PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

MODELO URBANO DE SIMULACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL PARQUE VEHICULAR

JACQUES POLETTE

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesores Supervisores:
JUAN DE DIOS ORTÚZAR
LUIS IGNACIO RIZZI

Santiago de Chile, Abril 2017

© MMXVII, JACQUES POLETTE

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

MODELO URBANO DE SIMULACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL PARQUE VEHICULAR

JACQUES POLETTE

Miembros del Comité:
JUAN DE DIOS ORTÚZAR
LUIS IGNACIO RIZZI
HÉCTOR JORQUERA
MAURICIO OSSES
JOSÉ MIGUEL AGUILERA

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Abril 2017

© MMXVII, JACQUES POLETTE

A mi familia y amigos.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi familia, por las oportunidades que me han brindado a lo largo de la vida, y por el constante apoyo durante todos estos años de estudio. En segundo lugar, a mis profesores guías, Juan de Dios Ortúzar y Luis Rizzi por la paciencia y constantes muestras de apoyo durante estos meses de trabajo, por sus consejos y sus ideas sobre como dar siempre lo mejor.

También me gustaría agradecer a todos mis amigos y compañeros de universidad que fueron parte del proceso. Mención especial a Cristóbal Sirhan, quien gracias a su constante apoyo, perseverancia y aporte de ideas me permitió desarrollar esta investigación en plazos acotados.

Mención a mis compañeros de magister, profesores y funcionarios del Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, que siempre estuvieron a disposición para ayudar y resolver las dudas que fueron surgiendo durante el proceso.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS iv

ÍNDICE DE FIGURAS ix

ÍNDICE DE TABLAS xiii

RESUMEN xv

ABSTRACT xvi

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Motivacion: La Relevancia de Cuantificar las Emisiones Vehiculares en Entornos Urbanos 1

1.2. Modelo Base: REMIT: Reducing EMissions In Transport 2

1.2.1. Entradas y salidas de REMIT 3

1.2.2. Observaciones sobre el modelo actual 4

1.3. Extensiones al Modelo 6

1.3.1. Tipos de contaminantes 6

1.3.2. Composición del parque vehicular 6

1.3.3. Dinámica del parque vehicular 7

1.3.4. Uso vehicular 8

1.3.5. Políticas públicas 8

1.4. Objetivos 8

1.5. Estructura de la Tesis 9

2. PROYECCIÓN DE TOTALES VEHICULARES 11

2.1. Modelo Gompertz para Vehículos Particulares 11

2.1.1. Marco teórico 13

2.1.2. Necesidades de información 14

2.1.3. Nivel de saturación del parque vehicular 18

2.1.4. Resolución mediante regresión lineal y resultados 20
2.2. Modelación de Parque de Buses, Camiones y Taxis Mediante Series de Tiempo 23
2.2.1. Datos utilizados 23
2.2.2. Marco teórico del tratamiento de series de tiempo 23
2.2.3. Resultados de los modelos 26
2.2.4. Resultados y suavizamiento de las proyecciones 30
2.3. Contraste de Resultados con Tendencias de Mercado 31

3. PROYECCIÓN DE TOTALES POR CATEGORÍA TECNOLÓGICA 33
3.1. Información Disponible 33
3.2. Análisis de Consistencia en las Tendencias 36
3.2.1. Decrecimiento del parque vehicular para normativas EURO obsoletas 36
3.2.2. Crecimiento del parque vehicular para normativas EURO vigentes . . 36
3.3. Parque Vehícular Base 37
3.4. Distribución de Supervivencia 40
3.5. Modelación del Parque en la Simulación 42

4. EDAD DEL PARQUE VEHICULAR 45
4.1. Evidencia Internacional 45
4.2. Cálculo de la Edad del Parque 45
4.3. El Parque Vehicular de Santiago y de Chile Tienden a Envejecer 47
4.3.1. Edad del parque del Gran Santiago 47
4.3.2. Análisis de sensibilidad 48
4.3.3. Edad del parque vehicular nacional 49

5. DISTANCIAS RECORRIDAS POR EL PARQUE VEHICULAR 52
5.1. Información Disponible 52
5.2. Depuración de los Datos 53
5.3. Modelación de las Distancias Anuales Recorridas 54
5.3.1. Supuestos de modelación 54

5.3.2. Kilometrajes acumulados 54
5.3.3. Kilometrajes anuales 55
5.4. Vehículos - Kilómetros Recorridos por el Parque 58
5.4.1. Resultados obtenidos 58
5.4.2. Comparación de resultados con proyecciones de SECTRA 60

6. PROYECCIÓN DE EMISIONES LOCALES DEL PARQUE VEHICULAR 63
6.1. Contaminantes Locales Considerados 63
6.2. Factores de Emision 64
6.2.1. Modelo COPERT V 64
6.2.2. Metodología y factores de emisión 66
6.2.3. Elementos no considerados en la metodología 68
6.3. Perfiles de Emisión de Contaminantes Locales 68
6.3.1. Monóxido de carbono 68
6.3.2. Óxidos de nitrógeno 72
6.3.3. Material particulado 76
6.4. Comentarios Generales 80

7. PROYECCIÓN DE EMISIONES GLOBALES EL PARQUE VEHICULAR 81
7.1. Modelación del Parque Vehicular Nacional 81
7.2. Distancias Recorridas por el Parque Vehicular 85
7.3. Consumos de Combustible 86
7.4. Emisiones de CO_2 91
7.5. Sensibilidad del *Fuel Economics* en las Emisiones de CO_2 93

8. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS 95
8.1. Crecimiento del Parque Vehicular 95
8.2. Impulso a Vehículos Eléctricos 97
8.3. Tasa de Renovación del Parque Vehicular 99
8.4. Fecha de Introducción de la Norma EURO VI 101
8.5. Venta de Vehículos Nuevos Bajo Permisos 102

8.6. Consideraciones Finales 105

9. SOFTWARE GUESS 106

9.1. Pestañas *TOTAL* 106

9.2. Pestaña *INITIAL* 107

9.3. Pestaña *SD - Survival Distribution* 107

9.4. Pestañas *COMP* 108

9.5. Pestañas *DistancesTravelled* 108

9.6. Pestañas *EmissionFactors* 108

9.7. Pestañas *Emissions* 109

9.8. Ejercicios Propuestos 109

10. CONCLUSIONES 111

BIBLIOGRAFÍA 115

Apéndice 118

A. Anexo 1: Factores de emisión 119

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Diagrama de flujo del modelo REMIT 4

1.2. Promedio de emisiones contaminantes del parque vehicular 5

1.3. Perfil de emisiones de contaminantes del parque vehicular 5

1.4. Vista de participación en emisiones de contaminante 7

2.1. Relación entre el GDP y la posesión vehicular 12

2.2. Ejemplo de función tipo gompertz 14

2.3. Modelos de proyección de población para el Gran Santiago 16

2.4. Serie de tiempo del GDP per cápita 17

2.5. Serie de tiempo ajustada al GDP per cápita del FMI 18

2.6. Evolución de los vehículos cada 1.000 habitantes en el Gran Santiago 19

2.7. Vehículos cada 1.000 habitantes en función de la saturación del parque 21

2.8. Proyección parque vehículos particulares Gran Santiago en función del nivel de saturación 22

2.9. Descomposición aditiva de series de tiempo 25

2.10. Tendencias del parque de buses, minibuses, camiones y taxis 28

2.11. Variaciones aleatorias parque de buses, minibuses, camiones y taxis 30

2.12. Proyección parque de buses, minibuses, camiones y taxis 31

3.1. Decrecimiento parque vehículos particulares bencineros para normativas no-vigentes 37

3.2. Distribución del parque de vehículos particulares en función de su edad . . . 38

3.3. Distribución del parque de buses en función de su edad 39
3.4. Distribución del parque de camiones en función de su edad 39
3.5. Distribución del parque de taxis en función de su edad 40
3.6. Distribución de supervivencia Brasil. 41
3.7. Distribuciones de supervivencia 42
4.1. Evolución de la edad del parque vehicular del Gran Santiago en la simulación 47
4.2. Sensibilidad de la edad del parque frente a cambios en la distribucion de supervivencia 48
4.3. Evolución de la edad del parque vehicular nacional en la simulación 50
5.1. Kilometrajes totales acumulados en función de la edad del vehículo 55
5.2. Kilometrajes acumulados en función de la edad del vehículo 56
5.3. Kilometrajes acumulados ajustados en función de la edad del vehículo 57
5.4. Kilometrajes anuales ajustados en función de la edad del vehículo 57
5.5. Vehículos - kilómetros recorridos por vehículos particulares 59
5.6. Vehículos - kilómetros recorridos por buses y camiones 59
5.7. Vehículos - kilómetros recorridos por taxis 60
5.8. Variación porcentual de vehículos - kilómetros y del parque en la simulación . 60
6.1. Diagrama de flujo para elección metodología de cálculo 65
6.2. Emisiones de CO de vehículos particulares bencineros y diésel 69
6.3. Emisiones de CO de buses y camiones 71
6.4. Emisiones de CO de taxis 71

6.5. Emisiones totales de CO del parque vehicular. 72

6.6. Emisiones de NOx de vehículos particulares bencineros y diésel 73

6.7. Emisiones de NOx de buses y camiones 74

6.8. Emisiones de NOx de taxis 75

6.9. Emisiones totales de NOx del parque vehicular 76

6.10. Emisiones de PM2.5 de vehículos particulares bencineros y diésel 77

6.11. Emisiones de PM2.5 de buses y camiones 78

6.12. Emisiones de PM2.5 de taxis 79

6.13. Emisiones totales de PM2.5 del parque vehicular 80

7.1. Proyecciones de vehículos articulares (azul), buses (naranjo), camiones (morado) y taxis (amarillo) para Chile 83

7.2. Distribución de la edad del parque según tipo de vehículo para Chile 84

7.3. Kilometrajes acumulados en función de la edad y tipo de vehículo 85

7.4. Kilometrajes acumulados ajustados en función de la edad y tipo de vehículo . 85

7.5. Kilometrajes anuales ajustados en función de la edad y tipo de vehículo . . . 86

7.6. Niveles de actividad del parque ajustados 87

7.7. Consumo promedio de combustible del parque vehicular de los Estados Unidos en L/100Km 88

7.8. Litros de bencina, petróleo y gas consumidos por el parque nacional 90

7.9. Litros de bencina, petróleo y gas consumidos por el parque nacional según tipo de vehículo 90

7.10. Emisiones de CO_2 según tipo de vehículo 92

7.11. Litros consumidos por el parque en función del *Fuel Economics*. 93

7.12. Emisiones de CO_2 del parque en función del *Fuel Economics* 94

8.1. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para variaciones de crecimiento del parque vehicular 96

8.2. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para distintas penetraciones de vehículos particulares eléctricos 98

8.3. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para distintos escenarios de renovación del parque vehicular 100

8.4. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para distintos años de introducción de la normativa EURO VI 101

8.5. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha).. 104

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Valores de Parámetros Gompertz Según Nivel de Saturación 21

2.2. Resultados Modelo de Tendencia 27

2.3. Resultados Modelo de Variaciones Aleatorias 29

3.1. Fechas Inicio/Término Normativas EURO Vehículos Livianos Bencineros (Diésel) 34

3.2. Fechas Inicio/Término Normativas EURO Buses (Camiones) 35

3.3. Diferencias Porcentuales entre Bases del INE y MODEM. 35

3.4. Composición Según Combustible Utilizado del Parque Vehicular Base 38

3.5. Valores Parámetro β Distribución de Supervicencia según Tipo de Vehículo. . 42

4.1. Análisis de Sensibilidad de la Edad del Parque en Función de la Renovación del Parque 49

5.1. Observaciones Eliminadas según Criterios. 53

5.2. Niveles de Actividad del Parque Vehicular al Año 2010 61

5.3. Comparación entre Niveles de Actividad Estimados por SECTRA y el Modelo 62

6.1. Factores de Emisión para Vehículos Particulares con Motor de $1{,}400$ a $2{,}000cc$ en $[g/km]$ 67

7.1. Parque Vehicular Nacional según Tipo de Vehículo. 82

7.2. Valores Parámetro β para Distribución de Supervicencia según Tipo de Vehículo. 82

7.3. Valores de Consumo y Eficiencia de Combustible Promedio para el Año Base 89

7.4. Factores de Conversión σ_l de Combustión a Emisiones de CO_2 91

7.5. Comparación de Resultados de Estimaciones de CO_2 en Chile por Sector Transporte. 92

8.1. Variación Porcentuales en las Emisiones al Año 2036 para Distintas Variaciones del Crecimiento del Parque Vehicular 96

8.2. Variación Porcentuales en las Emisiones al Año 2036 para Distintas Penetraciones de Vehículos Eléctricos. 98

8.3. Valores del Parámetro β para cada Escenario por Tipo de Vehículo. 100

8.4. Emisiones de NOx y PM2.5 para Distintas Fechas de Introducción de Normativa EURO VI 102

8.5. Parámetros de los Escenarios Combinados 103

A.1. Factores de Emisión para Buses en $[g/km]$ 119

A.2. Factores de Emisión para Camiones en $[g/km]$ 119

RESUMEN

Esta tesis busca generar un modelo para estimar las emisiones de contaminantes provenientes del parque vehicular urbano a lo largo del tiempo. Un objetivo secundario es que el modelo sea realista, flexible y requiera la menor cantidad de información posible.

El modelo desarrollado consta de cuatro etapas. En la primera, se hacen proyecciones del parque vehicular para el período de evaluación y, utilizando su distribución etaria en el año base, se simula el proceso de envejecimiento del parque mediante una distribución de supervivencia bajo un modelo de flujo. Posteriormente, se determinan los patrones de uso vehicular y de ahí las emisiones del parque. En particular, para el caso de emisiones locales se detalla el proceso correspondiente al parque vehicular del Gran Santiago, y para el CO_2, se detalla el proceso a nivel nacional.

El total de vehículos particulares se proyecta mediante un modelo Gompertz. Se estima que el parque crecerá 100 % en un lapso de 22 años, llegando a los 3.000.000 de vehículos el año 2036. También se proyectan los totales de buses, camiones y taxis mediante modelos de series de tiempo. Se estima que los niveles de actividad del parque crecerán en 85 % en el caso de los vehículos particulares, mientras que los buses y taxis presentarán las menores variaciones.

Respecto a las emisiones, el modelo estima que la generación de CO, NOx y PM2.5 presentarán una tendencia a la baja, principalmente debido a las mejoras tecnológicas de buses y camiones. Respecto a las emisiones de CO_2, el modelo estima un alza de las mismas dentro de los próximos 20 años. Se evalúan diversos escenarios, destacando que el más atractivo para disminuir las emisiones es incentivar la participación de vehículos eléctricos.

Palabras Claves: Modelo Gompertz, flujos, emisiones, parque vehicular, Km recorridos.

ABSTRACT

The thesis, seeks to formulate a model to estimate the emission of pollutants generated overtime by an urban vehicle fleet. The model has to be realistic, flexible and require as little information as possible.

The model developed can be divided in four stages. In the first one, we project the vehicle fleet for the period of interest. Then, based on the age distribution of the fleet in the base year, a survival distribution is used to simulate the process of ageing of the vehicle fleet under a stock-flow model. Once the vehicle fleet is characterized for every cohort, the third stage consists in determining the vehicle's usage patterns. Finally, we estimate the generation of pollutants. In this thesis, we estimate the emission of local pollutants for Santiago de Chile, and CO_2 emissions for the entire Chilean vehicle fleet.

The total number of private cars is estimated by using a vehicle ownership model based on a Gompertz function. We estimate that the Santiago fleet will grow 100 % in 22 years, reaching 3.000.000 vehicles by 2036. The fleets of buses, lorries and taxis are estimated with time-series models. Private vehicle's activity levels - usage patterns - will grow 85 %, while the buses and taxi's activity levels will show the smallest variations overtime.

The model estimates that CO, NOx and PM2.5 emissions will decrease overtime due to the introductions of new emission standards, especially regarding the fleets of buses and lorries. Concerning CO_2 emissions, the model estimates that they will continue to grow for the next 20 years. Different scenarios are examined, being worth mentioning that the most attractive one in terms of emission reductions is to encourage the participation of electric vehicles.

Palabras Claves: Gompertz model, stock-flow model, emissions, vehicle fleet, activity levels.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se detallarán las metodologías llevadas a cabo para la construcción de un modelo que permite estimar las emisiones de contaminantes de un parque vehicular. Se busca, ante todo, modelar al evolución en el tiempo de las distintas componentes del parque vehicular, y mostrar de manera simple las tendencias que se desprenden de los avances tecnológicos en materias de emisiones.

1.1. Motivacion: La Relevancia de Cuantificar las Emisiones Vehiculares en Entornos Urbanos

La emisión de contaminantes por parte del mercado automotor es una de las principales externalidades a las que se enfrentan las ciudades. Esta tiene efectos tanto directos como indirectos, generando impactos tanto visuales como en la salud de los habitantes.

Tomemos el caso de Santiago de Chile. La ciudad se encuentra ubicada en una cuenca donde las condiciones de ventilación no son óptimas, por lo que los efectos de la contaminación son evidentes en períodos invernales. Todo esto ha llevado a las autoridades a generar distintas medidas regulatorias con el fin de minimizar los riesgos a la salud de los habitantes donde, dentro de las medidas, se cuenta el reciente proyecto de ley que busca imponer una restricción permanente a la circulación de vehículos cuya fecha de fabricación sea anterior al año 2012. En el último tiempo se han implementado otras medidas que buscan incentivar la adquisición de vehículos más ecológicos. Se destaca en este ámbito el pago del impuesto verde a vehículos nuevos.

Si bien con el tiempo la normativas de emisión vehicular vigente (normativa EURO, ECE, etc.) ha mejorado considerablemente las emisiones por kilómetro recorrido de los vehículos nuevos (COPERT, 2014), aún existe una alta preocupación por los vehículos antiguos que circulan por las urbes (de ahí la imposición de las restricciones vehiculares en Santiago).

Existen dos grandes focos a la hora de analizar la emisión de contaminantes generados por el parque vehicular:

- Tasa de crecimiento del parque vehicular, ya que sin importar qué tanto menos contaminen los vehículos nuevos respecto a los viejos, a mayor número de vehículos mayores serán las emisiones.
- Nivel de uso de los vehículos, sobretodo enfocado a aquellos con menores estándares en cuanto a contaminación.

1.2. Modelo Base: REMIT: Reducing EMissions In Transport

Uno de los precursores de esta tesis es la herramienta REMIT: Reducing EMissions In Transport, en adelante REMIT, generada por Huw Williams con fines pedagógicos (Williams, 2016). Este afirma que la contaminación ambiental es uno de los problemas más importantes del presente siglo, y que abordarlo íntegramente representa uno de los mayores desafíos a nivel mundial.

REMIT es, al día de hoy, un modelo de simulación que pretende estimar los perfiles de contaminación futuros dado un parque automotriz inherentemente dinámico. El modelo es útil tanto en términos pedagógicos como de planificación, dado su potencial para análisis de regulación de emisiones, restricción vehicular, imposición de estándares de emisiones de contaminantes a la importación vehículos nuevos, entre otras. Una de las principales ventajas del modelo es su alta adaptabilidad y la posibilidad de alterar parámetros a fin de analizar los efectos en las emisiones.

REMIT estima perfiles de emisión de contaminantes en función de la composición del parque vehicular. El parque vehicular puede variar en función de:

- su tasa de crecimiento
- su tasa de renovación
- estándares de emisión

- uso promedio de los vehículos (distancia recorrida)
- tasa de (de)crecimiento del uso vehicular

Los dos primeros ítems llevan a crear una distribución de ”supervivencia”de los vehículos, análogo a una tasa de crecimiento neta del número de vehículos. Dado esto, podría decirse que el modelo REMIT es, en esencia, un modelo de flujos de entrada y salida de vehículos con distintas características a un parque vehicular. De hecho, es recurrente encontrar estudios donde el parque vehicular es modelado mediante una estructura de flujos como, por ejemplo, el reciente trabajo de Fridstrom (2016).

1.2.1. Entradas y salidas de REMIT

REMIT recibe un parque vehicular que puede o no ser dinámico en el tiempo. A partir de patrones de comportamiento y de emisiones, calcula los perfiles temporales de emisiones a lo largo de la simulación. A continuación, se detallan las entradas y salidas específicas de la simulación de REMIT entregada por Williams (2016).

1.2.1.1. Diagrama de flujo de REMIT

Williams (2016), en su descripción del modelo, presenta un diagrama de flujo que permite visualizar las diferentes etapas asociadas a la estimación de los perfiles de emisiones (ver Figura 1.1).

1.2.1.2. Entradas y salidas de la simulación

La simulación entregada por REMIT es muy simple. En particular, se simula un período de 30 años, considerando un parque compuesto 2.000 vehículos de un único tipo, donde se modelan las emisiones de un contaminante genérico año a año.

