de viaje directo. Para el modo carretero esta información se presentó en la Tabla 49, mientras que para el modo aéreo se realizó en la Tabla 50.

Tabla 49:  
GEI emitidos (Ton), viajes directos en el modo carretero. Escenario actual, año 2013.

Par	Tipo de vehículo	CO <sub>2</sub>		Total, por par
		Gasolina	Diésel	
GDL-CDMX	A	48,338.80	1,327.50	222,221.88
	B	3,611.21	15,567.23	
	C	6,231.26	147,145.87	
CDMX-VER	A	42,425.79	1,165.12	118,859.35
	B	3,081.74	13,284.82	
	C	2,393.01	56,508.87	

La forma que se utilizó para el cálculo de la masa de GEI emitida se puede observar en la Ecuación (21), mientras que los factores de emisión empleados para cada tipo de combustible, son los mismos que se describieron en el epígrafe 3.8 de la presente investigación.

Tabla 50:  
GEI emitidos (Ton), viajes directos en el modo aéreo. Escenario actual, año 2013.

Par	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Total, por par
GDL-CDMX	86,258.27	43,129.13	172,516.54	301,903.94
CD-VER	14,759.23	7,379.62	29,518.46	51,657.31

Al formar el escenario hipotético, tras la inclusión del FAV prestando servicio en los viajes directos, se generó una disminución de vehículos automotores y de aviones en el corredor de transporte, lo que acarrió un menor consumo energético, tal como se reportó en la Tabla 11, en el caso del aforo vehicular, y en la Tabla 43, en el caso de la energía utilizada. En la Tabla 51 se enlistaron las emisiones de GEI hechas por el autotransporte en el escenario hipotético, mientras que en la Tabla 52 se realizó para el modo aéreo.

Tabla 51:  
GEI emitidos (Ton), viajes directos, modo carretero. Escenario hipotético, año 2013.

Par	Tipo de vehículo	CO <sub>2</sub>		Total, por par
		Gasolina	Diésel	
GDL-CDMX	A	40,121.24	1,101.80	196,900.84
	B	3,321.41	14,317.19	
	C	5,608.14	132,431.06	
CDMX-VER	A	35,213.38	967.08	104,244.55
	B	2,834.38	12,218.06	
	C	2,153.78	50,857.87	

Al comparar exclusivamente para el autotransporte la totalidad de GEI emitidos por par, entre el escenario actual y el escenario hipotético, se observó una reducción de estos en un 11.40% para el arco GDL-CDMX, y en un 11.30% para el CDMX-VER.

Tabla 52:  
GEI emitidos (Ton), viajes directos, modo aéreo. Escenario hipotético, año 2013.

Par	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Total, por par
GDL-CDMX	71,216.79	35,608.39	142,433.57	249,258.75
CD-VER	12,191.04	6,095.52	24,382.07	42,668.63

Se realizó para el modo aéreo de forma aislada, la misma comparación que se hizo para el modo carretero entre el escenario actual y el hipotético, donde resultó que la reducción en la emisión de GEI fue del 17.40% para ambos pares estudiados, lo que es directamente proporcional a la cantidad de espacio en el cual se liberó el espacio aéreo al incluir el servicio FAV en los corredores estudiados, en concordancia con Herrera-García y Sánchez-López (2014).

Para considerar los GEI emitidos por las plantas estacionarias de energía eléctrica debidos al uso del TAV en los viajes directos, al igual que en los viajes de corto itinerario, se comenzó por desagregar el consumo energético de acuerdo al combustible precursor de la electricidad, lo que dio como resultado los valores que se presentan en la Tabla 53.

Tabla 53:  
Desagregación de la energía consumida (TJ) por el TAV. Viajes directos, año 2013.

<b>Par</b>	<b>Hidro-carbuos</b>	<b>Carbón</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Hidro-eléctrica</b>	<b>Geo-termoeléctrica</b>	<b>Eolo-eléctrica</b>
<b>GDL-CDMX</b>	100.20	8.32	4.78	17.15	3.07	0.05
<b>CD-VER</b>	36.54	3.04	1.74	6.26	1.12	0.02