En la simulación, durante los primeros tres años los vehículos emiten una cantidad de 1 [unidad/vehículo-km] de contaminante. Luego, a partir del cuarto año, se comienza

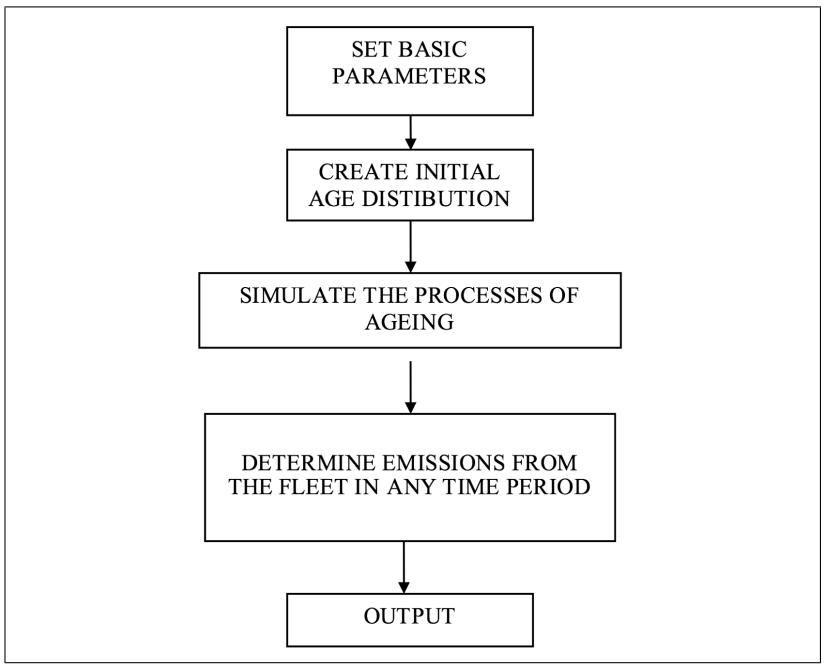

Figura 1.1. Diagrama de flujo del modelo REMIT
Fuente: Williams (2016)

a exigir un estándar de contaminación equivalente a 0,11[unidades/vehículo-km] lo cual causa paulatinas reducciones de contaminantes a lo largo del tiempo. Dado que a partir del cuarto año los vehículos que ingresen al parque contaminarán menos, las emisiones promedio del parque se verán disminuidas. Estas reducciones se observan en la Figura 1.2.

Por otro lado, el perfil de emisiones a lo largo del tiempo es el de la Figura 1.3. Notar que las emisiones aumentan, dado que entre los años 0 y 2 ingresan vehículos que contaminan más.

1.2.2. Observaciones sobre el modelo actual

Claramente REMIT constituye una herramienta con alto potencial educativo. Permite, con cierto grado de simpleza, mostrar a no entendidos los efectos de políticas tecnológicas más exigentes sobre las emisiones. Permite también mostrar como los patrones del uso vehicular influyen también en las mismas, entre otras cosas.

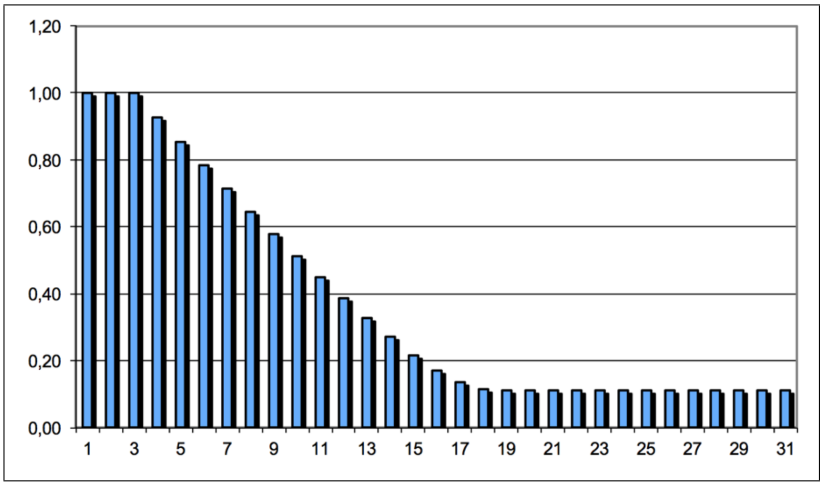

Figura 1.2. Promedio de emisiones contaminantes del parque vehicular
Fuente: Williams (2016)

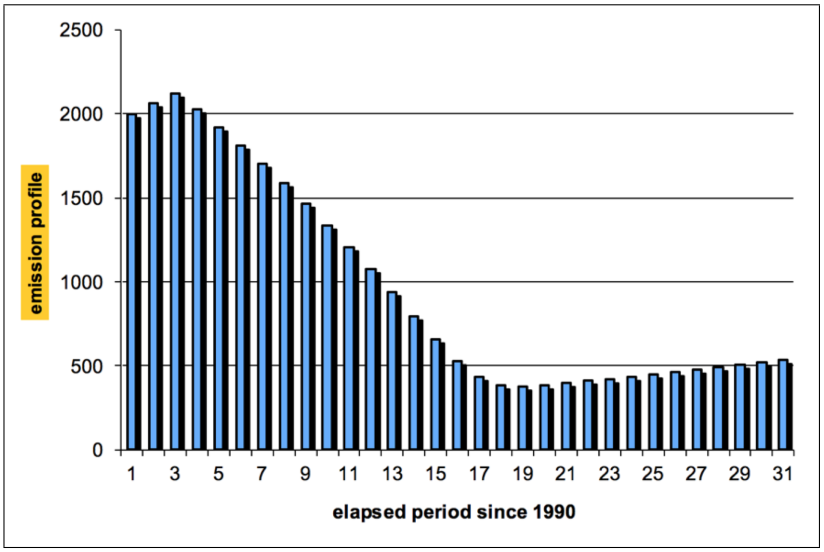

Figura 1.3. Perfil de emisiones de contaminantes del parque vehicular
Fuente: Williams (2016)

Sin embargo, este modelo - dada su evidente simpleza - no representa la situación actual de las ciudades (o de cualquier urbe). Se sabe que los vehículos emiten múltiples contaminantes, y que claramente esto dependerá de las características físicas y tecnológicas de cada tipo de vehículo.

1.3. Extensiones al Modelo

En vista de lo anterior, queda claro que REMIT tiene un enorme potencial gráfico a la hora de analizar qué consecuencias tendría una cierta medida en las emisiones de contaminantes. Sin embargo, este potencial se ve afectado por su extrema simplicidad. Por esto se propone una serie de extensiones al mismo, de las cuales algunas serán incluidas en el modelo urbano de emisiones.

1.3.1. Tipos de contaminantes

El actual modelo analiza las emisiones de un contaminante genérico, lo cual obviamente no se adapta a la realidad. Actualmente, uno de los estándares de contaminación más reconocidos es la normativa EURO. Esta se refiere a la emisión de contaminantes locales que pueden generar efectos nocivos en la población. Resulta de alto interés introducir en el modelo las emisiones de contaminantes tales como: material particulado ($MP_{2,5}$ y MP_{10}), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos ($HC's$), dióxido de carbono (CO_2), etc.

Las emisiones de estos contaminantes, por kilómetro recorrido, variarán en función de las características tecnológicas de los vehículos, las cuales están asociadas directamente a la fecha de fabricación de cada vehículo.

1.3.2. Composición del parque vehicular

El parque vehicular en cualquier ciudad está compuesto por distintos tipos de vehículos, que tienen estándares de emisiones diferentes. Se propone introducir al nuevo modelo una distinción entre vehículos:

- Livianos (Automóviles particulares, Camionetas, Furgones, Motos, etc.)
- Pesados (Camión simple, Tractocamiones, etc.)
- Locomoción Colectiva (Buses y Taxis)

Dentro de esta distinción, se espera analizar también los estándares de emisión de contaminantes según el tipo de combustible utilizado: bencina, diésel, gas y eléctricidad. Resulta interesante poder visualizar, para cada tipo de vehículo, su cuota de participación en cuanto a emisión de contaminantes a lo largo del tiempo. La Figura 1.4 muestra una vista que ilustra lo anteriormente mencionado. En efecto, el área entre la curva negra y la curva naranja correspondería a la participación de vehículos pesados, entre la curva azul y naranja la de los vehículos livianos, y el resto para las motos, en este ejemplo.

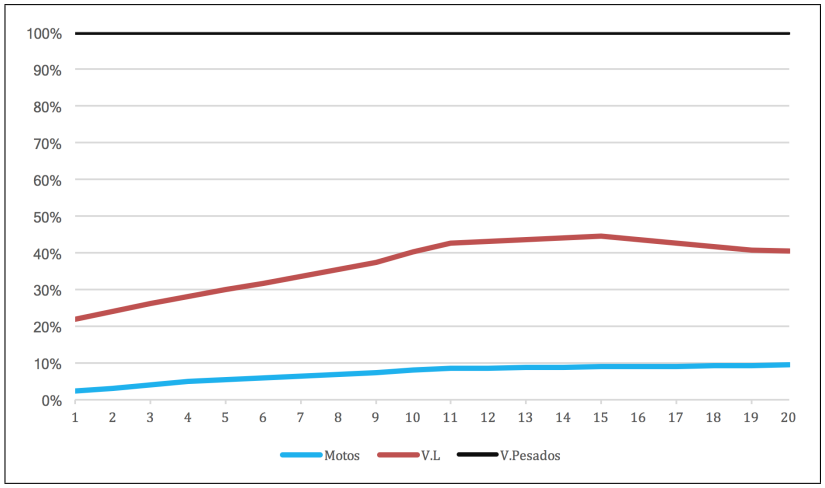

Figura 1.4. Vista de participación en emisiones de contaminante

1.3.3. Dinámica del parque vehicular

En el modelo REMIT original se asumen crecimientos y renovaciones del parque constantes. Se espera introducir al nuevo modelo una tasa de crecimiento y de renovación que varíe a lo largo del tiempo de acuerdo a tendencias históricas observadas. En particular, parece interesante estimar, mediante el uso de modelos econométricos, estas tasas en función de indicadores de crecimiento económico (GDP per cápita, IMACEC, etc.) y demográficos.

Se esperaría, por ejemplo, que el número de vehículos de locomoción colectiva tenga mayor relación con indicadores tales como la población anual o las variaciones de ésta en

los últimos años, mientras que el parque de camiones debiera verse ligado a indicadores de tipo económico, como la variación del GDP.

1.3.4. Uso vehicular

Hay dos temas asociados al uso de un vehículo. Primero, el kilmetraje anual recorrido de un vehículo debiese depender de su edad; así, sería esperable que un vehículo más antiguo recorra menores distancias que uno más nuevo. Segundo, el kilometraje anual debería también depender del tipo de vehículo; así, se espera que buses, camiones y taxis recorran distancias mayores a los vehículos particulares.

1.3.5. Políticas públicas

Dada la reciente adopción de la restricción vehicular a vehículos catalíticos en invierno en Santiago, resulta de gran interés analizar la posibilidad de observar los impactos en cuanto a emisión de contaminantes frente a la adopción de políticas restrictivas al uso de los vehículos, o bien respecto a normativas relacionadas con la importación de vehículos nuevos. Sería interesante analizar, además, los efectos que podría tener el modificar la entrada en marcha de la normativa EURO VI en Chile, o bien analizar los impactos que tendría promover la venta de vehículos diésel.

1.4. Objetivos

Los principales objetivos de esta tesis son:

- Desarrollar un modelo que permita proyectar las emisiones del parque vehicular en un horizonte de mediano a largo plazo.
- Formular el modelo de la forma más simple posible - pero realista - con el fin de poder aplicarlo a distintas realidades con los menores requerimientos de información posibles.

- Generar una herramienta de fácil manipulación, con alto potencial pedagógico, que permita a usuarios experimentar con distintos escenarios y sus efectos en las emisiones.
- Evidenciar los pronósticos en términos de emisiones para las principales ciudades objeto de estudio del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (en adelante CEDEUS): Copiapó, Coquimbo - La Serena, Gran Santiago, Gran Concepción, Temuco - Padre Las Casas y Valdivia.

1.5. Estructura de la Tesis

Para cumplir los objetivos anteriormente planteados, se deben realizar múltiples etapas previas. En particular, para calcular las emisiones, previamente se debe tener conocimiento de los veh-km recorridos por el parque, y esto requiere, a su vez, tener caracterizado el parque en cada año de la simulación.

Dado lo anterior, la primera etapa de este estudio se refiere a las proyecciones de los totales vehiculares en cada una de las ciudades analizadas. En particular, se estimará el número de vehículos particulares, buses, camiones y taxis desde los años 2014 a 2036 utilizando los datos del Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (en adelante INE). Para los vehículos particulares se ajustará un modelo ampliamente utilizado en la literatura consistente en curvas tipo Gompertz (ver, por ejemplo, Dargay et al. (2007)). Para el resto de los vehículos, se ajustarán modelos de regresión basados en series de tiempo.

Luego de obtener los totales según tipo de vehículo, se procederá a determinar la composición del parque según sus características tecnológicas. Esto es, del total de vehículos particulares, buses, camiones y taxis, se procederá a determinar cuántos de ellos cumplen - o no - con las normativas EURO I, II, III, IV, V y VI. Los datos utilizados en esta parte del proceso provenienen del INE y se utilizaron en el proyecto de Actualización de Perfiles de Flujos del Modelo MODEM para el Gran Santiago y Regiones (MODEM, 2010).

Con los dos puntos anteriores, se logrará un conocimiento acabado de la cantidad de vehículos según tipo y características tecnológicas en cada una de las ciudades analizadas. La siguiente etapa considera la estimación de los patrones del uso de cada tipo de vehículo. En esta parte, se utilizarán datos provenientes de las Plantas de Revisión Técnicas (en adelante PRT) donde, a partir del año 2011, se comenzaron a registrar los kilometrajes totales de cada vehículo. Con estos kilometrajes se procederá a ajustar un modelo que permita estimar el kilometraje anual recorrido por cada tipo de vehículo en función de su edad y, con ello, se podrán calcular los veh-km recorridos por el parque en cada año de la simulación. Con los datos anteriores se procederá también a analizar cómo varía la edad promedio del parque.

La última etapa consiste en calcular las emisiones vehiculares. Para ello, se utilizarán los factores de emisiones promedio empleados en el modelo MODEM (2010), los cuales provienen del modelo COPERT (2014).

2. PROYECCIÓN DE TOTALES VEHICULARES

En el siguiente capítulo se detalla las metodología seguida para proyectar los totales vehiculares de las ciudades CEDEUS. Estos totales se separan en dos partes: por un lado, vehículos particulares y, por otro, camiones, buses y taxis.

2.1. Modelo Gompertz para Vehículos Particulares

El primer acercamiento a modelar el parque vehicular de una ciudad consiste en analizar la relación existente entre la población y la cantidad de vehículos en la ciudad. Sería esperable observar que, a mayor población, mayor sea la cantidad de vehículos en circulación. Esta relación es prácticamente trivial: el automóvil constituye un bien material de tipo aspiracional, donde existen estudios que afirman que las familias tendrán un vehículo apenas su situación económica se los permita (Zegras, 2010).

No es mayor misterio que el desarrollo de la economía produce impactos en la demanda por transporte y, con ello, impactos en la demanda por uso del auto; logicamente, esto debiera afectar, a su vez, el parque de vehículos particulares. A medida que se evidencian mejorías y crecimientos económicos, no es raro observar mayor cantidad de vehículos cada 1.000 habitantes. Por ejemplo, Dargay et al. (2007) señala que, de una muestra de 45 países donde en promedio el GDP per cápita ha aumentado de US3.400 a US8.600 entre 1960 y 2002, la cantidad de vehículos cada 1.000 habitantes aumentó de 53 a 166. De hecho, Wu et al. (2014) muestra la relación creciente existente entre el desarrollo económico (GDP per cápita) y la posesión vehicular (ver Figura 2.1).

Resulta destacable que la muestra utilizada por Dargay et al. (2007) toma en cuenta naciones de todo el mundo. Entre ellas Canadá, EE.UU., México, Chile, Argentina, Ecuador, Alemania, Bélgica, Francia, España, Australia, Japón, China e India, entre otros.

Sin embargo, la relación existente entre ambas variables no es lineal (tal como se aprecia en la ilustración anterior). Por ende, resulta relevante buscar la mejor forma funcional

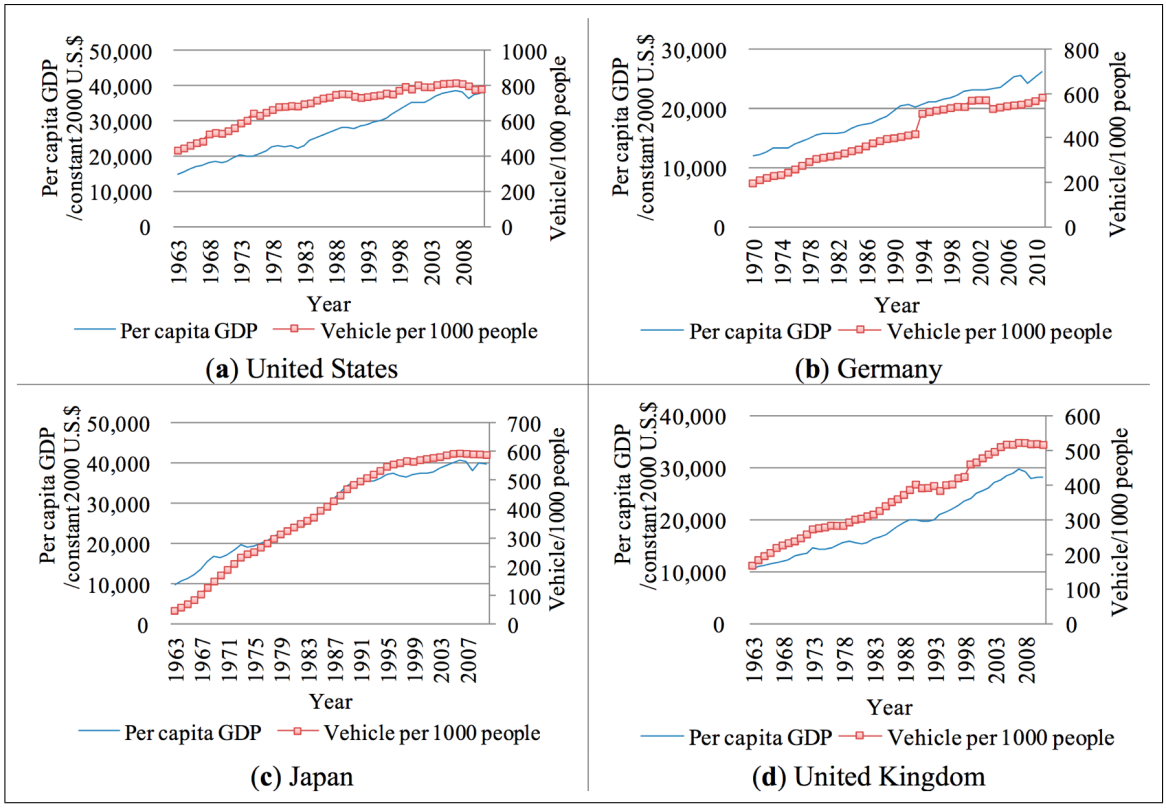

Figura 2.1. Relación entre el GDP y la posesión vehicular
Fuente: Wu et al. (2014)

que permita modelar la posesión vehicular tomando en cuenta factores económicos (GDP) y factores de tipo demográfico (población).

Para ajustar una curva que explique la posesión vehicular en función de indicadores económicos, se debe tener en consideración dos elementos:

- Aunque el parque vehicular crezca en el tiempo, se debiera llegar a un nivel de saturación natural (Ortúzar y Willumsen (2011), sección 15.3).
- Se debe utilizar un modelo cuya forma funcional haya sido probada previamente.

Dadas estas consideraciones, aparecen varios modelos posibles (Dargay et al., 2007); curvas Logísticas, de Gompertz, Logarítmicas, Cumulativas Normales, etc. De todas las

anteriores, se decidió adaptar la curva de tipo Gompertz, dadas las siguientes ventajas respecto de los otros tipos de curvas (Dargay et al., 2007):

- Permite ajustar fácilmente un nivel de saturación del parque.
- Posee mayor flexibilidad en el ajuste de las tasas de crecimiento del parque frente a otros tipos de curvas.
- Su estimación es más sencilla de realizar dada su log-linearización.

2.1.1. Marco teórico

Una curva de tipo Gompertz tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{y}{y_0} = e^{\alpha e^{-\beta x}} \tag{2.1}$$

En que y es la variable dependiente que se busca modelar, x es una variable explicativa o independiente, y α y β son los parámetros de la curva que se buscan ajustar.

En nuestro caso, buscamos modelar la cantidad de vehículos cada 1.000 habitantes, V_t, para el año t, en función del nivel de saturación del parque, S. La variable explicativa en este caso será el GDP Per Cápita, al igual que en los estudios realizados por Dargay et al. (2007) y Wu et al. (2014). Así, la ecuación del modelo se transforma en:

$$\frac{V_t}{S} = e^{-\alpha e^{\beta GDP_t}} \tag{2.2}$$

Para simplificar el análisis, esta ecuación puede log-linearizarse, obteniendo la ecuación (2.3).

$$ln\frac{V_t}{S} = -\alpha e^{\beta GDP_t} \tag{2.3}$$

y, tomando nuevamente logaritmo se obtiene;

$$ln(ln\frac{V_t}{S}) = ln(-\alpha) + \beta GDP_t \tag{2.4}$$

que es una ecuación de tipo lineal, cuyos parámetros pueden ser estimados mediante regresión lineal. Un ejemplo de curva Gompertz ajustada para un nivel de saturación de 500 vehículos cada 1.000 habitantes tiene la forma que se muestra en la Figura 2.2.