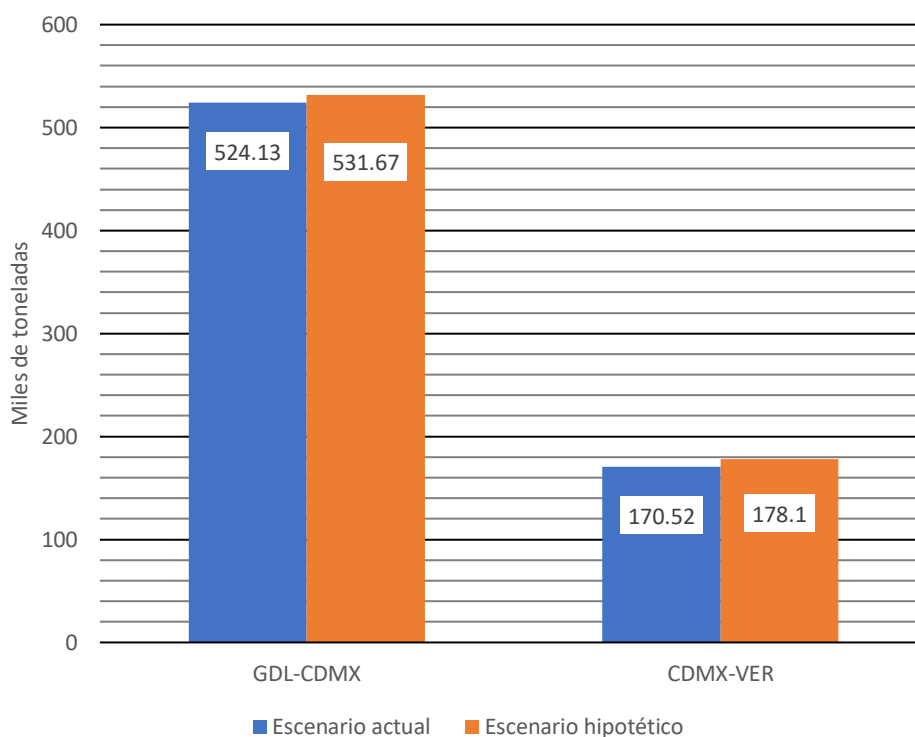
De nueva cuenta, la desagregación de la Tabla 53 se basó en los porcentajes de participación que los distintos precursores de electricidad obtuvieron Ramos y Montenegro (2012), y, aunque se mostraron todos estos, los únicos que aportan GEI, de acuerdo a IPCC (2006) son los hidrocarburos y los carbones. En la Tabla 54 se muestran los resultados que se obtuvieron al calcular la masa de GEI que provocó el funcionamiento del TAV en los corredores estudiados.

Tabla 54:  
 GEI emitidos (Ton), viajes directos en TAV. Escenario hipotético, año 2013.

Par	CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O		Total, por par
	Hidro- carburos	Carbón	Hidro- carburos	Carbón	Hidro- carburos	Carbón	
<b>GDL-CDMX</b>	8,352.91	842.76	33,411.65	32,867.45	8,352.91	1,685.51	85,513.19
<b>CDMX-VER</b>	3,046.27	307.35	12,185.07	11,986.60	3,046.27	614.70	31,186.25

Al sumar el valor que se reportó en la columna “Total, por par”, para cada modo de transporte, tanto en el escenario actual como en el hipotético, se obtuvo la masa completa de GEI que se emitieron por cada arco en el año de estudio. Con esta información se elaboró la Figura 33, con la cual pudo elaborarse la comparativa entre ambos escenarios.

Figura 33:  
Emisión de GEI, viajes directos, año 2013



En el escenario actual, entre el par GDL-CDMX, se emitieron 524,000 ton de GEI a la atmósfera. La desagregación en la hoja de cálculo reportó que la mayor parte fue aportada por los aviones y los automotores de carga, con 302,000 y 153,500, respectivamente, seguido por los automóviles tipo A, con 49,500, y en menor participación aparecieron los autobuses, con 19,000 ton. El par CDMX-VER, presentó 170,500 ton de GEI, los vehículos que más gases emitieron fueron los aviones y los automotores de carga, 51,500 y 59,000 ton, respectivamente, a los que siguieron los vehículos tipo A y tipo B, con 43,500 y 16,500 toneladas.



En el escenario hipotético, el viaje directo GDL-CDMX emitió 531,670 ton de GEI a la atmósfera, la mayor participación fue del avión, con 249,260, seguido por los vehículos tipo C, 138,040, el TAV, con 85,510, los automóviles con 41,220 y, finalmente los autobuses con 17,640. En el arco CDMX-VER se emitieron 178,100 ton, en orden de mayor a menor: 53,010 las emitieron los vehículos C, 42,670 los aviones, 36,180 los vehículos A, casi igualado por el TAV, con 31,190 toneladas, y, en último lugar 15,050 los vehículos B.

Para ambas rutas en viajes directos, llamó la atención como, mientras el consumo energético del TAV fue el menor respecto a los otros cuatro medios de transporte, su cantidad de emisiones de GEI quedó en la tercera y en la cuarta posición. El motivo de esto fueron los factores de emisión considerados para la energía eléctrica. Las fuentes estacionarias de energía eléctrica a nivel nacional, consumen principalmente hidrocarburos y carbón, combustibles con un alto factor de emisiones, tanto de CO<sub>2</sub>, como de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Esta situación ocasionó que las emisiones de GEI agregadas por cada arco, fueran mayores en el escenario hipotético.

#### **4.8. La valoración del consumo energético y las emisiones de GEI**

El cálculo del costo debido al consumo energético y a las emisiones de gases efecto invernadero se realizó con la multiplicación del total de megajulios en el primero y la totalidad de toneladas de las segundas, por el precio correspondiente mencionado en el apartado metodológico de la presente investigación. Los resultados de este procedimiento se organizaron para cada arco, tanto para viajes de corto itinerario, en la Tabla 55, como para viajes directos, en la Tabla 56.

Tabla 55:  
Costos por consumos y emisiones, millones de pesos, corto itinerario

Par	Consumo energético		Emisiones		Total	
	Escenario actual	Escenario hipotético	Escenario actual	Escenario hipotético	Escenario actual	Escenario hipotético
<b>GDL-LPD</b>	\$174.90	\$157.37	\$1.44	\$1.65	\$176.34	\$159.02
<b>LPD-QRO</b>	\$1,151.70	\$1,034.69	\$9.51	\$10.91	\$1,161.21	\$1,045.60
<b>GDL-LEÓN</b>	\$1,108.80	\$999.57	\$9.19	\$10.37	\$1,117.99	\$1,009.94
<b>LEÓN-QRO</b>	\$1,032.90	\$932.09	\$8.50	\$9.72	\$1,041.40	\$941.81
<b>QRO-CDMX</b>	\$7,104.90	\$6,470.72	\$59.10	\$69.25	\$7,164.00	\$6,539.97
<b>CDMX-PUE</b>	\$3,814.80	\$3,348.92	\$31.01	\$34.26	\$3,845.81	\$3,383.18
<b>PUE-COR</b>	\$1,508.10	\$1,358.75	\$12.44	\$14.20	\$1,520.54	\$1,372.95
<b>COR-VER</b>	\$300.30	\$273.33	\$2.49	\$2.91	\$302.79	\$276.24

Tabla 56:  
Costos por consumos y emisiones, millones de pesos, en viajes directos

Par	Consumo energético		Emisiones		Total	
	Escenario actual	Escenario hipotético	Escenario actual	Escenario hipotético	Escenario actual	Escenario hipotético
<b>GDL-CDMX</b>	\$1,351.40	\$1,227.10	\$20.06	\$20.35	\$1,371.46	\$1,247.45
<b>CDMX-VER</b>	\$603.30	\$546.60	\$6.53	\$6.81	\$609.83	\$553.41

Para los viajes de corto itinerario, en todos los arcos, el escenario hipotético presentó un incremento en el costo de las emisiones, sin embargo, dado que este rubro ronda tan solo el 1% del costo energético, en la suma total se presentaron ahorros de este respecto al actual que rondan el 10% para casi todos los pares, la excepción resultó en el COR-VER, donde se esta relación fue del 9%.

Para los viajes directos, en ambos escenarios, el costo de las emisiones resultó dentro del 1% correspondiente al costo del consumo energético de los dos arcos estudiados. Resultó notorio como, mientras los montos del consumo energético disminuyeron del escenario actual al escenario hipotético, se incrementaron los correspondientes a las emisiones de GEI, pero, al sumar ambos, resultó un ahorro que ronda el 9% en ambos pares.

## 5. Conclusiones

En base al criterio de la distancia mínima que sirve para aprovechar las ventajas del tren de alta velocidad, en el itinerario proveniente de Occidente, desde Guadalajara hasta la Ciudad de México, en su primera alternativa, resulta factible colocar una estación intermedia en La Piedad y otra en la ciudad de Querétaro; para la segunda opción esto se logra emplazando estaciones intermedias en León y, de nueva cuenta, en la ciudad de Querétaro. Bajo esta misma pauta, en el itinerario rumbo al Oriente, de Ciudad de México al Puerto de Veracruz, utilizando una única ruta, resulta viable situar, de igual forma que en la anterior línea, dos estaciones intermedias: la primera en la ciudad Puebla y otra en Córdoba.

El recorrido total para los medios que circulan por carretera en el par Guadalajara – Ciudad de México, es de 576.19 km, en la opción que pasa por La Piedad y de 612.61 km, en la alternativa por León. Para el tren de alta velocidad estas distancias son de 549.90 y 584.66 km, respectivamente. En el par Ciudad de México – Veracruz, el recorrido carretero es de 417.50 km, mientras que resulta de 398.45 km para el del tren de alta velocidad. La distancia ortodrómica recorrida por los aviones en estos pares es de 459.04 y 304.55 Km, respectivamente. Sin embargo, a diferencia del comparativo autotransporte contra TAV, al confrontar al avión contra este, la separación espacial no resultó ser una impedancia: mientras que el ferrocarril de alta velocidad recorre una longitud sobre el terreno, las aeronaves lo realizan separadas de este; en cambio el tiempo consumido es el parámetro que consideran los usuarios al elegir entre estos dos modos.

En lo que respecta al valor del tiempo de los usuarios, en los corredores de transporte estudiados con viajes de corto itinerario, se encontró que existe una merma del 1% promedio de este rubro al considerar al TAV dentro de la oferta de viajes, fue notorio que el motivo de esta pérdida se debe a los tiempos consumidos por el acceso, espera y egreso de las terminales ferroviarias. Sin embargo, para los viajes directos, o de itinerario completo, se logró un ahorro del 2% promedio tras la inclusión del TAV; de nueva cuenta, los tiempos que transcurren en las terminales son el factor primordial: se definió que la frecuencia de los trenes debe ser tal que garantice tiempos

de espera menores en las estaciones de la LAV, respecto a los que se consumen en las terminales aéreas, para que el nuevo modo sea atractivo por sobre el avión.