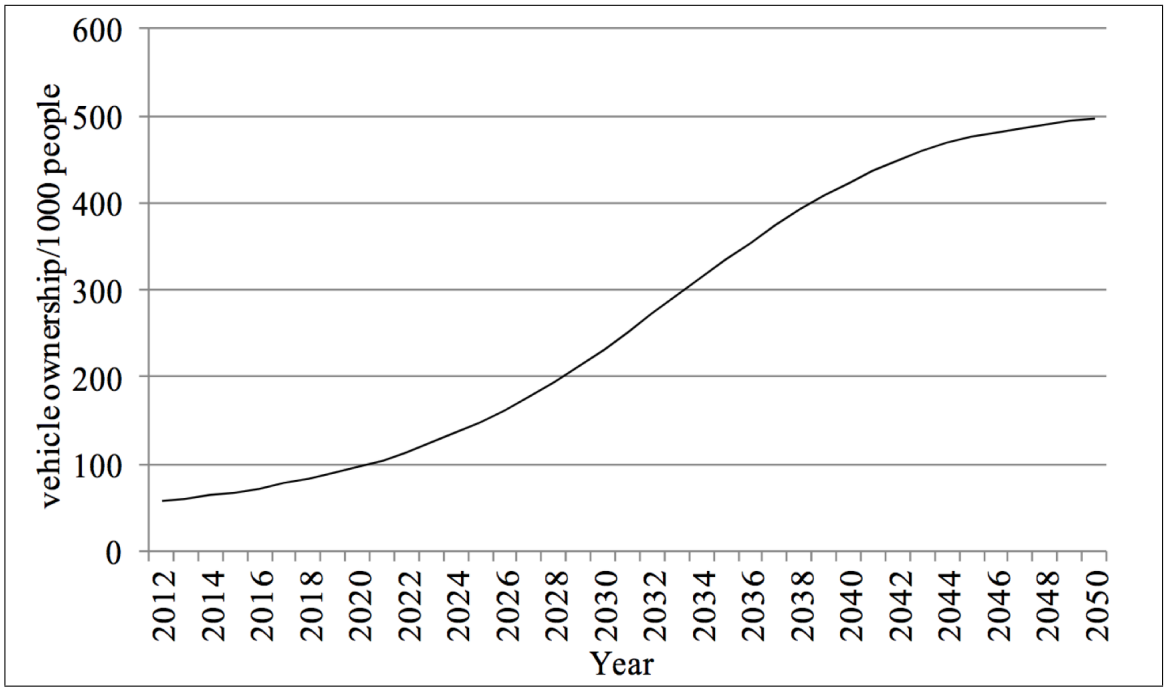

Figura 2.2. Ejemplo de función tipo gompertz
Fuente: Wu et al. (2014)

2.1.2. Necesidades de información

Para estimar el modelo anterior, se requiere información sobre las siguientes variables; población, $P_{i,t}$, número de vehículos, $X_{i,t}$, GDP per cápita, GDP_t y el nivel de saturación del parque vehicular, S_i.

Solo a modo de aclaración, el indicador de vehículos cada 1.000 habitantes se construye mediante la siguiente relación:

$$V_{i,t} = \frac{X_{i,t}}{\frac{P_{i,t}}{1{,}000}} \tag{2.5}$$

Para obtener los datos de población se utilizan información del INE junto con sus proyecciones de población al año 2020 (teniendo en cuenta también las proyecciones al año 2050 estimadas con datos demográficos al año 2002). Para el número de vehículos se utilizan los Informes de Vehículos Motorizados en Circulación (INE, 2016b) de los años 2002 al año 2015. Notamos que estos últimos resúmenes se confeccionan mediante el registro de permisos de circulación, los que se obtienen a nivel municipal en Chile.

El nivel de saturación del parque en Chile es a priori desconocido. Para tener una idea, es interesante notar que Dargay et al. (2007) estipulan que el nivel de saturación del parque a nivel nacional es de 810 vehículos cada 1.000 habitantes; no obstante, en un estudio anterior, Dargay y Gately (2001) indican que este nivel ascendía a 890 vehículos cada 1.000 habitantes. De hecho, en el estudio de 2007, se indica que habrá 544 vehículos cada 1.000 habitantes en Chile al año 2030. Mayores detalles sobre este índice se encontrarán más adelante.

2.1.2.1. Proyecciones de población mediante proyecciones del INE

Para poder estimar los parámetros de la curva Gompertz se debe, ante todo, proyectar la población de las ciudades a lo largo del período de simulación. En particular se busca contar con datos de población desde los años 2014 a 2036.

Para el Gran Santiago, se tomó en cuenta todas las comunas pertenecientes a la provincia de Santiago y la provincia de Cordillera. Para el Gran Concepción se consideraron las comunas de Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualpén, Hualqui, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Talcahuano y Tomé.

Para el resto de las ciudades CEDEUS, se consideró únicamente las comunas homónimas. En base a las proyecciones del INE (2016a), se estimó en primer lugar un modelo

para proyectar la población futura del Gran Santiago. En particular, se ajustó una curva de tipo cuadrática arrojando como resultado el siguiente modelo:

$$Poblacion_{GranSantiago,t} = 372,08t^2 + 1,43t + 1,37{,}10^9$$
$$R^2 = 0,9997 \tag{2.6}$$

De esta forma, las proyecciones de población según el modelo se muestran en la Figura 2.3.

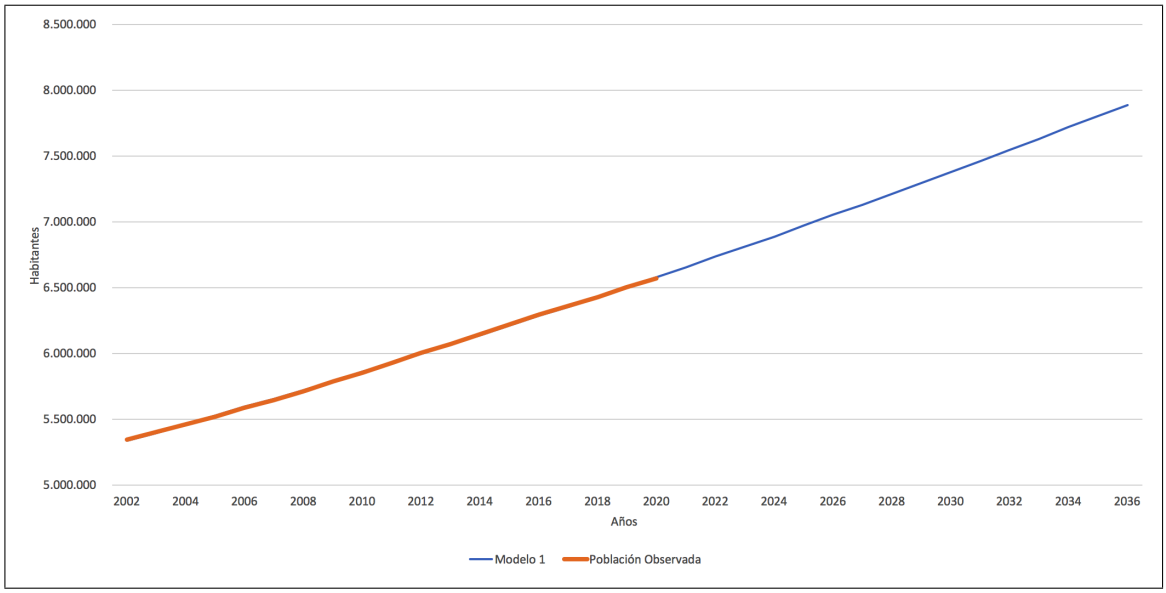

Figura 2.3. Modelos de proyección de población para el Gran Santiago

Se puede apreciar que la población del Gran Santiago se encuentra bajo un fuerte crecimiento, y el modelo estima que la ciudad alcanzará los 7,8 millones de habitantes el año 2036. Los modelos ajustados para las demás ciudades se encuentran en el Anexo digital.

2.1.2.2. Proyecciones del GDP per cápita con datos del FMI

Otra variable clave para el análisis consiste en el GDP per cápita. Los datos que se utilizaron corresponden a los proveídos por el Fondo Monetario Internacional - en adelante FMI o IMF - organismo que analiza periódicamente datos e información con el fin de proyectar múltiples variables hacia el futuro.

En este caso, los datos del FMI (2016) sobre el GDP per cápita por poder adquisitivo (PPP) para Chile se obtuvieron desde el año 1980 al año 2021. En la Figura 2.4 se pueden observar los valores anuales de dicho indicador económico.

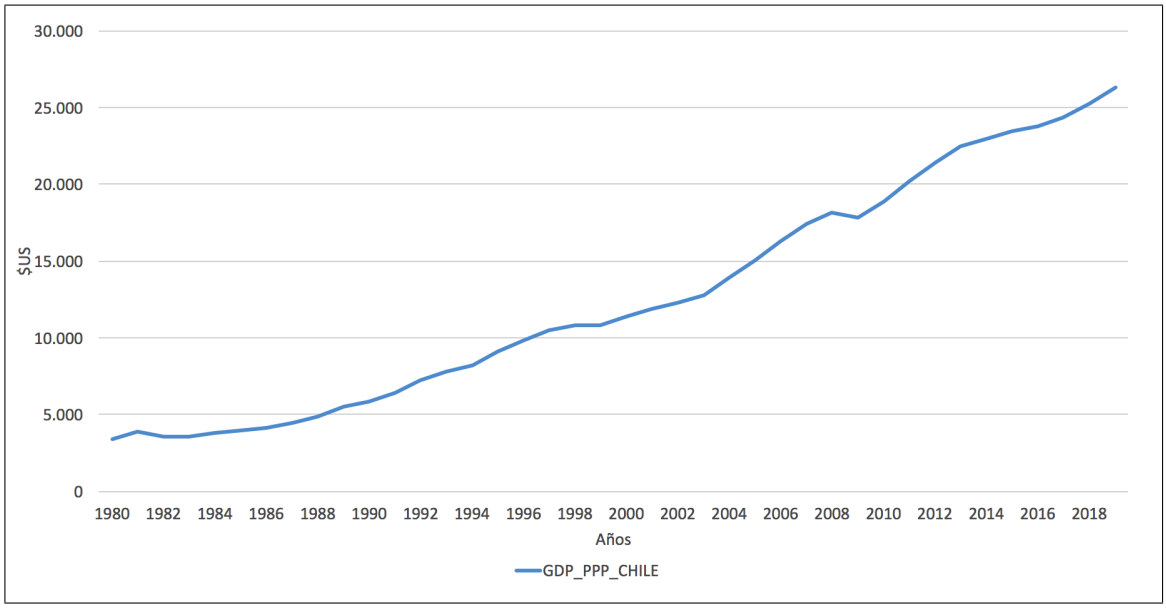

Figura 2.4. Serie de tiempo del GDP per cápita
Fuente: FMI (2016)

Considerando que estos valores corresponden a una serie de tiempo, a fin de desestacionalizar los valores (mayores detalles revisar apartado 2.2), se suavizó la curva mediante la consideración de promedios pre y post temporales. Una vez suavizada, se procedió a ajustar una curva con el fin de proyectar dichos valores al año 2036. La curva suavizada del GDP per cápita de Chile, así como la tendencia ajustada, se pueden observar en la figura 2.5. La tendencia ajustada está dada por la ecuación (2.7).

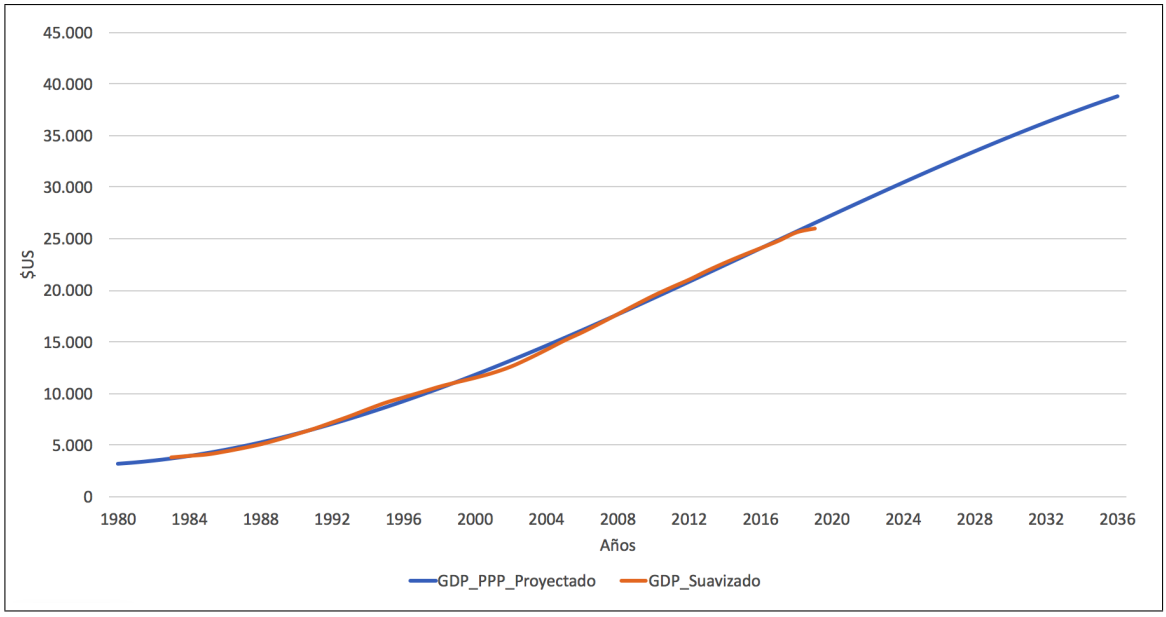

Figura 2.5. Serie de tiempo ajustada al GDP per cápita del FMI

$$GDP_{PerCapita,t} = -0,18t^3 + 1{,}093,82t^2 - 2{,}204{,}165,82t + 1{,}480{,}022{,}270$$
$$R^2 = 0,9985 \tag{2.7}$$

2.1.3. Nivel de saturación del parque vehicular

Como se mencionó anteriormente, el nivel de saturación del parque vehicular es desconocido. Existen diversos estudios que tienen como fin determinar este valor, pero todos indican valores distintos. Por ejemplo, Dargay et al. (2007) y Dargay y Gately (2001) sugieren valores distintos para el caso de Chile; 810 vehículos cada 1.000 habitantes en el estudio de 2007 y 890 vehículos cada 1.000 habitantes habitantes en el de 2001.

Los valores entregados por estos estudios consideran el nivel de saturación del parque vehicular chileno, esto es, considerando tanto ambientes rurales como entornos urbanos. Dada la infraestructura de transporte público de Santiago; Transantiago, Taxis y Colectivos, y el notablemente más fácil acceso a bienes y servicios, se esperaría que el nivel de

saturación fuese más bajo en Santiago que a nivel nacional. Así, surge la pregunta ¿qué nivel de saturación usar para el parque vehicular del Gran Santiago?.

Un primer enfoque para analizar hasta qué valor podría llegar el índice de vehículos cada 1.000 habitantes, consiste en analizar la evolución de este con los datos actualmente disponibles. Los Informes de Vehículos Motorizados del INE (2016b) nos permiten saber con exactitud cuántos vehículos particulares hubo en el Gran Santiago desde los años 2002 al 2015. Considerando además los datos de la población - también del INE - es posible estimar este índice. Su evolución durante estos años se muestra en la Figura 2.6.

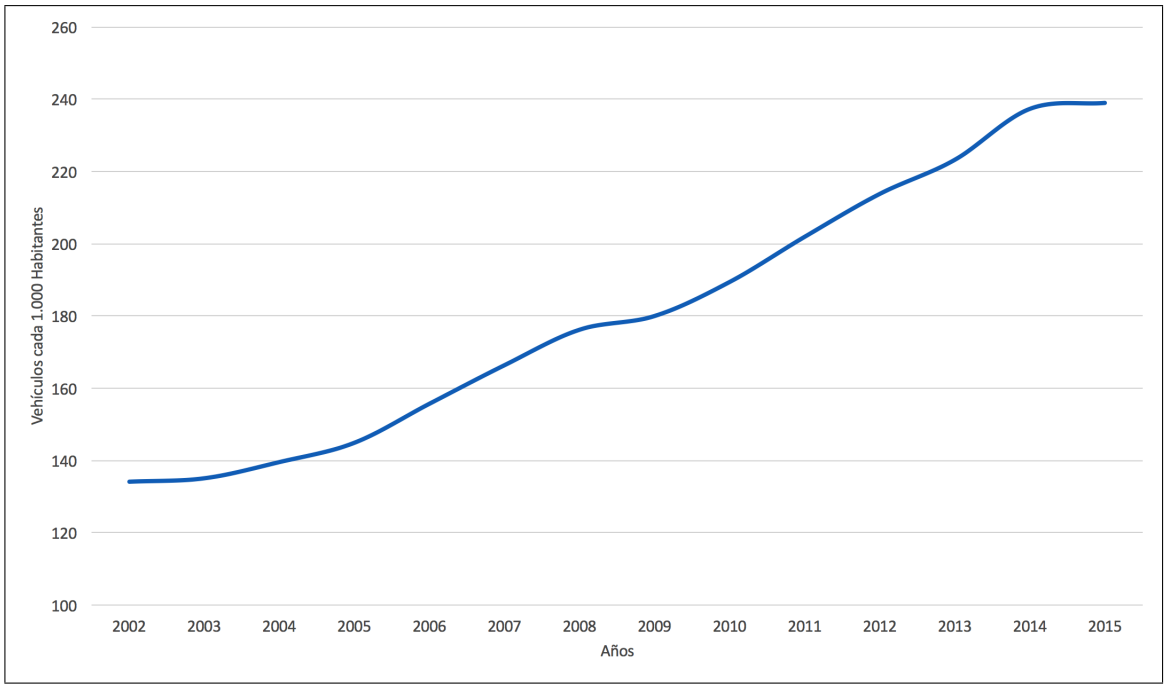

Figura 2.6. Evolución de los vehículos cada 1.000 habitantes en el Gran Santiago

Se aprecia claramente que el índice ha aumentado su valor en cerca de un 78 % en 11 años (2003 - 2014). El aplanamiento del año 2015 no constituye necesariamente un nivel de saturación. De hecho, si se observa con atención, durante el año 2008 - 2009 se observa una situación análoga. Coincidentemente, ambos achatamientos se dan en períodos de recesión económica mundial.

Ahora, para saber cuál podría ser el nivel de saturación bajo un crecimiento constante, se proyecta este índice bajo el crecimiento observado en la Figura 2.6. Si todo se mantiene constante, es decir, sin incluir el efecto de la saturación, se obtiene un valor del índice de 437 vehículos cada 1.000 habitantes habitantes.

Tomando en cuenta que la literatura sugiere valores superiores a 800 vehículos cada 1.000 habitantes para el país, se decide realizar el presente análisis bajo distintos niveles de saturación. Tomando en cuenta que, dado el crecimiento actual el año 2036 este indicador tendrá un valor de 437, estimar la curva Gompertz con valores de 500, 600, 700 y 800 vehículos cada 1.000 habitantes no debiese causar mayores diferencias (puesto que se está asumiendo que en Chile aún no hemos alcanzado realmente la saturación de la curva Gompertz). En el fondo se está proponiendo realizar un análisis de sensibilidad sobre este valor y analizar las implicancias de variar este parámetro.

2.1.4. Resolución mediante regresión lineal y resultados

Retomando lo presentado en el marco teórico, la ecuación a considerar en el modelo de regresión lineal es la (2.8);

$$ln(ln\frac{V_t}{S}) = ln(-\alpha) + \beta GDP_t \tag{2.8}$$

donde las únicas incógnitas son los valores de α y β . Los valores obtenidos de los parámetros en las regresiones, para cada nivel de saturación probado, se muestran en la Tabla 2.1. Con los valores de ésta, queda definida la forma de la curva Gompertz. Con esto se puede estimar, para cada año, la cantidad de vehículos cada 1.000 habitantes. Las curvas estimadas se presentan en la figura 2.7.

Tabla 2.1. Valores de Parámetros Gompertz Según Nivel de Saturación

Nivel de Saturación	800	700	600	500
$ln(-\alpha)$	1,168	1,150	-1,139	-1,147
Test - t	53,1	46,5	39,2	31,2
β	-4,25*10^{-5}	-4,68*10^{-5}	-5,29*10^{-5}	-5,29*10^{-5}
Test - t	-35,5	-34,6	-33,4	-31,3
R^2 Ajustado	0,991	0,990	0,989	0,988

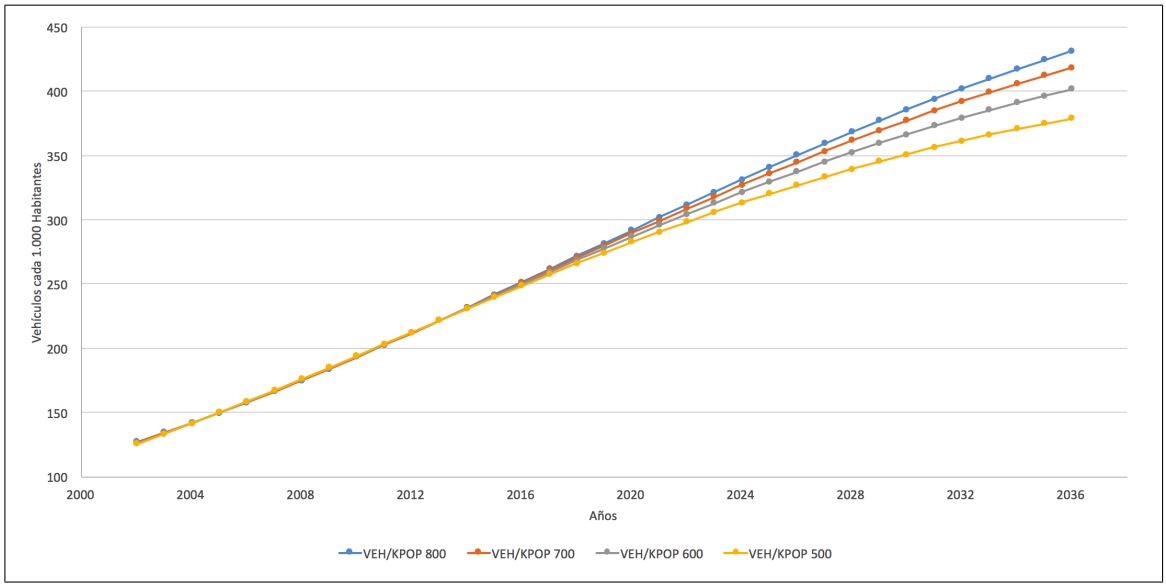

Figura 2.7. Vehículos cada $1{,}000$ habitantes en función de la saturación del parque

Como se puede ver, para los primeros 18 años (de 2002 a 2020) los valores ajustados no difieren en demasía. Sin embargo, a partir del año 2020 se comienzan a apreciar ligeras diferencias entre las curvas. La mayor diferencia($13,8\,\%$ entre las saturaciones extremas) se da en el año 2036. Con estas curvas se procedió a determinar el número de vehículos particulares mediante la ecuación (2.9).

$$X_{i,t} = \frac{V_{i,t}}{1{,}000} P_t \tag{2.9}$$

Con los valores del índice de vehículos cada 1.000 habitantes y la ecuación anterior, se puede calcular la cantidad de vehículos particulares en el parque para cada nivel de saturación. Los resultados se muestran en la Figura 2.8.