En el estudio de la cohesión territorial, el análisis de las rutas de manera individual, arroja que, para el itinerario GDL-CDMX en su opción por La Piedad, la productividad en el año 2013 se incrementa en 13,760 pesos por trabajador, significando una tasa decenal del 2.14% en la cohesión entre las regiones por las que pasa la nueva línea ferroviaria. En esta misma ruta, pero pasando por León, la productividad se incrementó en 13,390 pesos por trabajador, y se logró incrementar la cohesión interregional a razón del 2.02% en el decenio, gracias a la inclusión del TAV en la oferta de transporte. En lo que respecta al itinerario CDMX-VER, este arrojó resultados equiparables en los dos análisis, formando parte de una red y de manera individualizada. En ambos casos la productividad en el año 2013 se incrementa en valores que rondan los seis mil pesos por trabajador, y la cohesión interregional resulta con tasas decenales del 0.98% y el 1.09%, al incluir el tren de alta velocidad en la oferta de transporte, en cada caso, respectivamente.

En el presente estudio se encontró que, al considerar los combustibles que se utilizan en México para la generación de energía eléctrica, la cantidad de GEI emitida a la atmosfera se ve incrementada tras la inclusión de una LAV en los corredores de transporte. Si bien el consumo energético reporta una disminución, los GEI adicionales al CO<sub>2</sub> que se producen en las plantas estacionarias generadoras de electricidad, son los que mayormente aportan al incremento.

Al emplear en conjunto los criterios de alta demanda del transporte y de separación espacial mínima entre estaciones, resulta factible evaluar tres hipotéticas rutas, dos de ellas entre Guadalajara y Ciudad de México, y una de Ciudad de México hacia el Puerto de Veracruz. En los casos de la ruta proveniente de occidente, es factible emplazar estaciones intermedias en La Piedad, León y Querétaro. En el caso de la ruta hacia el oriente, las estaciones intermedias que cumplen los requisitos fueron Puebla y Córdoba. En base a esto, se definieron ocho corredores de corto itinerario, es decir de un nodo extremo a su nodo intermedio inmediato o entre nodos intermedios contiguos, y dos corredores de itinerario completo, es decir, con viajes directos.

Para el consumo energético, en los viajes de corto itinerario, se observa que el consumo energético es entre un 10% y un 13% menor para los ocho corredores intermedios al incluir el tren de alta velocidad en los servicios de transporte. En los viajes directos esta reducción es del 10% en los dos corredores que contemplaron este tipo de viaje.

En lo que respecta a la emisión de GEI, esta aumenta por la inclusión del TAV en la oferta de transporte de los corredores. Para los ocho corredores de corto itinerario, hay un incremento de entre el 10% y el 17% en este efecto. En los viajes directos, el un aumento es del 1% y del 4%, según la ruta considerada. Estos incrementos se explican debido a que las plantas mexicanas que producen la energía eléctrica para alimentar a los TAV, utilizan mayoritariamente hidrocarburos y carbón como precursor de este fluido y ambos combustibles, tienen un alto factor de emisiones, tanto de CO<sub>2</sub>, como de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>.

## Bibliografía

- Aeromar (2019). Vuelos. <<https://www.aeromar.mx/>> (May. 05, 2019).
- Aeromexico (2019). Vuelos. <<https://aeromexico.com/es-mx>> (May. 15, 2019).
- Albalate, Daniel, Bel, Germá (2011). Cuando la economía no importa: auge y esplendor de la alta velocidad en España. *Revista de Economía Aplicada*, número 55, vol. XIX, pp. 171-190. ISSN: 1133-455X.
- Alberro-Semerena, José (2008). Costo de oportunidad social del tiempo de usuarios del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. *El trimestre económico*, vol. LXXV (1), núm 297, enero-marzo de 2008, pp. 211-223.
- Alias, Jean (1984). *La voie ferrée: techniques de construction et d'entretien*. (2a. Ed.). France: Editions Eyrolles et S.C.N.F. 549 p. ASIN: B0014I5IHM.
- Alias, Jean, Valdés, Antonio (1990). *La vía del ferrocarril*. España: Bellisco. Librería Editorial. 334 p. ISBN: 84-85198-43-3.
- Alonso-Logroño, María del Pilar, Bellet-Sanfeliu, Carmen (2009). El tren de alta velocidad y el proyecto urbano. Un nuevo ferrocarril para la Zaragoza del tercer milenio. *Scripta Nova, Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, vol. XIII, núm. 281. pp. 1-22. ISSN 1138-9788.
- Alphabet Incorporated (2019). Google Maps. <<https://www.google.com/maps/>> (Abr. 15, 2019).
- Barreno-Ripoll, Manuel, Casado-Fuente, Ma. Luisa, Castejón-Solanas, Ma. Ángeles, Sebastián-Lorente, Luis (2008). *Trigonometría esférica, fundamentos*. España: E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía. 58 p. ISBN: 84-96244-13-x
- Ben-Akiva, M., Lerman, S. R. (1979). Dissaggregate travel and mobility choice models and measures of accesibility. *Behavioural travel modelling*.
- Benavides Ballesteros, Henry Oswaldo, León Aristizábal, Gloria Esperanza (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y cambio climático*. Colombia: IDEAM. 102 p. IDEAM-METEO/008-2007.
- Cabeza-Morales, Israel, Gutiérrez-Rey, Franz (2015). Cohesión territorial: de los alcances a la conceptualización. *Revista geográfica venezolana*, vol. 56, núm. 2, pp. 1-11.