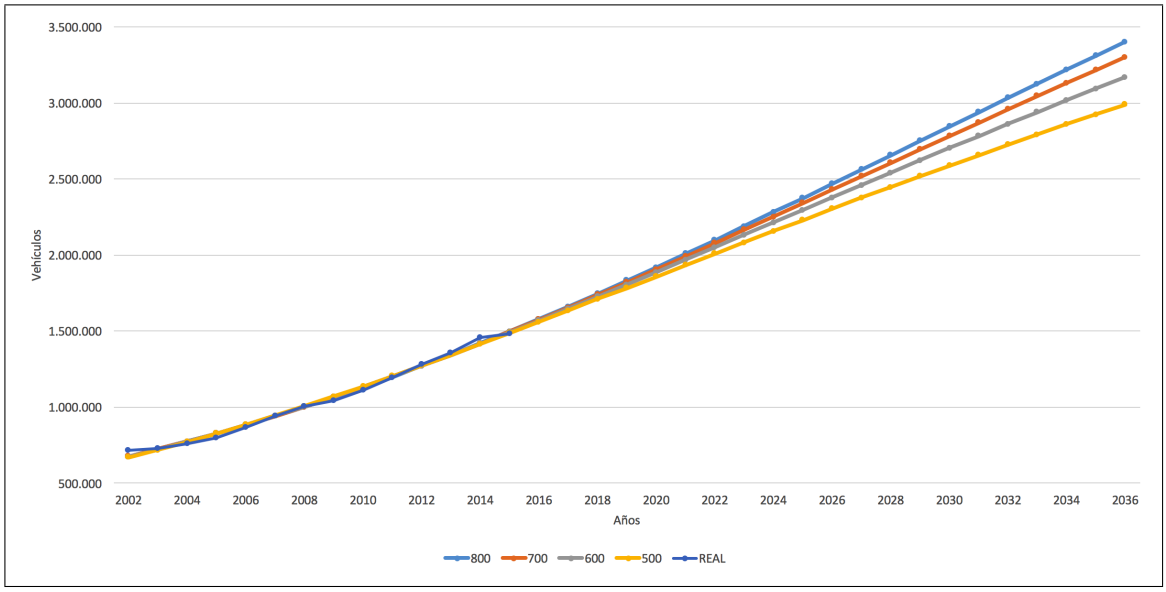

Figura 2.8. Proyección parque vehículos particulares Gran Santiago en función del nivel de saturación

Se observa que las diferencias porcentuales entre las curvas, en este caso, se mantienen respecto de las mostradas anteriormente en la Figura 2.7. Es decir, la diferencia en el número de vehículos particulares estimados al año 2036 entre un nivel de saturación de 500 y 800 vehículos cada 1.000 habitantes es de solo $13,8\,\%$. Estos distintos niveles de crecimiento del parque vehicular nos permitirán realizar un análisis para múltiples escenarios, pudiendo así estimar las emisiones del parque en situaciones de alto y bajo crecimiento.

2.2. Modelación de Parque de Buses, Camiones y Taxis Mediante Series de Tiempo

En esta sección se modelarán las proyecciones del parque de buses, camiones, minibuses y taxis del Gran Santiago. En este apartado es relevante destacar que no se utilizará modelos de tipo Gompertz puesto que este tipo de vehículos son de uso comercial y/o público. Por lo tanto, están ligados de otra forma con el crecimiento del ingreso o la población y no necesariamente seguirán la forma definida por el modelo estimado anteriormente. De hecho, se dejará libre la forma, estimando el modelo únicamente bajo el apercibimiento que los datos correspondan en efecto a datos de una serie de tiempo.

2.2.1. Datos utilizados

La información utilizada en este caso es la siguiente:

- Parque de buses, camiones, minibuses y taxis obtenida a partir de los informes anuales que publica el INE.
- Proyecciones del GDP per cápita de Chile del capítulo anterior.
- Proyecciones de la población del Gran Santiago del capítulo anterior.

Se espera, a priori, que el parque de vehículos relacionados con transporte de pasajeros sea principalmente explicado por variables de población. En cambio, se espera que el parque de camiones tenga mayor relación con indicadores económicos tales como el GDP.

2.2.2. Marco teórico del tratamiento de series de tiempo

Los datos pertenecientes a una serie de tiempo pueden tener la particularidad de no cumplir el supuesto de independencia entre observaciones (Guajarati y Porter, 2010). Es decir, usualmente los valores de una serie de tiempo observados en el instante t no son independientes del valor observado en el instante $t + 1$.

Consideremos, por ejemplo, las siguientes observaciones del número de camiones entre los años 2014 a 2016:

- 35.000 camiones en circulación el año 2014
- 36.250 camiones en circulación el año 2015
- 37.000 camiones en circulación el año 2016

Claramente el valor correspondiente al año 2014 condicionará fuertemente el número de camiones de los dos años siguientes. De hecho, resulta trivial pensar que el número de camiones en circulación en las siguientes observaciones tendrá como base el número del primer año, por lo que lo relevante a predecir y/o analizar es la variación a partir de aquella base. Esta variación, de un año a otro, se puede separar en distintos efectos: uno asociado a la tendencia anual (de crecimiento o decrecimiento) y otro atribuible a variables que interactúan en el sistema.

Así, para proyectar parque de buses, camiones, minibuses y taxis, se deben estimar dos modelos. Uno debe determinar la tendencia a lo largo de los años, y el otro debe ser capaz de explicar las variaciones no atribuibles a la tendencia de acuerdo a alguna variable externa (también aislada en tendencia si corresponde a una serie de tiempo). Por ello, se debe primero que todo transformar la serie en un proceso estacionario en tendencia. Luego, se deben aislar posibles estacionalidades y finalmente modelar las variaciones externas. En resumen, se debe descomponer la serie de tiempo en tres partes:

- Tendencia
- Estacionalidad
- Efectos aleatorioa

La Figura 2.9 muestra gráficamente a qué parte de una serie de tiempo corresponde cada parte.

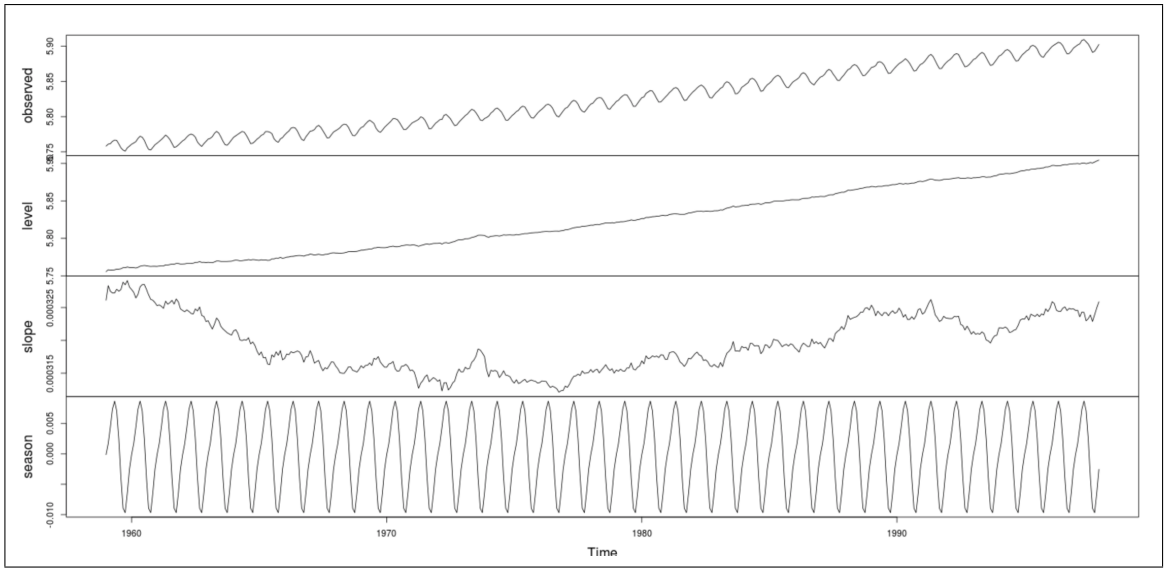

Figura 2.9. Descomposición aditiva de series de tiempo
Fuente: RDataMining (2016)

De no modelar la tendencia en forma separada - es decir, al modelar una serie de tiempo mediante otra variable correspondiente también a una serie de tiempo - comúnmente se puede obtener valores de R^2 muy cercanos a 1, que no necesariamente implican que las variables dependientes expliquen la variable dependiente. A esto último se le suele conocer como *regresión espuria* o disparatada.

2.2.2.1. Proceso estacionario en tendencia

A fin de transformar la serie de tiempo en un proceso estacionario en tendencia, se debe hacer una regresión en que la variable independiente sea el tiempo, donde sus residuos serán estacionarios en tendencia. Es decir, se debe estimar el siguiente modelo de regresión lineal simple:

$$Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 * t + \epsilon_t \tag{2.10}$$

donde en este caso, Y_t corresponderá al parque de buses, camiones, minibuses o taxis. El parámetro α_1 representa la tendencia anual, α_0 el intercepto y ϵ_t el error o variabilidad no

atribuible a la tendencia. Una vez estimado el modelo, se obtendrán los estimadores de $\widehat{\alpha_1}$ y $\widehat{\alpha_0}$ y el error estimado se puede calcular mediante la ecuación 2.11.

$$\widehat{\epsilon_t} = Y_t - \widehat{\alpha_0} - \widehat{\alpha_1} * t \tag{2.11}$$

A este término de error, $\widehat{\epsilon_t}$, se le conoce como serie de tiempo estacionaria en tendencia o bien serie de tiempo sin tendencia. Este tipo de tratamiento debe realizarse a todas las variables que serán utilizadas: parque de buses, camiones, minibuses y taxis del INE, GDP del FMI y población, puesto que todas corresponden, en efecto, a series de tiempo. Los resultados de los modelos de regresión en tendencia se discuten en la sección 2.2.3.

2.2.2.2. Estacionalidad

Existen variables de series de tiempo que poseen fuertes variaciones estacionales. Un buen ejemplo de ello son las ventas de helados. Tomemos como ejemplo las gráficas de la Figura 2.9; puede que año a año la tendencia de venta de helados aumente. Sin embargo, al eliminar la tendencia, se aprecia claramente que las ventas son mayores en verano que en invierno. A este ciclo se le denomina estacionalidad. Ahora bien, como los datos con los que estamos trabajando son anuales, no existe estacionalidad.

2.2.3. Resultados de los modelos

2.2.3.1. Modelos de tendencia

En la Tabla 2.2 se presentan los resultados obtenidos del ajuste de tendencia para el parque de buses, camiones, minibuses y taxis del Gran Santiago. Lo primero que se debe notar son los valores de los interceptos $\widehat{\alpha_0}$. Estos valores son negativos para todos los tipos de vehículos puesto que t toma valores entre 2002 a 2015.

Tabla 2.2. Resultados Modelo de Tendencia

Parámetro	Taxis	Buses	Minibuses	Camiones
$\widehat{\alpha_0}$	-104.950,20	-200.131,60	-338.112,60	-2.536,20
Test - t	-1,04	-2,89	-6,47	-18,07
$\widehat{\alpha_1}$	69,57	105,30	173,05	1.281,26
Test - t	1,39	3,05	6,65	18,34
R^2	0,139	0,437	0,786	0,966

Lo segundo, se aprecia que no existe mayor tendencia respecto del parque de taxis en el Gran Santiago. De hecho, si se grafica su valor a lo largo del tiempo, pareciera ser que el número de taxis es invariable, manteniendo siempre un valor cercano a los 34.500 taxis. De hecho, el modelo tiene dificultades determinando la tendencia, de ahí la obtención de un valor de R^2 muy bajo.

En cambio, para buses, minibuses y camiones, se aprecia un mejor ajuste, donde se observan claras tendencias crecientes a lo largo del tiempo. Sorprende el nivel de crecimiento del parque de camiones, donde la tendencia indica que año a año su parque aumenta - bajo condiciones estándar, es decir, sin considerar factores externos a la tendencia - en más de 1.280 camiones.

Las gráficas que representan la tendencia del parque de estos cuatro tipos de vehículos se muestran en la Figura 2.10.

2.2.3.2. Modelos de aleatoriedad

El modelo de aleatoriedad busca predecir las variaciones que no son atribuibles a la tendencia o a la estacionalidad. En particular, dado que no existe estacionalidad, aquí sólo se utilizará los términos de error, $\widehat{\epsilon_t}$, que son estacionarios en tendencia. En particular, se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

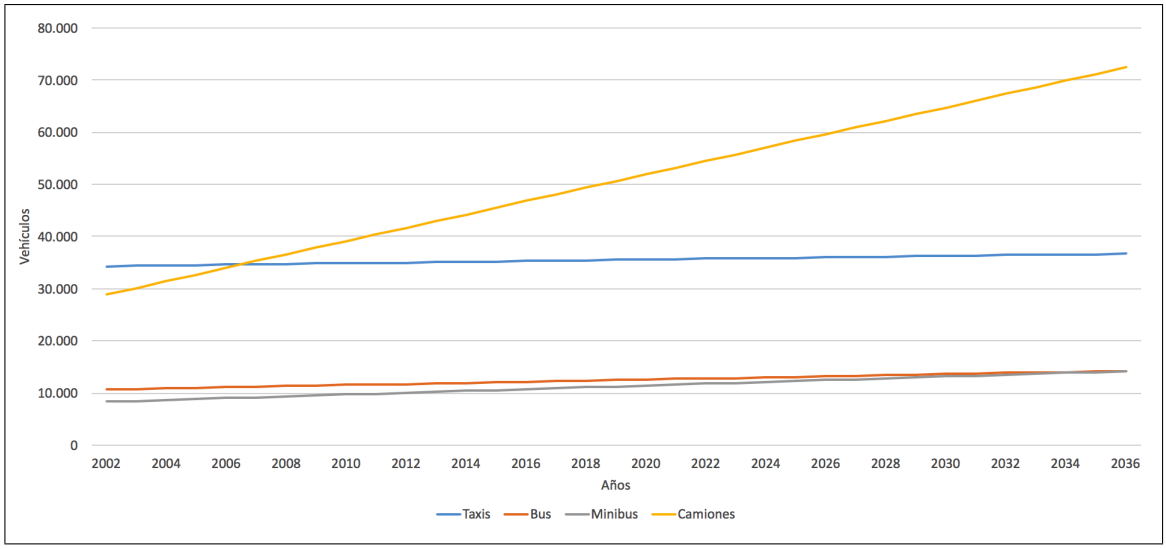

Figura 2.10. Tendencias del parque de buses, minibuses, camiones y taxis

- Puede existir un *lag* entre las respuestas del parque vehicular y cambios en las variables explicativas.
- Se ligó el número de vehículos relacionados con transporte de pasajeros a variables de tipo demográficas (de población).
- Se ligó el número de vehículos de transporte de carga a variables de tipo económicas (GDP).

Es decir, las estructuras buscadas para estimar la parte aleatoria de las variaciones en el parque de estos distintos tipos de vehículos son los siguientes:

$$\Delta Camiones_{Aleatorio,t} = \delta_0 + \delta_1 * \Delta GDP_t + \epsilon_t \tag{2.12}$$

$$\Delta TPublico_{Aleatorio,t} = \delta_0 + \delta_1 * \Delta POP_t + \epsilon_t \tag{2.13}$$

Los resultados de los modelos obtenidos, para cada tipo de vehículo, son los que se observan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Resultados Modelo de Variaciones Aleatorias.

Parámetro	Taxis	Buses	Minibuses	Camiones
$\widehat{\delta_0}$	-1.139,28	8,79	2,97	-574,20
Test - t	0,21	0,06	0,03	-1,26
$\widehat{\delta_1} POP_t$	-0,21	-	-	-
Test - t	-0,21	-	-	-
$\widehat{\delta_1} POP_{t-1}$	0,19	-	-0,002	-
Test - t	0,20	-	-0,68	-
$\widehat{\delta_1} POP_{t-2}$	-	0,01	-	-
Test - t	-	1,10	-	-
$\widehat{\delta_1} GDP$	-	-	-	6,51
Test - t	-	-	-	1,53
R^2	0,029	0,108	0,040	0,162

De los modelos obtenidos, y del proceso de estimación de los mismos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para los taxis, a pesar de un muy pobre ajuste, se determinó que el mejor ajuste contemplaba las variables de población de los dos años anteriores.
- Para los buses se obtiene un ligeramente mejor ajuste, y el *lag* en este caso aumenta a los dos años, siendo las variables poblacionales de los periodos t y $t-1$ irrelevantes.
- Para los minibuses el análisis es similar al de los taxis, obteniéndose un ajuste ligeramente mejor junto a un *lag* de un año.
- Respecto a los camiones, se probó distintas estructuras de *lag* resultando como mejor ajuste el GDP del período actual t.

Sobre los niveles de ajustes de estos modelos, se debe recordar que se están buscando relaciones entre los términos de error resultantes de eliminar la tendencia de las variables anteriormente descritas. Para todas, poblaciones y GDP, se están utilizando los resultados de eliminar la tendencia, lo cual claramente explica la obtención de bajos ajustes (en relación a los de la estimación de la tendencia). Ahora, sobre los *lags* observados, estos parecen razonables. Los buses, cuyo costo de adquisición de flota son mayores y cuyo manejo es menos flexible, poseen mayores tiempos de respuesta que los taxis y los minibuses. En cambio, los camiones (agrupando camiones livianos, medianos y pesados), tienen tiempos de respuesta mucho menores, y el modelo muestra que el mejor ajuste corresponde al del mismo período. Las gráficas de las variaciones aleatorias se encuentran en la Figura 2.11.

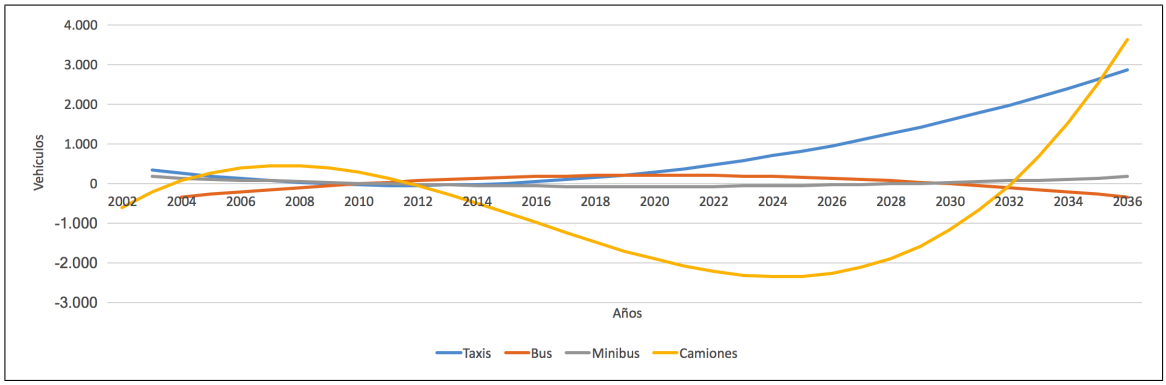

Figura 2.11. Variaciones aleatorias parque de buses, minibuses, camiones y taxis

2.2.4. Resultados y suavizamiento de las proyecciones

A partir de los modelos anteriormente estimados, se debe determinar las proyecciones de los parques estos tipos de vehículos. En particular, el parque vehicular de cada categoría vendrá dado por la suma del parque determinado por la tendencia y el determinado por el modelo de aleatoriedad. Así, el parque total del tipo de vehículo i vendrá dado por la ecuación (2.14).

$$Parque_{TipoVehiculo} = Parque_{Tendencia} + Parque_{Aleatorio} \tag{2.14}$$

Luego, en base a los modelos estimados y la información que se posee, se puede calcular el parque tendencial y el derivado de la aleatoriedad. Esto básicamente resulta de adicionar los valores mostrados en las gráficas de las secciones 2.2.2 y 2.2.3. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.12.