Cadengo-Ramírez, María, Casanova-Zavala, Wendy Alejandra, Mendoza-Díaz, Alberto (2018). *Desarrollo de metodología para la estimación de los vehículos-kilómetro recorridos anualmente, a nivel nacional, publicación técnica 517*. México: Instituto Mexicano del Transporte. 46 p. ISSN 0188-7297.

CAHISA (California High Speed Rail Authority) (2013). *Creando puestos de trabajo*. United States: Autor. 2 p.

Cal y Mayor-Reyes Spindola, Rafael, Cárdenas-Grisales, James (2007). *Ingeniería de Tránsito, fundamentos y aplicaciones*. (8a Ed.). México: Alfaomega Grupo Editor. 597 p. ISBN: 970-15-1238-3.

Campos Robledo, Jacobo, Olivares, Wilmer (2013). "Relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de energía y el PIB: el caso de los CIVETS". *Semestre económico*, vol. 16, num. 33, pp. 45-66. ISSN 0120-6346.

Cartes Mena, Fernando (2018). *Metodología de inclusión de precio social de carbono en proyectos de inversión pública*. Costa Rica: Seminario regional sobre instrumentos de política fiscal, verde, cambio climático y sostenibilidad ambiental. 27 p.

Castillo-Hudiel, Mayerling, Hurtado-Gámez, Joao Marco, Palacio-Rayó, Iris Rebeca (2015). *Propuesta de un manual de buenas prácticas de laboratorio (BPL) para la industria Fito farmacéutica ISNAYA, ingeniería industrial y de sistemas*. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. 21 p.

Chen, Yun, Wei, Lijia (2018). Railroad development, temporal-spatial externalities, and growth spillover: theory and empirical evidence. *J Regional science*, 58, pp. 980-1002. DOI: 10.1111/jors.12407.

CONAPO (Consejo Nacional de Población) (2019). Indicadores demográficos de la República Mexicana.

<[http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa\\_Ind\\_Dem18/index\\_2.html](http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa_Ind_Dem18/index_2.html)>

(May. 08, 2019)

CONASAMI (Comisión Nacional de Salarios Mínimos) (2019). Salarios mínimos vigentes a partir del 1° de enero del año 2018.

<<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/285013/TablaSalariosMinimos-01ene2018.pdf>> (May. 14, 2019).



CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) (2020). Lista de combustibles.

<[https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/SITE/LISTA\\_DE\\_COMBUSTIBLES\\_2020.pdf](https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/SITE/LISTA_DE_COMBUSTIBLES_2020.pdf)> (Jul. 07, 2020).

Cornet, Yannick, Dudley, Geoffrey, Banister, David (2017). High speed rail: implications for carbon emissions and biodiversity. *Case Studies on Transport Policy*, volume 1, Issue 1 (sin número de páginas).

De Rus, Ginés, Campos, Javier, Nombela, Gustavo (2003). *Economía del transporte*. España: Antoni Bosch, editor, S.A. 447 p. ISBN: 978-8-495-34808-1.

De Rus, Gines, Inglada, Vicente (1993). Análisis coste-beneficio del tren de alta velocidad en España. *Revista de economía aplicada*, vol. 1, núm 3, pp. 27-48.

De Rus, Gines, Nash, Chris (2007). *In what circumstances is investment in high speed rail worthwhile?*. United Kingdom: Institute of Transport Studies, University of Leeds. 37 p.

De Rus, Gines, Nombela, Gustavo (2007). Is investment in high speed rail socially profitable?. *Journal of Transport Economics and Policy*, volumen 41, parte 1, pp. 3-23.

De Rus, Ginés, Román, Concepción (2006). Análisis económico de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona. *Revista de Economía Aplicada*, número 42, vol. XIV, pp. 35-79. ISSN: 1133-455X.

Doomernik, Jack E. (2015). Performance and efficiency of High-speed Rail systems. *Transportation Research Procedia*, 8 pp. 136 – 144.

Durán-Fernández, Roberto, Santos, Georgina (2014). A regional model of road accessibility in Mexico: accesibility surfaces and robustness analysis. *Research in Transportation Economics*, 46, pp. 55-69. DOI: 10.1016/j.retrec.2014.09.02

Durán-Fernández, Roberto, Santos, Georgina (2014b). Road infrastructure spillovers on the manufacturing sector in Mexico. *Research in Transportation Economics*, 46, pp. 17-21. DOI: 10.1016/j.retrec.2014.09.02

EIA (U.S. Energy Information Agency) (2019). *Annual energy outlook 2019*. <<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>> (Dic. 27, 2019).

Expansión (2018). Precio del petróleo OPEP por barril. <<https://www.datosmacro.com/materias-primas/opec>> (Mar. 31, 2018).

- Expedia (2019). Consulta de vuelos. <<https://www.expedia.mx/?pwaLob=wizard-flight-pwa>> (May. 14, 2019).
- Feliu-Torrent, Jaume (2007). La organización de los actores en el desarrollo territorial. El tren de alta velocidad en la ciudad intermedia. *Investigaciones geográficas*, núm. 43, pp. 97-120. ISSN 1989-9890.
- Fernández-Díaz, Xose Carlos (2006). *El ferrocarril en Galicia: pasado, presente y futuro*. España: IR Indo. 267 p. ISBN: 978-8-476-80586-2.
- Fernández-Jáñez, Judith (2012). Análisis de los datos de tráfico del primer año de explotación de la línea de alta velocidad de Madrid a Valencia. *Revista de alta velocidad*, núm. 2, p. 57-71.
- Ferropedia (2019). Renfe Serie 112. <[http://www.ferropedia.es/mediawiki/index.php/Renfe\\_Serie\\_112](http://www.ferropedia.es/mediawiki/index.php/Renfe_Serie_112)>. (Nov. 07, 2019).
- FITSA (Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil) (2008). *El valor de la seguridad vial*. España: Autor. 27 p. ISBN: 978-84-611-6857-6
- Flores & Garibay (2020). Tipo de cambio 2013. <<http://200.76.36.12/tipo-de-cambio.asp?id=2013>> (Sep. 21, 2020).
- Gállego, Inmaculada (2012). *La heterogeneidad resistente de Las vías de alta velocidad*. España: Eae Editorial Academia. 464 p. ISBN: 978-3-848-46491-3.
- García-Álvarez, Alberto (2005). El tren de alta velocidad no es un depredador de energía. *Revista Dyna*, junio, pp. 33-38.
- García-Álvarez, Alberto (2007). Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos de transporte. *Anales de mecánica y electricidad*, septiembre/octubre, pp. 26-34.
- García-Álvarez, Alberto (2016). *La demanda en el transporte de viajeros. Generación, evolución y reparto modal*. España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles. 64 p. ISBN: 978-84-946555-2-4.
- Garrocho, Carlos, Campos-Alanis, Juan (2006). Un indicador de accesibilidad a unidades de servicios clave para ciudades mexicanas: fundamentos, diseño y aplicación. *Economía, sociedad y territorio*. Vol. VI, núm. 22, 349-397.

Goodall, Brian (1987). *The penguin dictionary of Human Geography*. Inglaterra: Penguin Books.

Gutiérrez-Puebla, Javier (2004). El tren de alta velocidad y sus efectos espaciales. *Investigaciones Regionales*, núm. 5, pp. 199-221. ISSN 1695-7253

Hansen, W. (1959). How accessibility shapes land use. *Journals of the American Institute of Planners*, 25, pp. 73-76.

Hernández, Aday (2011). *Beneficios sociales de la alta velocidad ferroviaria: el papel de los accidentes y la congestión*. España: Universitat de Barcelona. 28 p.

Herrera-García, Alfonso, Sánchez-López, Orlando (2014). Estimación del potencial de los trenes de media y alta velocidad en México con base en la demanda de pasajeros aéreos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. XVI, núm. 2, abril-junio, 2015, pp. 265-277. ISSN 1405-7743.

ICAO (International Civil Aviation Organization) (2017). *Carbon Emissions Calculator Methodology*. Estados Unidos: Autor. 38 p.

IEA (International Energy Agency) (2013). 2013 Key world energy statistics. Francia: Autor. 82 p.

IMCO (Instituto Mexicano para la Competitividad A.C.) (2013). *Transición energética y competitividad*. México: Autor. 10 p.

Indexmundi (2020). Gasolina de aviación, precio diario. <<https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gasolina-de-aviacion&meses=120>> (Sep. 21, 2020)

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. <<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>>. (Mar. 06, 2020).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. <<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>>. (Mar. 06, 2020).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2019). Encuesta nacional de ocupación y empleo (ENOE), población de 15 años y más de edad. <<https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/>> (May. 30,2019)

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020). *Censos económicos 2003, 2008 y 2013*. <<https://www.inegi.org.mx/app/saic/>>. (Mar. 15, 2020).

INPC, El (2020). Evolución del precio de la gasolina durante el 2013. <<https://elinpc.com.mx/precio-de-la-gasolina-2013/>> (Sep. 17, 2020)

Interjet (2019). Selección de vuelo. <<https://www.interjet.com/es-mx>> (May. 14, 2019).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. (Vol. 2, Cap. 3). Autor. 78 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006b). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. (Vol. 2, Cap. 2). Autor. 47 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). *5th assesment report, Climate change 2014: mitigation of climate change*. Ginebra, Suiza.: Autor. 1436 p.

ISA Corporativo (2015) - Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. <[http://isa.com.mx/pdf/bkp20160229/PRESENTACION\\_AICM\\_2015.pdf](http://isa.com.mx/pdf/bkp20160229/PRESENTACION_AICM_2015.pdf)> (May. 17, 2019).

Islas-Rivera, Victor M., Rivera-Trujillo, César, Torres-Vargas, Guillermo (2002). *Estudio de la demanda de transporte*. México: SCT, IMT. 152 p. ISSN: 0188-7297

Jara-Díaz, Sergio (2007). *Transport economic theory*. United Kingdom: Emerald Group Publishing Limited. 140 p. ISBN: 978-0-080-45028-5.