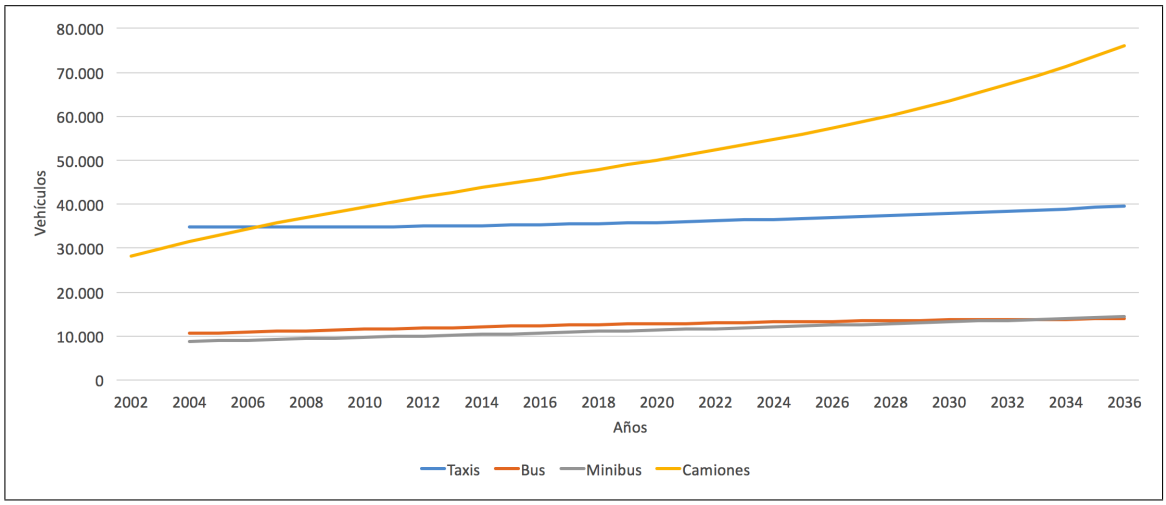

Figura 2.12. Proyección parque de buses, minibuses, camiones y taxis

2.3. Contraste de Resultados con Tendencias de Mercado

Resulta relevante analizar si las proyecciones estimadas anteriormente concuerdan con las tendencias observadas en el parque automotor nacional. En particular, el modelo estima, un crecimiento neto (sin tomar en cuenta la obsolescencia o tasa de retiro vehicular) para los años 2002 - 2014 de 6,44 % con un nivel de saturación de 500 vehículos cada 1.000 habitantes, y de 6,36 % con un nivel de saturación de 800 vehículos cada 1.000 habitantes. Si se compara estos valores con los entregados por el INE en sus informes

anuales, los cuales denotan un crecimiento neto promedio de 6,12 %, el modelo inicialmente estaría sobreestimando levemente el parque para los años de calibración, en aproximadamente 0,25 % anual. Es decir, para los años de calibración, el modelo se ajusta a lo observado en ambas bases.

Ahora, si se revisa los informes de ventas de vehículos nuevos de la Asociación Nacional Automotriz de Chile A.G. (ANAC, 2015), se puede observar que las ventas de vehículos nuevos representaron, para los años 2012, 2013, 2014 y 2015 un 9,7 %, 10,2 %, 8,6 % y 6,8 % del total. Es decir, las ventas promedio de estos años corresponden a un 8,8 %. Estos últimos valores corresponden a la tasa neta de crecimiento del parque, sumando la tasa de obsolescencia es decir, la tasa a la cual se retiran los vehículos del mismo. Es interesante destacar que el modelo estima ventas para los diez primeros años de la simulación de 9 % y, para los 22 años de simulación, las ventas promedian 8,4 % del total. Es decir, el modelo estimado no se aleja de los valores presentados por la ANAC.

3. PROYECCIÓN DE TOTALES POR CATEGORÍA TECNOLÓGICA

Luego de estimar los totales vehiculares según categoría, se debe establecer cómo se componen estos totales de acuerdo a las características tecnológicas definidas por las normativas EURO. Esto se realiza principalmente por el hecho que normativas más antiguas, tales como la EURO I, II y III, son notoriamente más contaminantes que las anteriores.

En este apartado se busca ante todo establecer, para los totales obtenidos anteriormente para cada tipo de vehículo, qué cantidad de ellos corresponde a vehículos sin normativa (S/N) EURO, EURO I, II, III, IV, V y VI, con el fin de poder asignar los factores de emisión adecuados a cada vehículo del parque.

En particular se busca, para el año base, caracterizar completamente el parque vehicular de acuerdo a variables clave como el tipo de vehículo, combustible utilizado y su edad. Con ello, aplicando modelos básicos de supervivencia se espera modelar la renovación del parque año a año a lo largo de la simulación.

3.1. Información Disponible

En Chile se utiliza actualmente un modelo desarrollado por SECTRA para determinar las emisiones en ciertos períodos de tiempo. Este modelo, denominado MODEM ("MODelo de EMisiones"), toma información de la red de transporte, sus flujos vehiculares, etc. y determina las emisiones locales para el período de estudio (MODEM, 2013).

Claramente, el modelo MODEM es notoriamente más complejo de lo que se busca estimar en este estudio. Sin embargo, MODEM posee información completa sobre el parque vehicular de Chile, la cual es vital para caracterizar el parque. Dado lo anterior, se utilizó las bases de datos del parque vehicular de MODEM, que muestran, para cada período (de 2008 a 2013), los siguientes datos:

- Comuna
- Tipo de vehículo

- Año de fabricación
- Tipo de combustible

Para cada categoría de estos datos, por ejemplo, *'Colina, Todo Terreno, Año 2005, Bencinero'* la base nos indica cuántos vehículos caen en la categoría y en base a esta clasificación, es posible determinar la cantidad de vehículos según las normativas EURO. No obstante, para esto se deben conocer las fechas en las cuales cada normativa estuvo vigente. En particular, en Chile, las diversas normativas EURO comenzaron y terminaron su vigencia en años que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Fechas Inicio/Término Normativas EURO Vehículos Livianos Bencineros (Diésel)

Normativa	Inicio	Término
S/N	-	1992 (1992)
EURO I	1993 (1993)	2004 (2004)
EURO II	2005 (2005)	2010 (2004)
EURO III	2010 (2005)	2010 (2005)
EURO IV	2011 (2006)	2013 (2010)
EURO V	2014 (2011)	2019 (2019)
EURO VI	2020 (2020)	-

Fuente: MODEM (2013)

Las normativas EURO varían dependiendo del tipo de vehículo analizado. Para el caso de buses y camiones, las fechas de inicio / término de cada una son las que se observan en la Tabla 3.2. Se debe destacar que los buses EURO IV técnicamente no circularon en Chile, sino que corresponden a modelos con normativa EURO III con filtro de partículas diésel (DPF). Esto se tomará en cuenta a la hora de asignar las emisiones de esta categoría de buses.

Tabla 3.2. Fechas Inicio/Término Normativas EURO Buses (Camiones)

Normativa	Inicio	Término
S/N	-	1992 (1994)
EURO I	1993 (1995)	1996 (1998)
EURO II	1997 (1999)	2002 (2007)
EURO III	2003 (2008)	2011 (2010)
EURO IV	- (2011)	- (2013)
EURO V	2014 (2013)	2019 (2019)
EURO VI	2020 (2020)	-

Fuente: MODEM (2013)

Es importante verificar en este punto la consistencia entre los datos de los totales vehiculares a partir del INE y los datos utilizados del parque de MODEM. Para cada año de la base de datos de MODEM (2008 a 2013), se revisó las diferencias entre el total de vehículos en ambas bases. Las diferencias, en promedio, se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Diferencias Porcentuales entre Bases del INE y MODEM.

Tipo de Vehículo	Vehículos Particulares	Buses	Camiones	Taxis
Diferencia Porcentual	0,62 %	2,97 %	1,18 %	5,62 %

Las diferencias entre ambas bases son bajas. La mayor se da para los taxis, tipo de vehículo cuyo comportamiento es dificil de predecir por los modelos estimados. Considerando que las diferencias entre ambas bases son inferiores al $10\,\%$, se estima que ambas bases son consistentes en cuanto a los totales vehiculares por categoría. Por este motivo, se utilizarán los datos de MODEM con el fin de establecer las proporciones de las normas EURO dentro de cada categoría vehicular. Otra prueba de consistencia en los datos

de MODEM consiste en analizar las tendencias del parque para las distintas normativas, y esto se realiza en la siguiente sección.

3.2. Análisis de Consistencia en las Tendencias

Es interesante analizar la consistencia de los datos internos de MODEM para cada categoría tecnológica. Esto es, es esperable que las tecnologías no-vigentes presenten una tendencia decreciente en su parque, y que las vigentes presenten el efecto contrario.

3.2.1. Decrecimiento del parque vehicular para normativas EURO obsoletas

Con los datos de MODEM es posible examinar el parque de vehículos según cada tipo de normativa EURO. Para ello se analizó, para cada tipo de vehículo, cómo variaba el parque para cada normativa EURO. Para las normativas no vigentes, es decir, las que no pueden ser importadas al país, y por ende tampoco pueden ser vendidas por concesionarios, se observa efectivamente una tendencia de decrecimiento del parque. Por ejemplo, el parque de vehículos particulares bencineros sin normativa (S/N), EURO I, II, y III, se encuentran a la baja entre los años 2008 y 2013, mientras que la normativa vigente, EURO IV, se encuentra al alza. En la Figura 3.1 se observa la tendencia de decrecimiento observada para los vehículos particulares bencineros con normativas obsoletas Sin Norma y Euro I.

Este mismo análisis se extendió para todas las normativas que no están vigentes, para todos los tipos de vehículos, y el efecto es el mismo en todos los casos.

3.2.2. Crecimiento del parque vehicular para normativas EURO vigentes

Para las normativas vigentes durante el período 2008 - 2013, el efecto observado es el esperado. Es decir, las normativas vigentes presentan un parque con tendencia creciente, lo cual es lógico puesto que son las únicas que pueden ingresar al país.

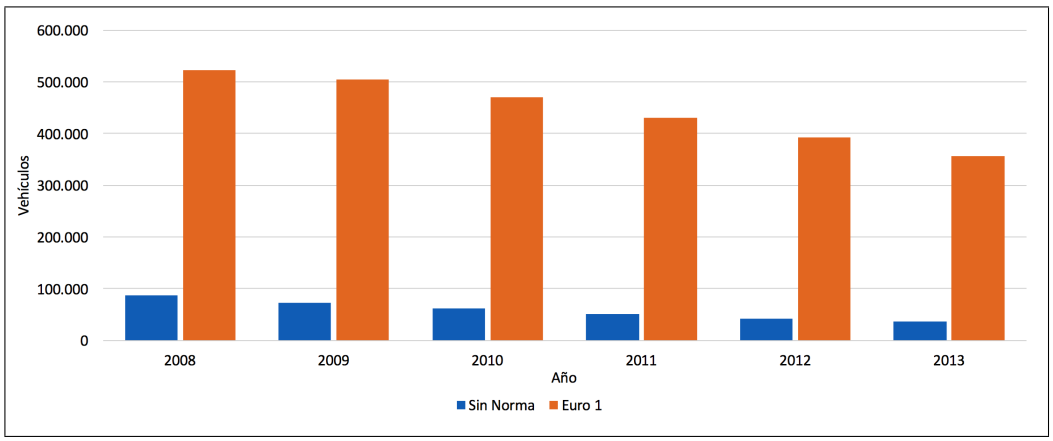

Figura 3.1. Decrecimiento parque vehículos particulares bencineros para normativas no-vigentes
Fuente: MODEM (2013)

Esto básicamente puede representarse como una restricción de continuidad de flujos, en que la salida de las normativas no-vigentes, dado un total vehicular, debe ser repuesto por vehículos nuevos acordes a la normativa vigente. Por ejemplo, si la normativa EURO IV es la vigente, se debiese cumplir que;

$$InParque_{EUROIV} = TotalParque_t - OutParque_{S/N} - OutParque_{EUROI} \\ -OutParque_{EUROII} - OutParque_{EUROIII} \tag{3.1}$$

en que los términos $InParque$ representan la cantidad de vehiculos entrantes en el período t, mientras que los términos $OutParque$ representan los vehículos salientes del parque en ese período.

3.3. Parque Vehícular Base

La simulación toma un parque vehicular base, que está determinado por la información entregada por los datos de MODEM al año 2013. El parque vehicular base posee una composición según tipo de combustible que se aprecia en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Composición Según Combustible Utilizado del Parque Vehicular Base

Tipo de Vehículo	Bencineros	Diésel	Gas	Eléctricos	TOTAL
Vehículo Particular	1.167.790	176.323	5	38	1.344.156
Bus	-	22.114	-	-	22.114
Camión	-	42.701	-	-	42.701
Taxi	32.958	700	1.402	-	35.060

Fuente: MODEM (2016)

Luego, para cada tipo de vehículo, es posible graficar su distribución en función del año de fabricación. En las Figuras 8.1, 8.2, 8.3 y 8.4, en naranjo se muestran los vehículos bencineros y en azul a los diésel.

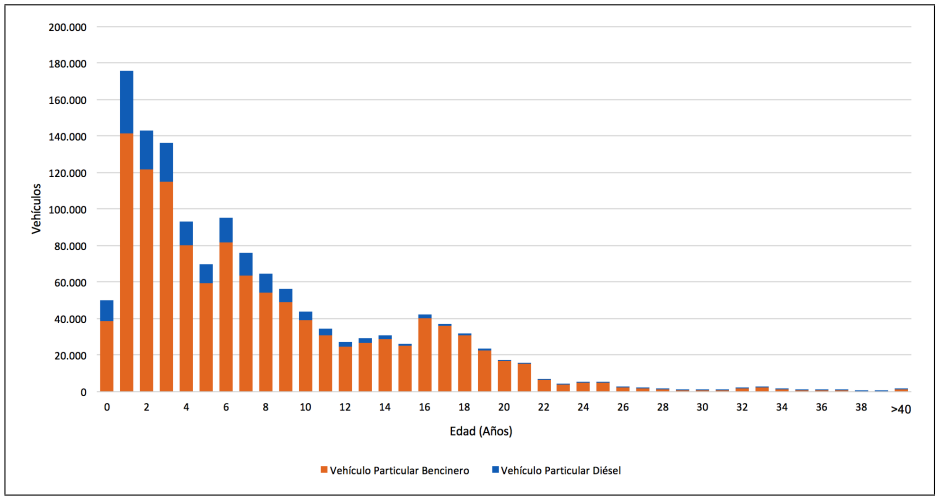

Figura 3.2. Distribución del parque de vehículos particulares en función de su edad
Fuente: MODEM (2016)

Las distribuciones de estas Figuras muestran claramente los efectos de la crisis *Sub-Prime* de los años 2008-2009 y de la crisis latinoameticana de los años 2000-2002. También es posible apreciar que la adquisición de buses de transporte público se realiza en

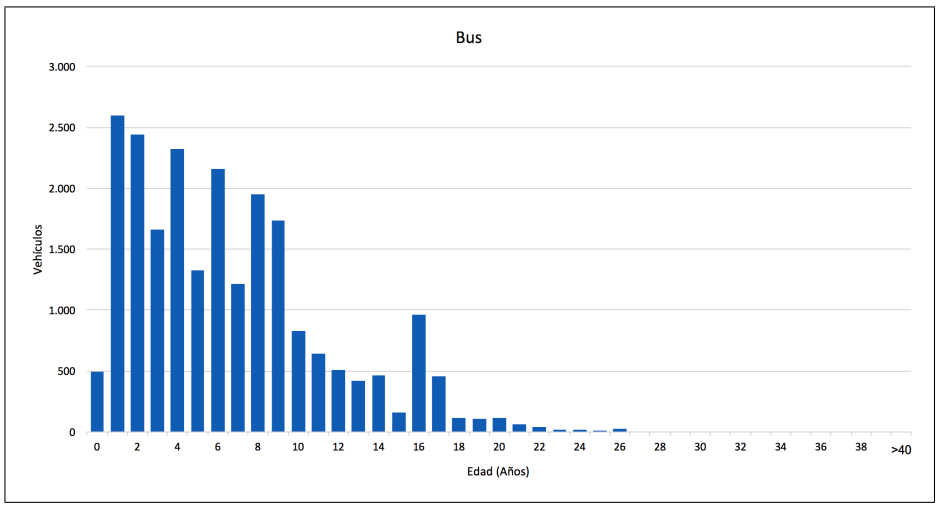

Figura 3.3. Distribución del parque de buses en función de su edad
Fuente: MODEM (2016)

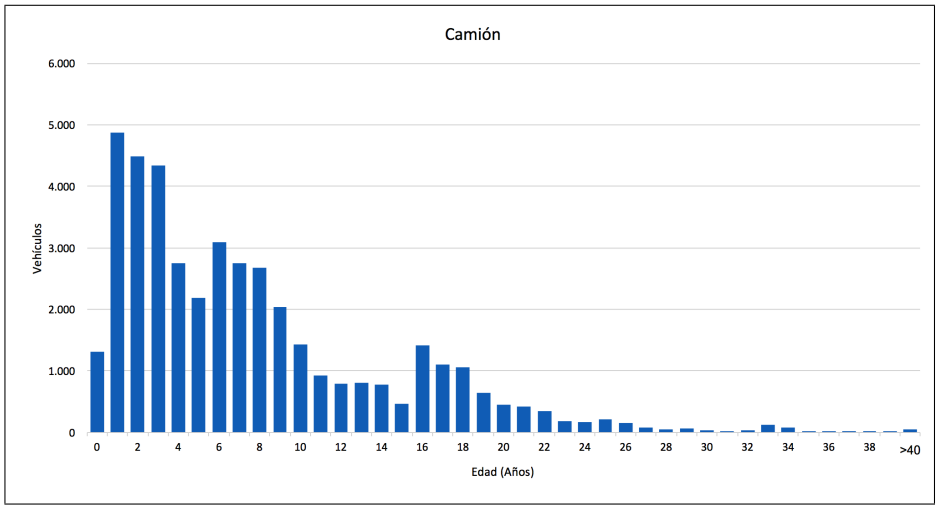

Figura 3.4. Distribución del parque de camiones en función de su edad
Fuente: MODEM (2016)

tandas (de ahí los *peaks* de los años 2006, 2008 y 2010). Otro elemento interesante de mencionar es que la distribución de edad de los taxis es extremadamente acotada en comparación a la de los otros tipos de vehículos. Los taxis, por ley, no pueden circular si su edad es superior a los 13 años (MTT, 2016), lo cual se ve fielmente reflejado en su distribución.

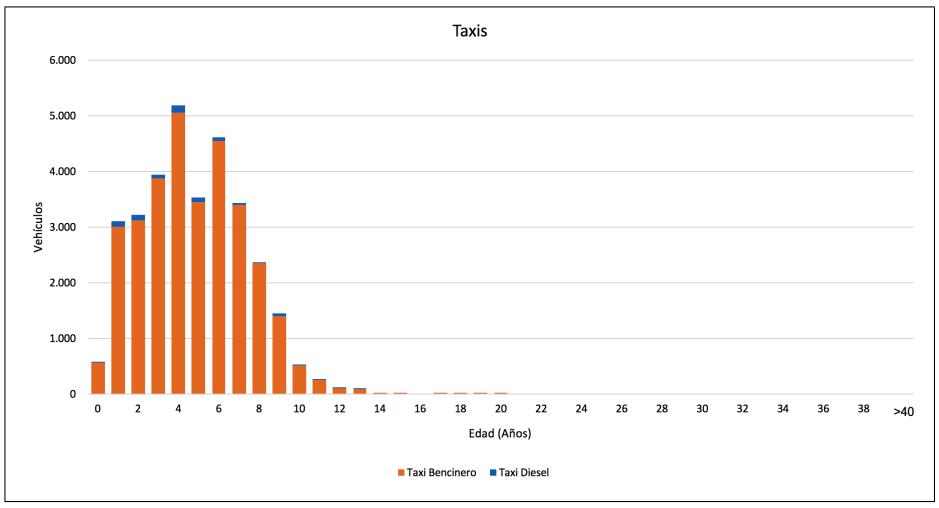

Figura 3.5. Distribución del parque de taxis en función de su edad
Fuente: MODEM (2016)

Todos estos elementos deben ser tomados en cuanta a la hora de plantear la renovación del parque. Es decir, se debe definir una probabilidad de supervivencia acorde a lo observado en las distribuciones anteriores, permitiendo así mantener el máximo realismo posible en la simulación.

3.4. Distribución de Supervivencia

A fin de simular la renovación del parque, se utilizará una distribución acumulada como la propuesta por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil (2002), obtenida del EPA (2006). La distribución se muestra en la Figura 8.4, y la ecuación que la define es la de la ecuación 3.2.

$$P_t = 1 - e^{-e^{\alpha+\beta*t}} \tag{3.2}$$

La probabilidad de que un vehículo sea retirado del parque - *scrapped* - es claramente el complemento de la ecuación anterior. Los parámetros propuestos por EPA (2006), para α y β son 1,618 y -0,141 respectivamente.

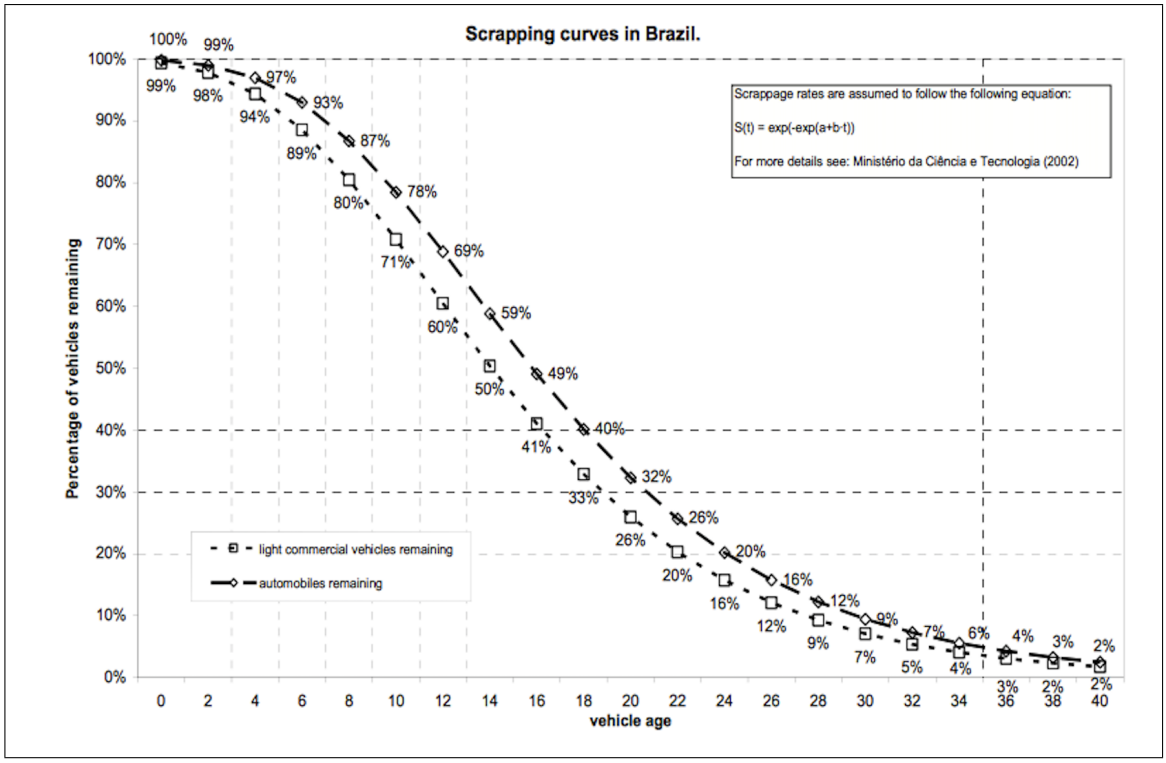

Figura 3.6. Distribución de supervivencia Brasil
Fuente: EPA (2006)

Esta distribución se adapta muy bien a lo observado en el parque nacional para los vehículos particulares, pero no lo hace para el resto. Dado lo anterior, a fin de respetar el comportamiento de los datos nacionales, se adaptó las distribuciones de supervivencia - modificando el parámetro asociado tiempo en la ecuación, β - con el fin de replicar de mejor forma los datos. En este caso, para acelerar la renovación, el parámetro β debe tomar valores más negativos, mientras que para desacelerar la renovación, el parámetro debe crecer (positivamente). Las distribuciones utilizadas, para cada tipo de vehículo, son las que se muestran en la Figura 8.5.

Los valores del parámetro β, para cada tipo de vehículo se presentan en la Tabla 3.5. De esta forma, se reproduce el efecto de que no pueden haber taxis con edad superior a los 13 años en circulación - lo cual exige una renovación mucho más acelerada que el resto - y permite a buses, camiones y taxis mantener una mínima cantidad de vehículos, de avanzada edad, aún en circulación.

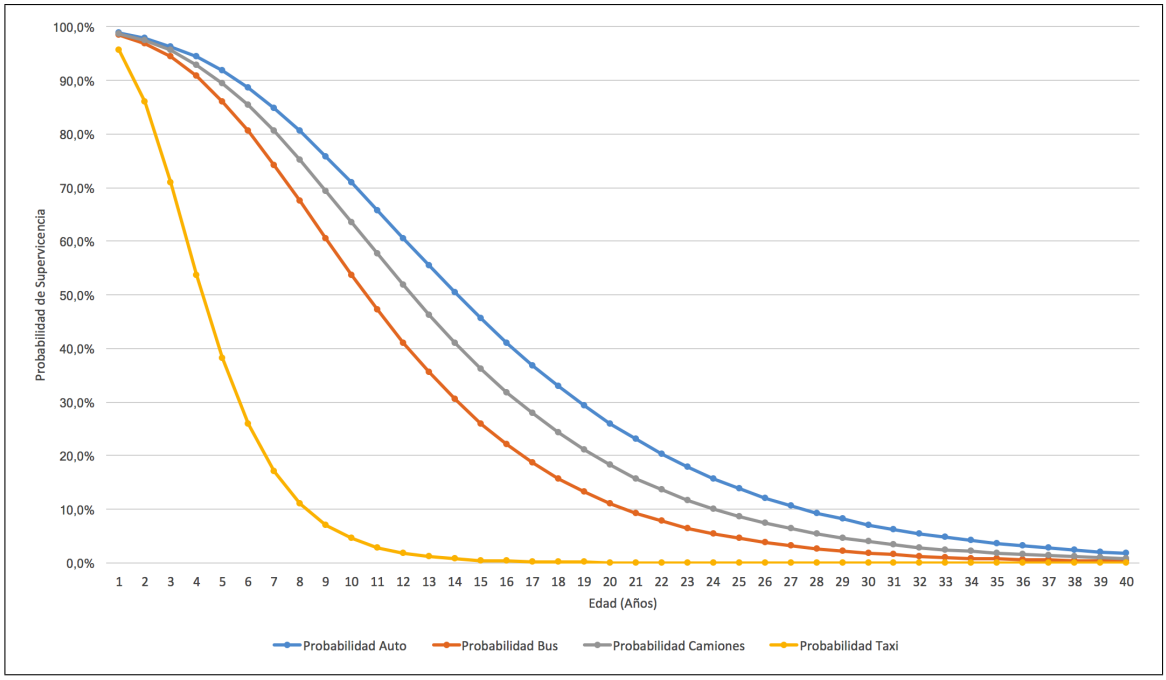

Figura 3.7. Distribuciones de supervivencia

Tabla 3.5. Valores Parámetro β Distribución de Supervicencia según Tipo de Vehículo.

Tipo Vehículo	Valor β
Vehículo Particular	$-0,141$
Bus	$-0,188$
Camión	$-0,161$
Taxi	$-0,470$

3.5. Modelación del Parque en la Simulación

Conocido el parque del año 2013, se procedió a estimar el parque durante los años de la simulación bajo un modelo simple de flujos, tal y como se realiza en el modelo de Fridstrom (2016). En particular, para cada cohorte, se trata en forma individual a cada tipo de vehículo k, según tipo de combustible, en función de su propia edad T. Con esto, para

las tecnologías no-vigentes, es decir para vehículos sin norma y hasta con la norma EURO IV, el parque vehicular, para el tipo de vehiculo k en el período $t+1$, se modela mediante la ecuación (3.3).

$$ParqueEuro_{t+1}^{i,k} = \sum_{T \in EURO_i} ParqueEuro_T^{i,k} * P_{T+1}\,, \quad \forall\, i \in EURO\{S/N, I, II, III, IV\} \tag{3.3}$$

Por otro lado, para las tecnologías vigentes, la ecuación que modela el flujo es la (3.4).

$$ParqueEuro_{t+1}^{i,k} = TOTAL_{t+1}^{k} - \sum_{i} ParqueEuro_{t+1}^{i,k}\,, \quad \forall\, t\; i \in EURO\{Vigente\} \tag{3.4}$$

Sin embargo, si bien la ecuación (3.4) modela el comportamiento del parque total de la normativa vigente, no muestra la evolución de su composición interna; es decir, cómo evolucionan los vehículos de edad t en su interior. Para ello, en cada año de la simulación se puede determinar la cantidad de vehículos nuevos que deben ingresar al parque. Este número está dado por la suma algebraica de la salida de vehículos retirados por la distribución de supervivencia y el crecimiento neto del parque de un período a otro. Así, la ecuación de flujo en este caso es la dada por la ecuación (3.5).

$$ParqueNuevo_{t+1}^{i,k} = \sum_{T \in EURO_i} ParqueEuro_T^{i,k} * P_{T+1} + (TOTAL_{t+1}^{k} - TOTAL_{t}^{k}) \\ ,\forall\, i \in EURO\{S/N, I, II, III, IV, V\} \tag{3.5}$$

Esto mismo se extiende cuando la normativa EURO V deje de estar vigente y la EURO VI comience a regir. De esta forma, el parque vehicular de la normativa vigente, en el período t, estará dado por:

$$ParqueEuro_t^{i,k} = \sum_{T \in EURO_i} ParqueNuevo_T^{i,k} * P_T \tag{3.6}$$

4. EDAD DEL PARQUE VEHICULAR

En este capítulo se calcular la edad del parque vehicular del Gran Santiago así como la edad del parque vehicular nacional. Se mostrarán los efectos que causan variar parámetros en la distribución de supervivencia de los vehículos.

4.1. Evidencia Internacional

Antes de calcular la edad del parque, resulta interesante ver primero cuál es la tendencia de este indicador en otros países y ciudades.

El *Bureau of Transportation Statistics* (BTS) de los Estados Unidos posee información acerca de la evolución de la edad promedio de vehículos livianos y camiones desde los años 1995 al 2014. Para ambos tipos de vehículos, la edad ha aumentado constantemente, desde 8,3 (8,4 para camiones) hasta 11,4 años para ambos (BTS, 2015). Por otra parte, la *European Automobile Manufacturers Association* (ACEA, 2016) indica que el parque vehicular en Europa también envejece, pasando de 8,4 a 9,7 años de edad en el período 2006 - 2015. A modo de ejemplo, en Francia más de 40 % de los vehículos tiene más de 10 años de antiguedad, un 30 % tiene entre 5 y 10 años, y el resto tiene una edad inferior a los 5 años. Sin ir más lejos, la ANAC (2015) determinó que la edad del parque automotor de Chile, al año 2014, era de 9 años.

4.2. Cálculo de la Edad del Parque

A continuación se muestra la metodología para calcular la edad del parque para el Gran Santiago y Chile. La forma más directa de realizar este cálculo, para el año t, es mediante la ecuación (4.1).

$$Edad_{Parque,t} = \frac{\sum_T X_T * T}{\sum_T X_T} \tag{4.1}$$

en que X_T representa la cantidad de vehículos de edad T, y T su edad desde el año de fabricación. En el modelo, se emplea este principio de cálculo de la edad del parque, y se calcula la edad separadamente para cada tipo de normativa EURO i. Esto último es simplemente con el fin de ver su comportamiento en estas categorías. Así, el cálculo básicamente se traduce a;

$$Edad^{i,k}_{Parque,t} = \frac{\sum_T X^{i,k}_{t,T} * T}{\sum_T X^{i,k}_{t,T}} \tag{4.2}$$

en que $X^{i,k}_{t,T}$ representa la cantidad de vehículos de edad T de la normativa i para el tipo de vehículo k en el año t. Luego, la edad promedio del parque de vehículos tipo k, en el año t será:

$$Edad^{k}_{Parque,t} = \frac{\sum_i Edad^{i,k}_{Parque,t} * X^{i,k}_{t}}{\sum_i X^{i,k}_{t}} \tag{4.3}$$

donde:

$$X^{i,k}_{t} = \sum_T X^{i,k}_{t,T} \tag{4.4}$$

Finalmente, para calcular la edad promedio del parque vehicular completo, basta con aplicar el mismo principio empleado en la ecuación anterior, solo que ahora buscando agrupar los tipos de vehículos, es decir:

$$Edad_{Parque,t} = \frac{\sum_k Edad^{k}_{Parque,t} * X^{k}_{t}}{\sum_i X_t} \tag{4.5}$$

en que:

$$X^{k}_{t} = \sum_i X^{i,k}_{t} \tag{4.6}$$

4.3. El Parque Vehicular de Santiago y de Chile Tienden a Envejecer

4.3.1. Edad del parque del Gran Santiago

Utilizando la metodología mencionada en la sección anterior, se calculó la edad del parque vehicular a lo largo de la simulación. Los resultados obtenidos para el Gran Santiago son los que se pueden ver en la Figura 4.1.

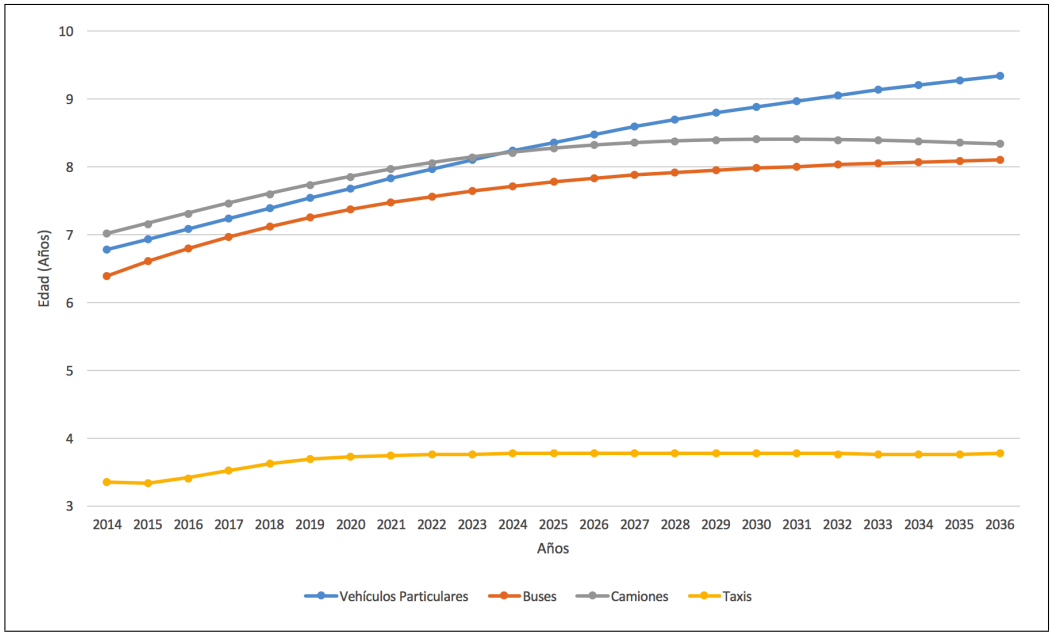

Figura 4.1. Evolución de la edad del parque vehicular del Gran Santiago en la simulación

Del gráfico anterior, se pueden desprender las siguientes observaciones:

- Vehículos particulares: La edad promedio presenta una tendencia creciente a lo largo de la simulación, sin signos de estabilizarse dentro del plazo evaluado.
- Buses y Camiones: La edad promedio presenta una tendencia creciente durante los primeros 10 años de la simulación y luego ésta comienza a estabilizarse. La edad promedio de los camiones se estabiliza, y hacia el final de la simulación comienza a descender lentamente puesto que el crecimiento del parque de camiones aumenta en ese entonces.

- Taxis: Se puede observar que la edad promedio de los taxis comienza en 3,5, aumentando rápidamente al valor de 3,8 años para luego estabilizarse.

Se destaca que, mientras mayor sea la tasa de renovación, mayor será la velocidad a la cual se estabilizará la edad del parque. Eso explica el porqué los vehículos particulares no muestran signos de estabilización a diferencia del resto.

4.3.2. Análisis de sensibilidad

Resulta interesante evaluar qué efectos tiene el variar parámetros de la función distribución de supervivencia en la edad promedio del parque vehicular. Recordando lo mencionado en el capítulo anterior, para acelerar la renovación se debe únicamente modificar el parámetro β de la función distribución. Se espera que acelerando la renovación del parque, las edades promedio disminuyan y que al retardar la renovación el efecto sea el contrario. En la Figura 4.2 se muestran cuatro escenarios, con distintos valores del parámetro β.

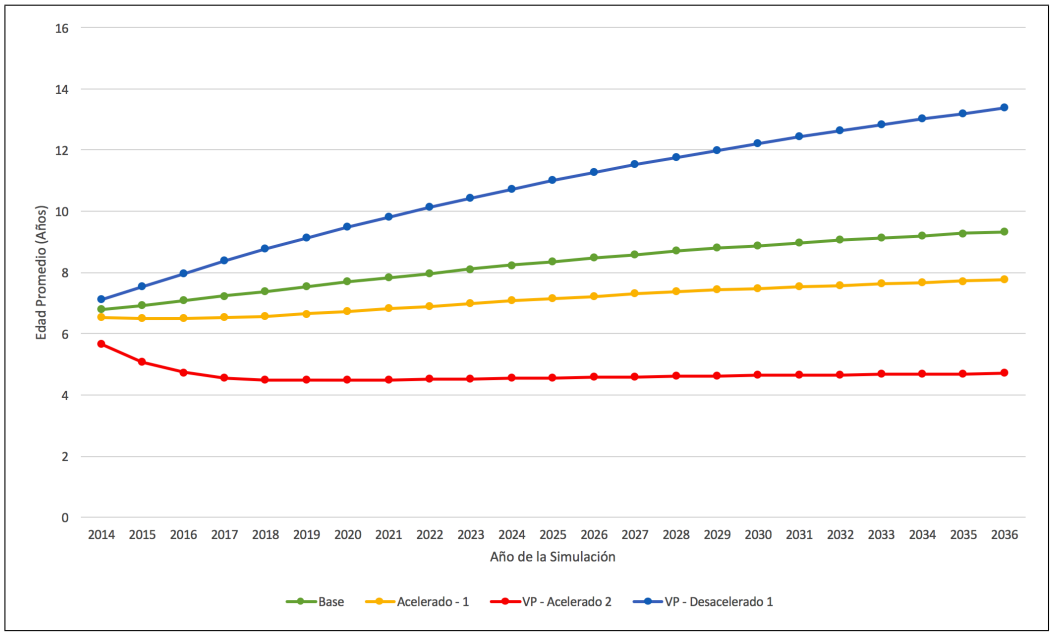

Figura 4.2. Sensibilidad de la edad del parque frente a cambios en la distribucion de supervivencia

Se debe destacar que en la Figura 4.2 se observa que las curvas parten desde edades distintas, esto es normal puesto que el año 2014 es el primer año al cual el parque es sometido a ésta distribución. Para el año 2013, para todos los valores del parámetro β las edades son las mismas.

Los efectos observados son los siguientes:

- Hacer más drástica la caída en la distribución de supervivencia - haciendo más negativo β - acelera la renovación del parque, lo cual trae consigo que la edad del parque sea menor que en el caso base.
- Al suavizar la caída en la distribución de supervicencia - haciendo más cercano a 0 el parámetro β - se enlentece la renovación del parque, lo cual provoca que su edad aumente conforme transcurre la simulación.

Los valores escogidos para el parámetro β, en cada escenario se muestran en la Tabla 4.1. Se destaca que estos valores fueron escogidos de forma arbitraria, sólo para ver los efectos en la edad.

Tabla 4.1. Análisis de Sensibilidad de la Edad del Parque en Función de la Renovación del Parque

Escenario	β Vehículo Particular	β Bus	β Camión	β Camión
Base	-0,141	-0,188	-0,161	-0,470
Desacelerado	-0,081	-0,108	-0,069	-0,270
Acelerado - 1	-0,181	-0,241	-0,207	-0,603
Acelerado - 2	-0,341	-0,455	-0,390	-1,137

4.3.3. Edad del parque vehicular nacional

Para determinar la edad del parque a nivel nacional se realizó el mismo procedimiento. Los resultados concuerdan a grandes rasgos con los valores propuestos por la ANAC. El

modelo estima que el parque de vehículos particulares, al año 2014, tiene una edad promedio de 8,5 años versus los 9 que estipula la entidad nacional. Los resultados obtenidos, para el caso de Chile, se presentan en la Figura 4.3.

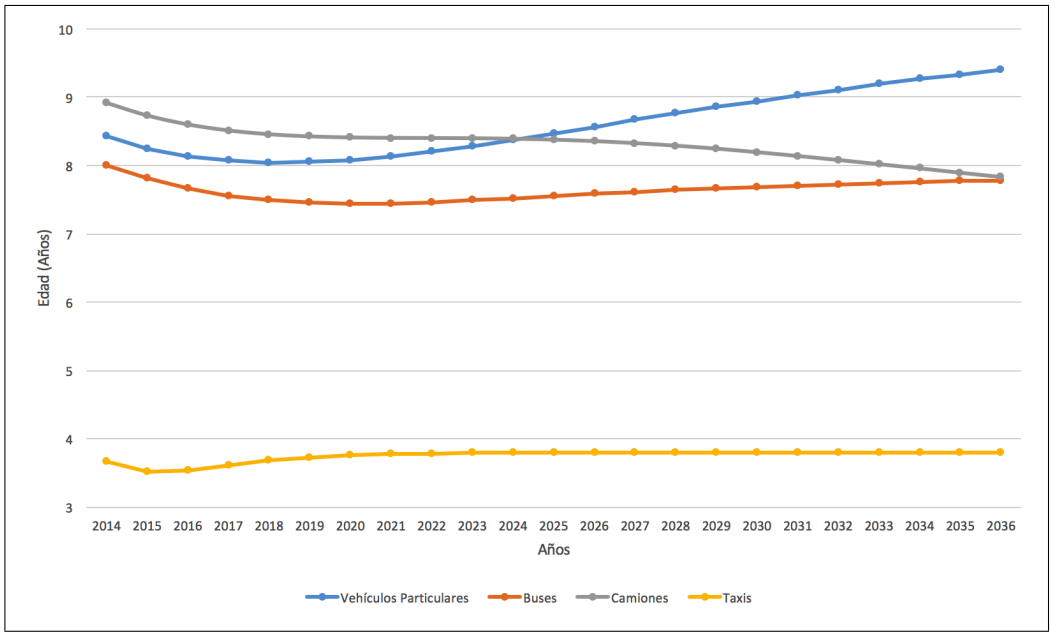

Figura 4.3. Evolución de la edad del parque vehicular nacional en la simulación

Como es posible apreciar, el comportamiento es totalmente diferente al del Gran Santiago, a excepción de los taxis. Esto parece razonable, y se debe a las siguientes razones:

- Vehículos articulares: La edad de este tipo de vehículo, para el territorio nacional, es mayor en el año base que la edad del parque del Gran Santiago. Dado esto, en los primeros años la distribución de supervivencia se encarga de eliminar rápidamente el parque de vehículos viejos, logrando estabilizar la edad, para luego retomar la tendencia creciente que se aprecia en la edad del Gran Santiago.
- Buses y Camiones: Ocurre exactamente lo mismo, sólo que en el caso de los camiones la edad comienza a descender rápidamente puesto que su parque crece rápidamente en los últimos años de la simulación. Puesto que el parque de buses crece de forma más lenta, su edad promedio comienza a aumentar lentamente mostrando signos de estabilización.