Jiménez, Mayka (2014). ATRI pone valor al coste por congestión en las carreteras. *Revista digital Loginews, noticias sobre el sector de la logística y el transporte*, 9 de mayo. <<http://www.noticiasytransporte.com>> (Abr. 03, 2018).

Johnston, Ronald J., Gregory, Dereck, Smith, David M. (2000). *The dictionary of Human Geography*. Inglaterra: Blackwell.

Klein, Nicholas J., Smart, Michael J. (2017). Millenials and car ownership: less money, fewer cars. *Transport Policy*, num. 53, pp. 20-29.

Larsson, Jorgen, Kamb, Anneli, Näsén, Jonas, Åkerman, Jonas (2018). "Measuring green house gas emissions from international air travel of a contry's residents methodological development and application for Sweden". *Environmental Impact Assessment Review*, num. 12, pp. 137-144.

- Liang, Xiao Hong, Tan, Ke Hu, Whiteing, Anthony, Nash, Chris, Johnson, Daniel (2016). Parcels and mail by high speed rail - a comparative analysis of Germany, France and China. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. En prensa, pp. 1-12.
- López-Pita, Andrés (2014). *Líneas de ferrocarril de alta velocidad: planificación, construcción y explotación*. España: Garceta Grupo Editorial. 286 p. ISBN: 978-8-415-45285-0.
- Martínez Acevedo, José Conrado, Iglesias Díaz, José Ignacio (2018). "El transporte ferroviario como la solución de transporte más sostenible: desarrollos actuales para la mejora de la eficiencia energética del ferrocarril". *Ingeniería Civil*, núm. 191, pp. 1-9.
- McFadden D. (1981). Econometric models of probabilistic choice. *Structural analysis of discrete choice data with econometric applications*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Modelística (2014). *Estudio de demanda para el TAV México-Querétaro*. México: Autor. 162 p.
- Monclús, Jesús, Aragón, Agustín, Aparicio, Francisco, Gomez, Alvaro (2008). *El valor de la seguridad vial. Conocer los costes de los accidentes de tráfico para invertir más en su prevención*. España: FITSA. 27 p. ISBN: 978-84-611-6857-6.
- Montgomery, Douglas C., Runger, George C. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México: McGraw Hill. 895 p. ISBN: 978-970-10-1017-4.
- Nash, Chris (2015). When to invest in high speed rail. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol. 1, Núm. 5, mayo 2015, pp. 12-22.
- Nishijima, Shigehiro, Eckroad, Steven, Marian, Adela, Choi, Kyengondal, Seok-Kim, Woo, Terai, Motoaki, Deng, Zidang, Zheng, Jun, Wank, Jiasu, Umemoto, Katsuya, Du, Jia, Febvre, Pascal, Keenan, Shane, Mukhanov, Oleg, D-Cooley, Lance, P-Foley, Cathy, V-Hassenzahl, Izumi, Mitsuru (2013). Superconductivity and the environment: a roadmap. *Superconductor science and technology*, Vol. 26, 2013, 36 p.
- Oiltanking (2020). Glosario combustibles de aviación. <<https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/detalles/term/combustibles-de-aviacion-jet-fuel-gasolina-de-aviacion-avgas-jet-b-bioqueroseno.html>> (Sep. 04, 2020).
- Ortúzar, Juan de Dios, Willumsen, Luis G. (2011). *Modelling transport*. (4a. Ed.). United States: John Wiley & Sons. 586 p. ISBN: 978-0470760390.

- PP (Línea de autobuses Primera Plus) (2019). Consulta de horarios y compra de boletos. <<https://wl.primeraplus.com.mx/>> (May. 21, 2019).
- Preston, J., Rajé, F. (2007). Accessibility, mobility and transport-related social exclusion. *Journal of transport Geography*, 15, pp. 151-160.
- Ramos Gutiérrez, Leonardo de Jesús, Montenegro Fragoso, Manuel (2012). "La generación de energía eléctrica en México". *Tecnología y ciencias del agua*. Vol. III, núm. 4, pp. 197-211.
- RENFE (Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles) (1988). *Normas para las características geométricas de la vía*. España: Autor.
- Rodrigue, Jean-Paul, Comtois, Claude, Slack, Brian (2009). *The geography of transport systems*. (2a. Ed.). USA: Routhledge. 352 p. ISBN: 978-0-415-48324-7.
- Sala-i-Martin, Xavier X. (1996). Regional cohesion: evidence and theories of regional growth and convergence. *European Economic Review*, 40, pp. 1325-1352.
- Schreyer, Christoph, Scheiner, Christian, Maibach, Markus, Rothengatter, Werner, Doll, Claus, Schmedding, David (2004). *Costes externos del transporte, estudio de actualización*. Suiza: INFRAS. 19 p.
- Scott Andretta, John (2011). *¿Quién se beneficia de los subsidios energéticos en México?*. México: CIDE. 26 p.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2013). *Estudio de origen, destino y peso. Estación "P.C. Palmillas" y Estación "P.C. San Martín Texmelucan"*. México: Autor. 24 p.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2013b). *Estudio de origen, destino y peso. Estación "P.C. San Martín Texmelucan"*. México: Autor. 9 p.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2014). *Velocidades de punto, Querétaro*. México: Autor. 26 p.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2014b). *Velocidades de punto, Guanajuato*. México: Autor. 41 p.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2014c). *Velocidades de punto, Michoacán*. México: Autor. 46 p.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2014d). *Velocidades de punto, Jalisco*. México: Autor. 47 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2014e). *Velocidades de punto, Puebla*. México: Autor. 42 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2014f). *Velocidades de punto, Veracruz*. México: Autor. 61 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2014g). *Velocidades de punto, Adendum al libro datos viales 2014*. México: Autor. 7 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2017). *Aforos vehiculares Puebla*. México: Autor. 46 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2017a). *Estudio de origen, destino y peso*. <<http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/origen-y-destino/>> (Abr. 20, 2019).