- Taxis: Dado que la normativa que limita la edad de los taxis a tener menos de 13 años rige en todo el territorio nacional, la edad inicial del parque de taxis a nivel nacional es muy similar y su comportamiento a lo largo de la simulación es análogo al del Gran Santiago.

5. DISTANCIAS RECORRIDAS POR EL PARQUE VEHICULAR

En este capítulo se detallan los datos utilizados para modelar las distancias recorridas por el parque vehicular a lo largo de la simulación. Notemos que a esto se le denomina también nivel de actividad del parque, o vehículos - kilómetro (veh-km) recorridos.

5.1. Información Disponible

Ya habiendo caracterizado completamente el parque que se simulará, se debe determinar sus patrones de uso a fin de ser capaces de determinar los veh-km recorridos por cada tipo de vehículo, para cada categoría tecnológica.

La información sobre uso vehicular proviene de las Plantas de Revisión Técnica (PRT). Las PRT son instalaciones que chequean el estado de los vehículos anualmente, con el fin de ver si están en condiciones de circular o no. La base de datos utilizada provee información totalmente desagregada puesto que, en cada observación, se posee datos completos sobre cada vehículo fiscalizado. Específicamente, cada observación entrega las siguientes variables de interés:

- Tipo de vehículo (Vehículo particular, Bus, Camión, Taxi)
- Comuna en que se hace la revisión
- Año de fabricación (y por ende edad del vehículo)
- Kilometraje total

La base de datos contempla a todos los vehículos que hayan pasado por una PRT entre los años 2008 y 2013. En total, se posee cerca de 2,7 millones de observaciones. La base de datos entrega también información sobre otras variables, pero con las presentadas anteriormente ya es suficiente para desarrollar el modelo de uso vehicular.

5.2. Depuración de los Datos

Antes de utilizar los datos, se realizó un análisis de consistencia de los mismos. Es decir, se hizo un chequeo buscando datos que tuvieran valores en variables imposibles o irreales, a fin de no utilizarlos en la modelación posterior.

Se revisó los siguientes criterios:

- El año de fabricación debe tener sentido; es decir, no debe ser posterior al año en que se realiza la revisión técnica.
- No debe haber vehículos particulares que, en promedio, hayan recorrido más de 100.000 kilómetros anuales.
- No debe haber buses, camiones o taxis que, en promedio, hayan recorrido más de 200.000 kilómetros anuales.
- No debe haber vehículos que, en promedio, hayan recorrido menos de 2.000 kilómetros anuales.
- Se debe haber registrado el kilometraje y edad del vehículo.

Con estos últimos criterios se evitan datos mal tipeados (múltiples observaciones tenían kilometrajes totales de 9.999.999 o bien 0, 1, ... , 10, ..., etc.), y datos de kilometrajes vacíos, entre otros. El número de observaciones eliminadas, para cada criterio, se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Observaciones Eliminadas según Criterios.

Criterio	Observaciones Eliminadas
Edad $>= 0$	61
Kilometrajes Vacíos	588.153
$\overline{D_{t,t+1}} < 2{,}000$	611.349
$\overline{D_{t,t+1}} > 100{,}000$ Autos	49.630
$\overline{D_{t,t+1}} > 200{,}000$ Otros	19.158

Luego de realizar la depuración la base de datos quedó con cerca de 1,4 millones de observaciones, un número más que razonable para el presente análisis.

5.3. Modelación de las Distancias Anuales Recorridas

Aquí se detallarán los supuestos empleados para modelar las distancias recorridas por el parque y posteriormente la metodología empleada, así como los ajustes realizados.

5.3.1. Supuestos de modelación

Antes de modelar los kilómetros recorridos por el parque utilizando los datos anteriores, se debe mencionar los principales supuestos de modelación que se realizarán, a saber:

- Las distancias recorridas anualmente por un vehículo son función de la edad del mismo; se espera que los vehículos nuevos recorran distancias mayores que los más antiguos.
- El patrón de uso vehícular (distancias en función de la edad) se mantendrá constante a lo largo de la simulación; es decir, un vehículo con cierta edad recorrerá la misma distancia anual tanto en el año base como en el año de término de la simulación. Por ejemplo, los vehículos de edad T recorrerán la misma distancia en cualquier año de la simulación.

5.3.2. Kilometrajes acumulados

Con la base de datos depurada se procedió a graficar, para cada tipo de vehículo, el kilometraje acumulado promedio en función de su edad. Los perfiles obtenidos se observan en la Figura 5.1, y muestran que el kilometraje vehicular acumulado efectivamente aumenta conforme se hace más viejo - lo cual es obvio, sin embargo es un buen signo de la calidad de los datos -. Se observa, además, que los vehículos que menos km recorren son los particulares, seguidos por los camiones y taxis. El bus es el tipo de vehículo que

más km recorre, llegando a kilometrajes promedio superiores a los 600.000 km en su vida útil.

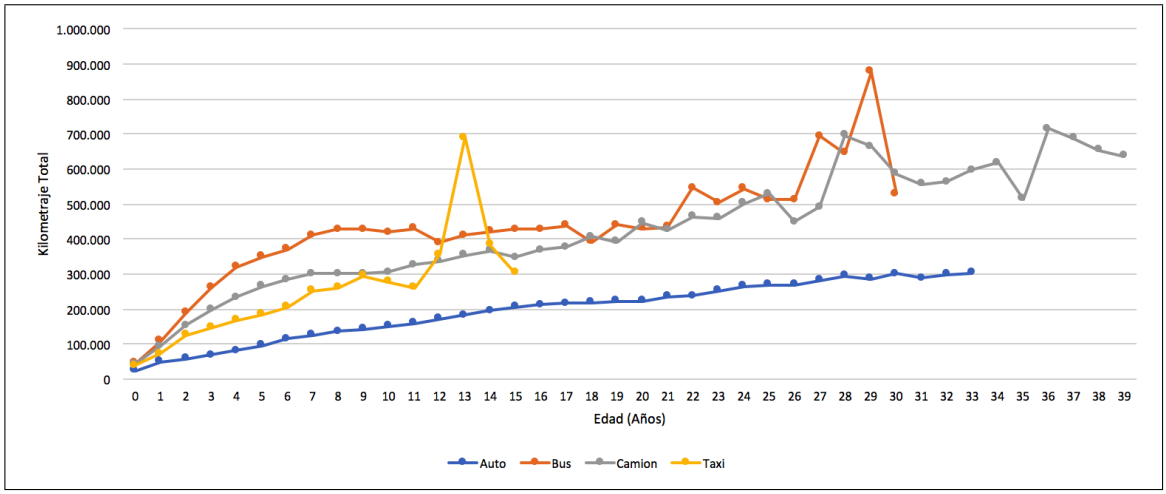

Figura 5.1. Kilometrajes totales acumulados en función de la edad del vehículo

De los perfiles anteriores, se debe notar también que no todos los tipos de vehículos llegan a los 39 años de edad. Los datos para kilometrajes tan viejos se desvían de la tendencia y, sobretodo para los vehículos de transporte público sobre 30 años de edad, existen edades para las cuales no hay información (entradas vacías). Se destaca, además, que claramente el kilometraje de los taxis de 13 años de edad se desvía de la tendencia.

5.3.3. Kilometrajes anuales

Se pueden calcular los kilometrajes anualmente recorridos utilizando los kilometrajes acumulados mostrados anteriormente. Supongamos que D_t^k representa el kilometraje total de un vehículo de tipo k y de edad T, y d_t^k representa su distancia anual recorrida. La primera opción que se viene a la mente es calcular d_t^k de la siguiente forma:

$$d_T^k = D_T^k - D_{T-1}^k \tag{5.1}$$

Al calcularlos de ésta forma, destacan los siguientes puntos que se pueden apreciar en la Figura 5.2:

- Existen numerosas observaciones para las cuales la distancia anual recorrida es negativa, lo cual no tiene sentido.
- Se aprecia una constante alternancia entre distancias positivas y negativas.
- Solo al principio se aprecia una tendencia decreciente del kilometraje anual recorrido.

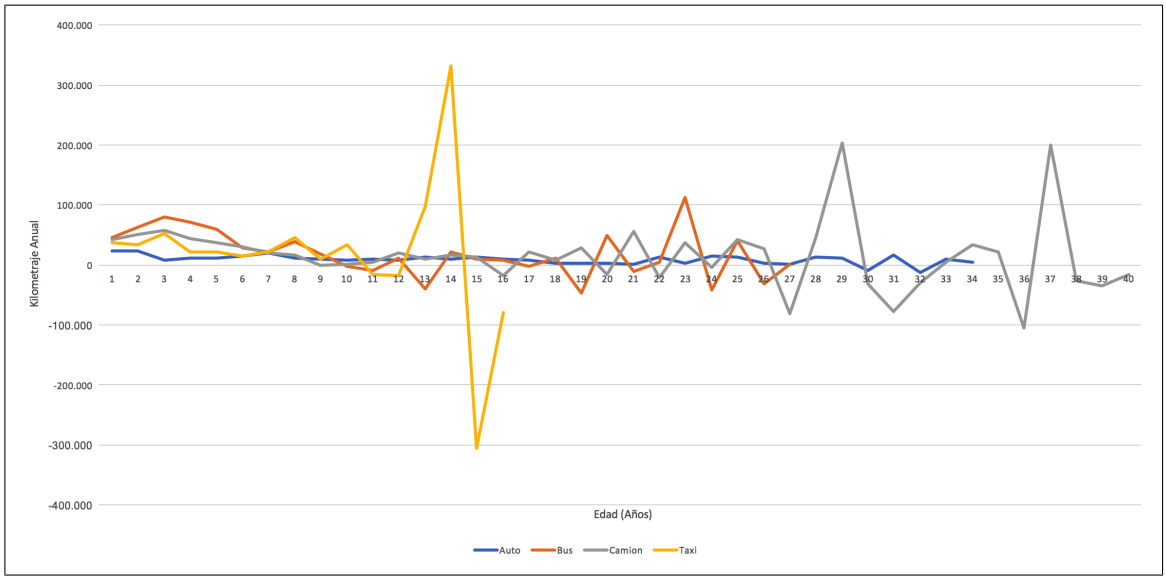

Figura 5.2. Kilometrajes acumulados en función de la edad del vehículo

En vista de lo anterior, se ajustará al kilometraje total una curva polinómica, con el fin de evitar los problemas mencionados en los dos primeros puntos anteriores, conservando el tercero. Para conservar la tendencia inicial, se mantienen los kilometrajes anuales de los primeros cinco años y luego se comienza a utilizar el kilometraje anual ajustado. Las curvas ajustadas se observan en la Figura 5.3 y, con esto, las distancias recorridas anualmente por cada tipo de vehículo estarán dadas por los perfiles que se observan en la Figura 5.4.

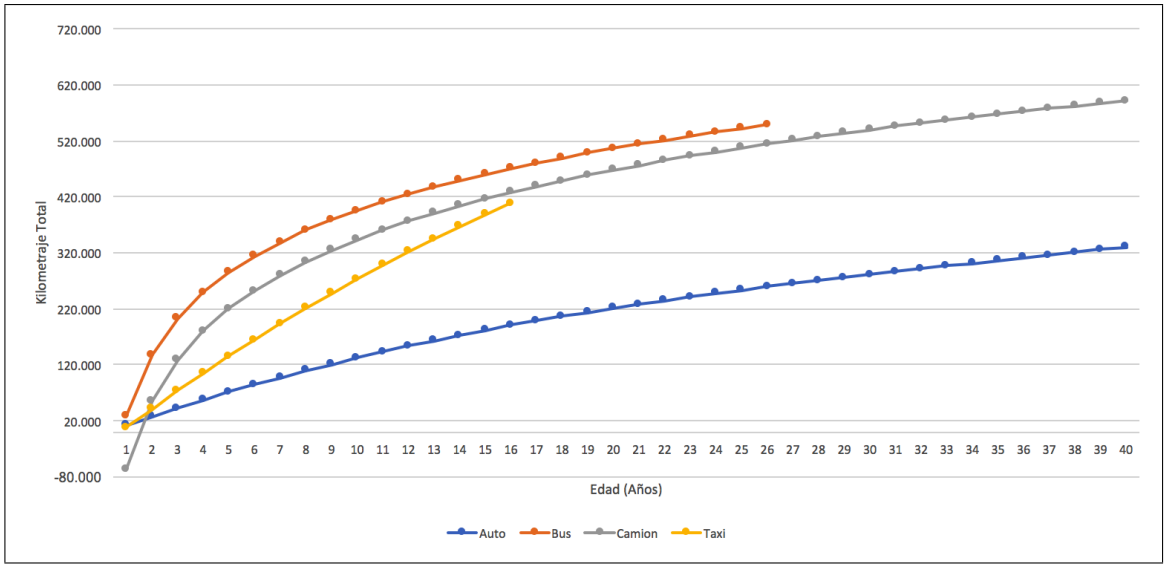

Figura 5.3. Kilometrajes acumulados ajustados en función de la edad del vehículo

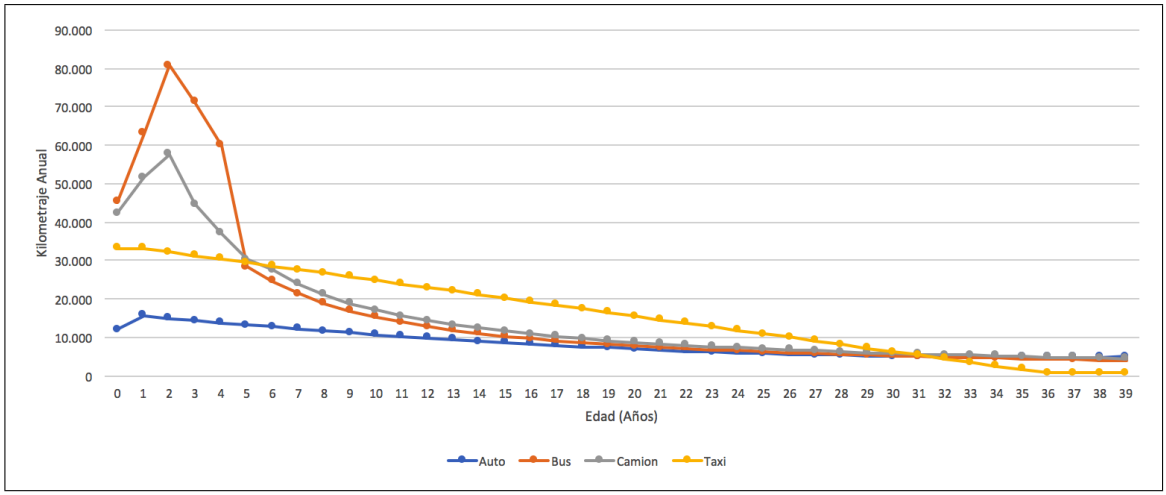

Figura 5.4. Kilometrajes anuales ajustados en función de la edad del vehículo

Las distancias recorridas, para cada tipo de vehículo, se extienden hasta la edad 40. Para el último año modelado del kilometraje total, se asignó a los años siguientes la distancia correspondiente a la recorrida en el último año modelado.

Con todo lo anterior, es posible calcular los veh-km recorridos por el parque vehicular, para luego asignar factores de emisión y obtener así las proyecciones de emisiones de contaminantes.

5.4. Vehículos - Kilómetros Recorridos por el Parque

5.4.1. Resultados obtenidos

Se asigna, a cada vehículo, la distancia anual recorrida en función de su edad, d_T^k. Luego, la distancia anual recorrida por vehículos de tipo k, en el año t, será igual a:

$$d_t^k = \sum_T d_{t,T}^k * X_{t,T}^k \tag{5.2}$$

donde $X_{t,T}^k$ representa la cantidad de vehículos tipo k, de edad T, en el año t de la simulación. Se recuerda que el modelo es capaz de diferenciar a los vehículos bajo las distintas normativas EURO existentes. Por lo tanto, se pueden obtener fácilmente las distancias totales recorridas en un año por los vehículos de tipo k, de categoría tecnológica i, en el período t:

$$d_t^{i,k} = \sum_T d_{t,T}^{i,k} * X_{t,T}^k \tag{5.3}$$

Al aplicar el mismo procedimiento para todos los años de evaluación, y para todos los tipos de vehículos se obtienen los perfiles que muestran los niveles de actividad del parque de vehículos particulares de la Figura 5.5. Se observa que las distancias van aumentando conforme pasa el tiempo, lo cual tiene sentido puesto que el parque vehicular se encuentra en crecimiento. El caso de buses y camiones es análogo y las distancias se pueden ver en la Figura 5.6.

En el caso de los taxis, puesto que el parque se mantiene aproximadamente constante a lo largo del tiempo, sucede lo mismo con sus distancias recorridas tal y como se observa en la Figura 5.7.

Otro elemento interesante de analizar consiste en examinar en qué proporción varían los vehículos - kilómetro recorridos por el parque frente a las variaciones del parque. Para esto se determina la variación del parque vehícular y de los vehículos - kilómetro

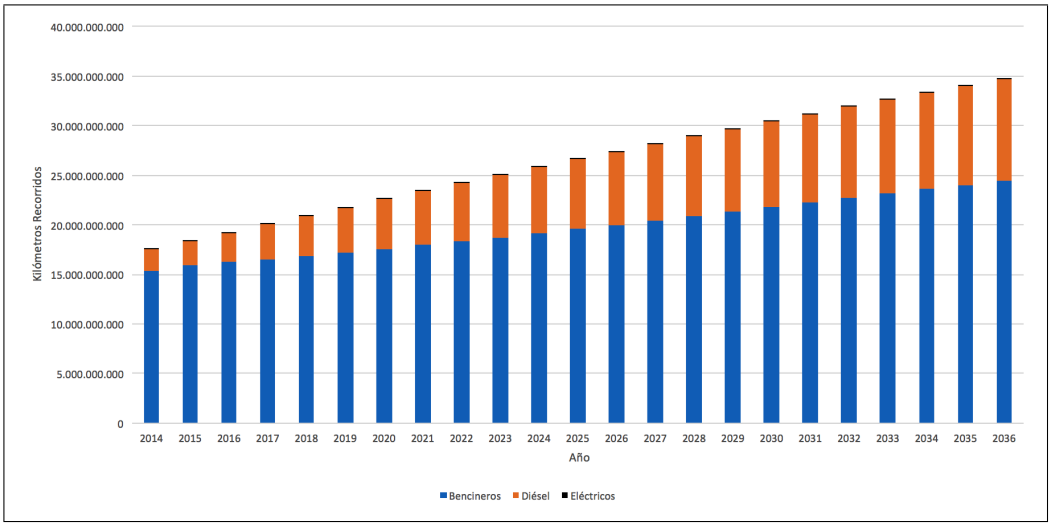

Figura 5.5. Vehículos - kilómetros recorridos por vehículos particulares

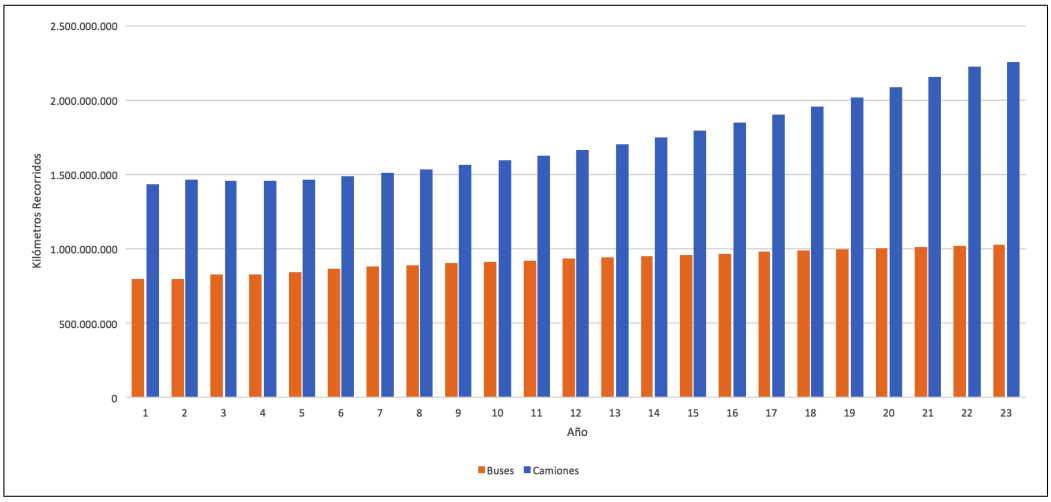

Figura 5.6. Vehículos - kilómetros recorridos por buses y camiones

recorridos, mediante las ecuaciones (5.4) y (5.5). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.8.

$$\delta_{X_t^k} = \frac{X_t^k}{X_0^k} \tag{5.4}$$

$$\delta_{d_t^k} = \frac{d_t^k}{d_0^k} \tag{5.5}$$

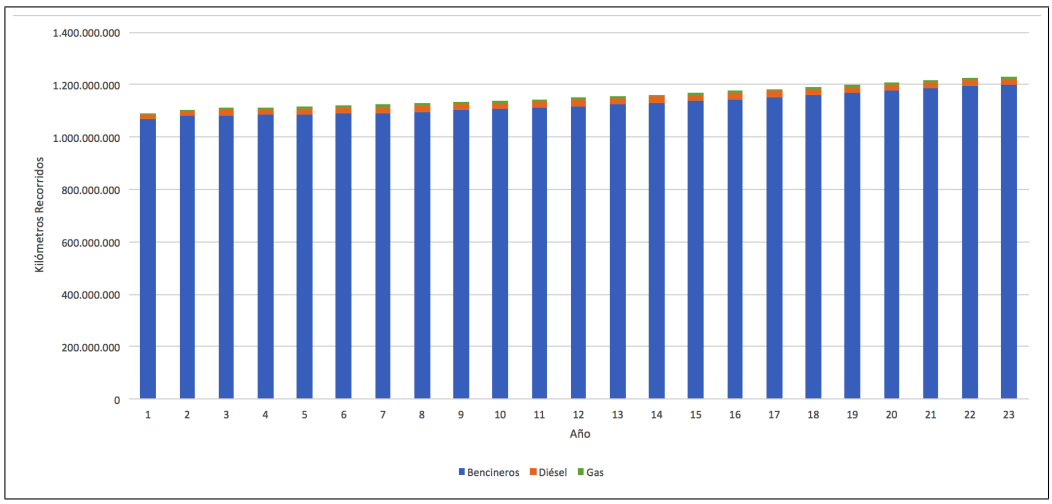

Figura 5.7. Vehículos - kilómetros recorridos por taxis

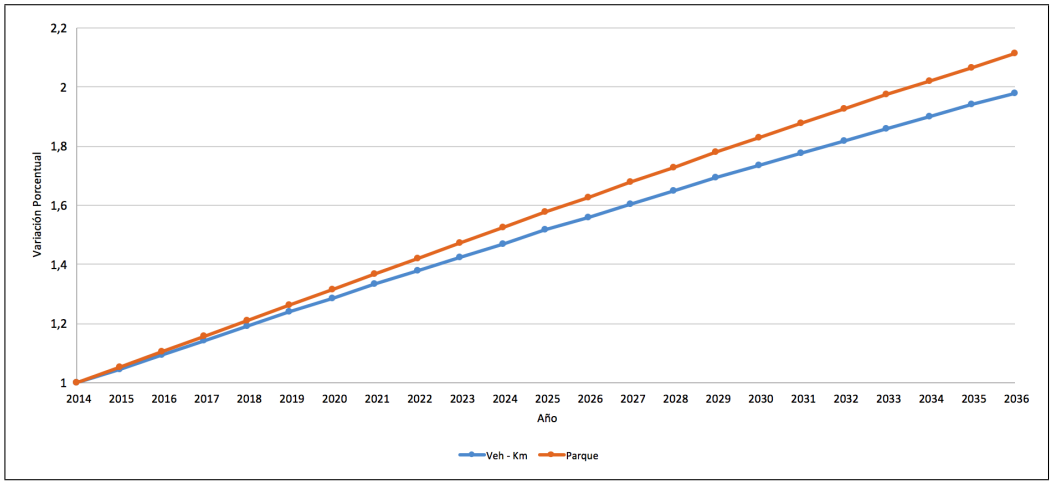

Figura 5.8. Variación porcentual de vehículos - kilómetros y del parque en la simulación

El resultado obtenido es en efecto esperable. El parque vehícular envejece y, puesto que los vehículos más viejos recorren menos km que los vehículos nuevos, resulta lógico que las distancias recorridas aumenten en menor medida que como lo hace el parque vehicular.