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2017b). *Capacidad y niveles de servicio en la red federal de carreteras*. México: Autor. 408 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2017c). *Norma oficial mexicana NOM-012-SCT-2-2017*. México: Autor. 47 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2017d). *Estudio de origen, destino y peso*. <<http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/origen-y-destino/>> (Abr. 20, 2019).

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018). *Volúmenes de tránsito en la red nacional de carreteras pavimentadas*. México: Autor. 12 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018a). *Volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo de vehículos*. México: Autor. 173 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018b). *Aforos vehiculares Veracruz*. México: Autor. 49 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018b). *Aviación Mexicana en Cifras 1991-2017*. México: Autor. 74 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018b). *Volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo de vehículos*. México: Autor. 173 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018c). *Estadística básica del autotransporte federal*. México: Autor. 137 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018d). *Aviación Mexicana en Cifras 1991-2017*. México: Autor. 74 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018e). Estadística mensual operativa. <<http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/aeronautica-civil/5-estadisticas/53-estadistica-operacional-de-aerolineas-traffic-statistics-by-airline/estadistica-historica-1992-2018-historical-statistics-1992-2018/estadistica-mensual-operativa-monthly-operating-statistics/>> (Abr. 12, 2019)

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018f). *Volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo de vehículos*. México: Autor. 173 p.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2019). Traza tu ruta. <[http://app.sct.gob.mx/sibuac\\_internet/ControllerUI?action=cmdEscogeRuta](http://app.sct.gob.mx/sibuac_internet/ControllerUI?action=cmdEscogeRuta)> (Abr. 05, 2019).

SDG (Steer Davies Gleave) (2004). *High speed rail: international comparisons*. United Kingdom: Commision for Integrated Transport. 144 p.

SENEAM (Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano) (2012). *Publicación de Información Aeronáutica (PIA)*. México: Autor. 397 p.

Sheinbaum-Pardo, Claudia, Chávez-Baeza, Carlos (2011). Fuel economy in new passenger cars in Mexico: trends from 1988 to 2008 and prospects. *Energy Policy*, num. 39, pp. 8153-8162.

Solís-Ávila, Juan Carlos, Sheinbaum-Pardo, Claudia (2015). Consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> del autotransporte en México y escenarios de mitigación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 32, num. 1, pp. 7-23.

Sotelo-Navalpotro, José Antonio, Sotelo-Pérez, Maria, Tolón-Becerra, Alfredo (2011). Las emisiones de gases efecto invernadero en el sector transporte por carretera. *Investiagaciones Geográficas*, num. 54, pp. 133-169. ISSN 0213-4691.

Thompson, Ian, Bull, Alberto (2002). La congestión del tránsito urbano, causas y consecuencias económicas y sociales. *Revista de la CEPAL*, número 76, abril, pp. 109-121.

Thompson, Louis S. (1994). High speed rail (HSR) in the United States - Why isn't there more?. *Japan Railway & Transport Review*, october, pp. 32-39.



- Torres, Guillermo, Hernández, Salvador, González, Alejandro, Arrojo, Antonio (2019). Estimación del valor del tiempo de los ocupantes de los vehículos que circulan por la red carretera de México, 2019. *Notas publicación bimestral de publicación externa*, núm. 176, enero-febrero 2019, artículo 1.
- Train, K., McFadden D. (1978). The goods/leisure tradeoff and disaggregate work trip mode choice models. *Transportation research* 12, pp. 349-353.
- UIC (Union International des Chemins de fer) (2018). High speed. <<https://uic.org/passenger/highspeed/>> (Feb. 07, 2018).
- Vidalenc (2008). *Efficacités énergétique et environnemental des modes de transport*. France: République Française, ADEME, Deloitte. 29 p.
- Viva Aerobus (2019). Flights. <<https://www.vivaaerobus.com/en>> (May. 17, 2019).
- Volaris (2019). Vuelos. <<https://www.volaris.com/>>. (May. 21, 2019).
- Wolf, Peter, Simon, Werner (1984). "Energy consumption in air transport. A contribution to the problem of calculating and comparing energy consumption values of jet-propelled civil aircraft". *Transport review*, vol. 4, núm 2, pp. 159-171.
- Xujie Feng, Quanxin Sun, Lu Liu, Minggao Li (2014). "Assesing energy consumption of high-speed trains bases on mechanical energy". *Procedia - social and behavioral sciences*, num. 138, pp. 783-790.