5.4.2. Comparación de resultados con proyecciones de SECTRA

Para verificar la consistencia de los resultados obtenidos en el apartado anterior, resulta interesante compararlos con las estimaciones de los niveles de actividad (veh-km

recorridos) del parque vehicular del Gran Santiago de acuerdo a un estudio independiente. En la Tabla 5.2 se presentan, para el año 2010, los cálculos de los vehículos - kilómetro recorridos por el parque del Gran Santiago de acuerdo a SECTRA (2016).

Tabla 5.2. Niveles de Actividad del Parque Vehicular al Año 2010

Tipo de Vehículo	Vehículos - Kilómetro
Auto	13.904.472.929
Bus	691.758.650
Taxi	1.133.278.577

Fuente: SECTRA (2016)

Se debe destacar que SECTRA no provee información sobre las distancias totales recorridas por los camiones.

Para llevar estos valores al año base de la simulación, el año 2014, es necesario multiplicarlos por la variación porcentual del parque vehicular entre los años 2010 y 2014, de acuerdo a la ecuación (5.6). Se sabe que los veh- km recorridos por el parque aumentan en menor proporción que el parque; sin embargo, en un lapso de cuatro años la diferencia es despreciable.

$$D^k_{SECTRA,2014} = D^k_{SECTRA,2010} * \frac{X^k_{2014}}{X^k_{2010}} \tag{5.6}$$

Los valores actualizados, junto a los kilometrajes obtenidos por nuestro modelo y las diferencias entre ambos conjuntos de valores se encuentran en la Tabla 5.3. Como se puede observar, las diferencias entre ambas estimaciones no son significativas, y esto es un buen indicativo de las estimaciones realizadas sobre las distancias recorridas por el parque vehicular.

Tabla 5.3. Comparación entre Niveles de Actividad Estimados por SECTRA y el Modelo

Tipo de Vehículo	SECTRA	Modelo	Diferencia
Auto	17.286.354.005	17.564.412.568	1,61 %
Bus	730.676.764	796.166.021	8,96 %
Taxi	1.142.644.735	1.090.608.050	-4,55 %

6. PROYECCIÓN DE EMISIONES LOCALES DEL PARQUE VEHICULAR

Se deben distinguir los dos tipos de emisiones que se proyectarán en el presente estudio. En este capítulo se hablará de emisiones de tipo local, las cuales difieren de las emisiones de tipo global.

La principal diferencia entre ambas radica en el hecho que no importa donde se generen las emisiones globales, puesto que su efecto es homogéneo a nivel global. Es decir, la emisión de un contaminante global genera el mismo efecto si fue emitido en el hemisferio norte o en el hemisferio sur. En cambio, los contaminantes locales generan impactos en zonas y espacios acotados y, por lo tanto, importa el lugar de emisión ya que los principales efectos serán visibles ahí mismo.

6.1. Contaminantes Locales Considerados

Los contaminantes locales considerados en este modelo son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx) y finalmente el material particulado de 2,5 micrometros (PM2.5). Las razones que justifican el estudio de las emisiones de estos contaminantes son las siguientes:

- CO: Si bien las emisiones de este contaminante son bajas y a nivel ciudad no presentan mayor peligrosidad, este gas es sumamente tóxico para el ser humano, por lo que sus patrones de emisión deben ser controlados en el tiempo. El CO es un gas incoloro e inodoro que suplanta al oxigeno en la sangre, por lo que con inhalaciones suficientes puede generar muerte por envenenamiento (EPA, 2016a).
- NOx: Es uno de los contaminantes generados en mayor cantidad por el parque vehicular. En el aire, junto a las demás partículas en suspensión (PM2.5 entre otros) contribuye fuertemente a la formación de *smog*, el cual puede tomar tonos rojizos en los atardeceres (GreenFacts, 2016).

- PM2.5: Es una mezcla de particular sólidas y liquidas expulsadas por el tubo de escape de los vehículos. El PM2.5 cuenta a todas las partículas cuyo diámetro sea inferior a las 2.5 micrómetros. Estas pueden generar efectos directos en la población tales como problemas respiratorios, arritmias e irritación, entre otras (AirNow.gov, 2016).

Los motores empleados por los vehículos del parque emiten muchos otros contaminantes, como por ejemplo Hidrocarburos (HC), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y pequeñas cantidades de Azufre, entre otros. Estos últimos no se considerarán, pero calcular sus emisiones no es tarea difícil.

6.2. Factores de Emision

Los factores de emisión permiten asignar las emisiones de contaminantes al parque vehicular. Los factores utilizados en este modelo se han obtenido del Modelo COPERT V (COPERT, 2014).

6.2.1. Modelo COPERT V

El Modelo COPERT V es un modelo computacional que permite estimar las emisiones de contaminantes por parte del sector transporte. Este modelo se desarrolla en el año 1989, apoyado por la *European Environment Agency* (EEA) bajo el marco de las actividades del *European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation*.

El Modelo COPERT V utiliza metodologías de cálculo de las emisiones en función de la disponibilidad de información. Existen tres grandes metodologías; *Tier 1, Tier 2* y *Tier 3*, y cada una de ellas requiere, respectivamente, de mayor información. El diagrama de flujo que COPERT plantea para elegir la metodología más adecuada se aprecia en la Figura 6.1.

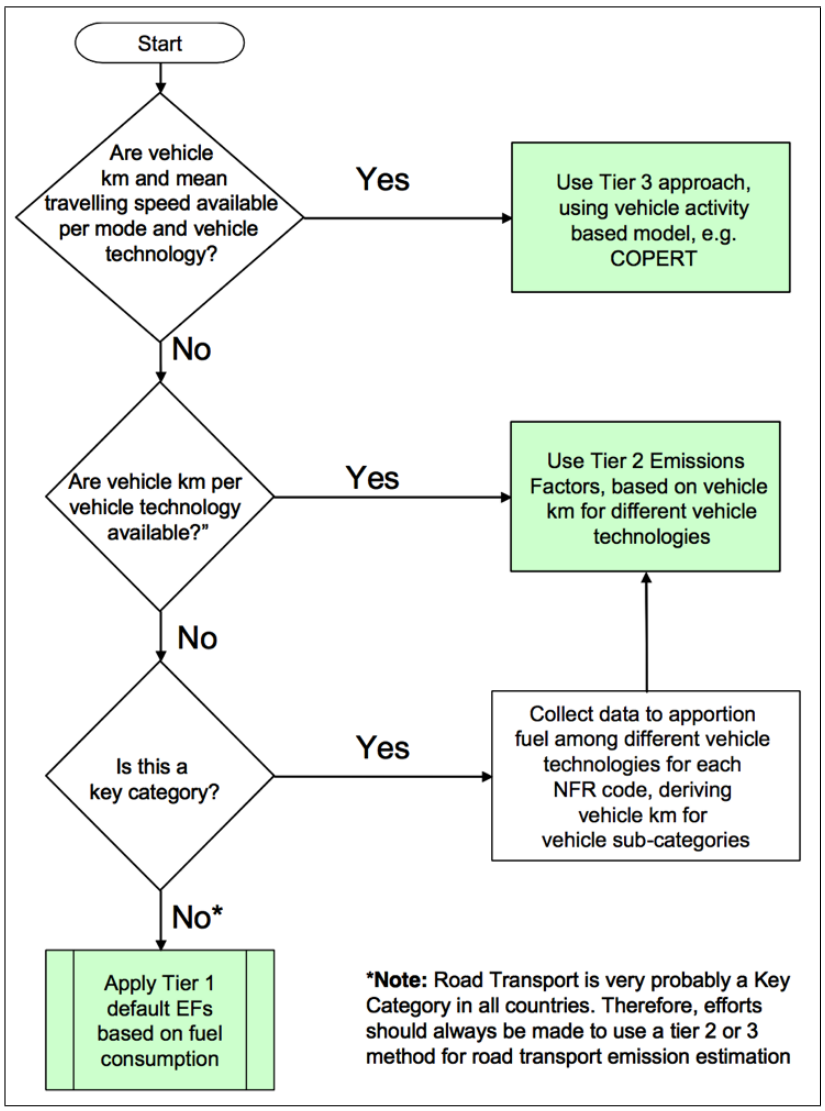

Figura 6.1. Diagrama de flujo para elección metodología de cálculo
Fuente: COPERT (2014)

En este caso, puesto que se poseen los kilometrajes vehiculares según tipo de vehículo y categoría tecnológica se empleará la metodología *Tier 2*.

6.2.2. Metodología y factores de emisión

Los factores de emisión nos permitirán asignar las emisiones de contaminantes al parque vehicular. En particular, los factores de emisión de contaminantes locales están expresados en términos de $[g/km]$, por lo que para determinar las emisiones sólo se debe realizar el siguiente cálculo:

$$E_{j,t}^{i,k} = d_t^{i,k} * F_j^{i,k} \tag{6.1}$$

en que E_t^k representa la emisión del contaminante j, por el tipo de vehículo k en el período t, en unidades de $[g]$. Bajo esta metodología, se requieren los siguientes supuestos:

- Dentro de una normativa i, las emisiones son las mismas independientemente de la edad del vehículo.
- Las emisiones no dependen de la forma de conducción, si no que solo de la distancia recorrida.

Ambas hipótesis no suponen problemas, puesto que los factores de emisión que serán utilizados corresponden a valores derivados de factores más complejos, que si son funciones de otras variables tales como la velocidad de circulación de los vehículos en la red. Estos últimos factores se emplean en la metodología *Tier 3*, y los valores que se utilizan en este estudio son derivados de los anteriores.

En base a lo anterior, en la Tabla 6.1 se presentan los factores de emisión para los vehículos particulares, en función del tipo de combustible y categoría tecnológica. Si se observa con detención la tabla, se pueden desprender las siguientes observaciones:

- Las normativas más antiguas son notoriamente más contaminantes que las más recientes.
- Existen casos en que la norma EURO 6 es ligeramente más contaminante que la EURO 5, sin embargo los niveles siguen siendo muy inferiores a los de las normas anteriores.

- Para el caso del NOx, y combustible diésel, el factor de emisión aumenta y llega a su máximo en el EURO 3 para luego comenzar a descender. Esto se debe a que a a partir de la norma EURO 3 se comenzó a medir las emisiones NOx de forma separada a los HC. Antes se evaluaban las emisiones conjuntas $NOx + HC$.
- El factor de emisión de NOx en EURO 5 es superior al de EURO 4 para vehículos particulares diesel, dado que se considera el deterioro acelerado por urea. La normativa EURO 6 aumenta su exigencia en este aspecto y por ende disminuyen sus emisiones por kilómetro.

Tabla 6.1. Factores de Emisión para Vehículos Particulares con Motor de $1{,}400$ a $2{,}000cc$ en $[g/km]$

	CO	NOx	PM2.5
Bencinero - S/N	$21,7$	$2,4$	$0,0022$
Bencinero - Euro 1	$3,92$	$0,485$	$0,0022$
Bencinero - Euro 2	$2,04$	$0,255$	$0,0022$
Bencinero - Euro 3	$1,82$	$0,097$	$0,0011$
Bencinero - Euro 4	$0,62$	$0,061$	$0,0011$
Bencinero - Euro 5	$0,62$	$0,061$	$0,0014$
Bencinero - Euro 6	$0,62$	$0,061$	$0,0016$
Diesel - S/N	$0,688$	$0,546$	$0,2209$
Diesel - Euro 1	$0,414$	$0,690$	$0,0842$
Diesel - Euro 2	$0,296$	$0,716$	$0,0548$
Diesel - Euro 3	$0,089$	$0,773$	$0,0391$
Diesel - Euro 4	$0,092$	$0,580$	$0,0314$
Diesel - Euro 5	$0,040$	$0,610$	$0,0021$
Diesel - Euro 6	$0,049$	$0,110$	$0,0015$
Gas	$0,616$	$0,056$	$0,0011$
Eléctrico	0	0	0

Fuente: COPERT (2014)

Los valores de los factores de emisión son superiores en algunos casos a lo estipulado por los estándares de emisión EURO; y esto se debe principalmente a que estos factores son obtenidos mediante mediciones en ruta (valores reales y no teóricos). Los factores de emisión de buses y camiones se encuentran en las tablas A.1 y A.2 del Anexo 1.

6.2.3. Elementos no considerados en la metodología

En la metodología expuesta en los apartados anteriores, se estiman las emisiones de contaminantes en base al funcionamiento en caliente de los motores - del inglés *hot exhaust emissions*. Esto quiere decir que las emisiones se calculan en base al funcionamiento real de los vehículos, pero con sus motores en temperatura de operación. Se considera, además, que los vehículos no emitirán de distinta forma en función de su estado o deterioro.

Así, el presente análisis no considera las emisiones debidas a las partidas en frío de los motores y tampoco considera el factor de deterioro de éstos.

6.3. Perfiles de Emisión de Contaminantes Locales

En los siguientes apartados se muestran los perfiles de emisión de contaminantes del parque vehicular modelado a lo largo de la simulación.

6.3.1. Monóxido de carbono

En los gráficos de la Figura 6.2 se muestran las emisiones de CO por parte de los vehículos particulares bencineros (arriba) y diésel (medio). Se muestra, además, el total de emisiones de CO por parte de éstos y la participación de cada uno de los tipos de combustibles. En cada gráfico, la línea - a diferencia de las barras - indica el nivel de actividad del parque es decir, los vehículos - kilómetro recorridos por aquél tipo de vehículo.

De los gráficos, se puede apreciar que:

- Las emisiones de CO presentan una tendencia a la baja para los vehículos particulares bencineros y un alza para los diésel.
- La baja de emisiones por parte de los bencineros se debe a la renovación de las tecnologías más antiguas cuyos factores de emisión son más elevados que los de los vehículos más nuevos.

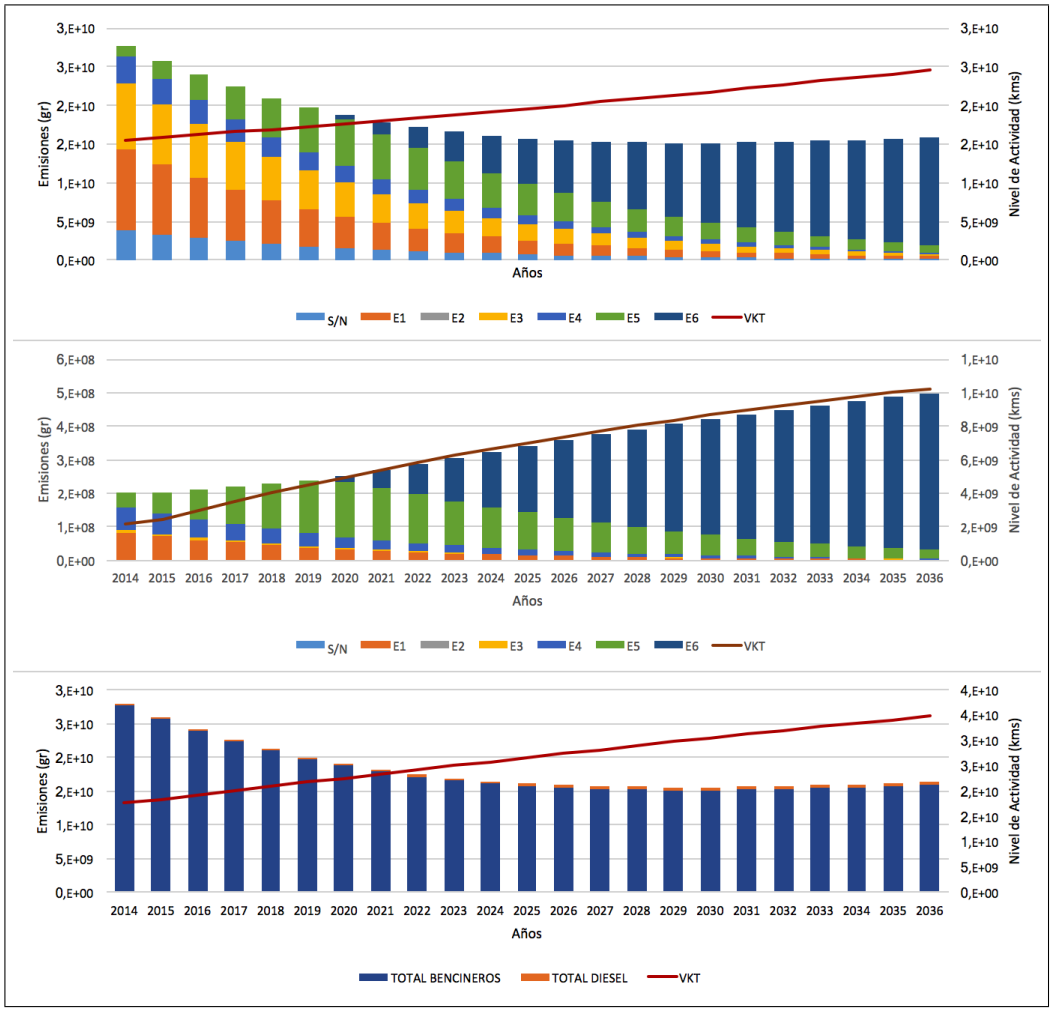

Figura 6.2. Emisiones de CO de vehículos particulares bencineros y diésel

- El aumento de las emisiones de los vehículos diésel se debe a que sus factores de emisión no prensentan tanta variación entre tecnologías como lo hacen los bencineros. Por ello, el aumento del parque supera la disminución de los factores de emisión.
- Las emisiones por parte de los vehículos bencinero superan en dos órdenes de magnitud a la de los diésel, causando que el total de emisiones presente la misma tendencia que los vehículos bencineros; es decir a la baja.

- A pesar de que los niveles de actividad del parque aumentan con el tiempo, las emisiones de CO tienden a la baja. Esto se atribuye netamente a una ganancia tecnológica.

Para el caso de los buses (arriba) y camiones (abajo), los perfiles obtenidos se observan en la Figura 6.3. Las emisiones de los buses presentan un descenso inicial de 35 %, aún a pesar del hecho que su parque está creciendo lentamente y sus vehículos - kilómetro recorridos también aumenten. Esto se explica por que los factores de emisión anteriores al EURO 4 son muy altos ($2,xxxg/km$ para las normativas antiguas versus $0,2xxg/km$ para EURO 4 en adelante). Luego de haberse renovado las tecnologías más antiguas, las emisiones se estabilizan (puesto que los factores de emisión de los vehículos EURO 4, 5 y 6 son los mismos, por lo cual las emisiones siguen el perfil de sus vehículos - kilómetro recorridos).

En el caso de los camiones, las emisiones presentan una fuerte baja hasta el año 2030. Las razones de esto son análogas; las emisiones de camiones con tecnologías más nuevas son considerablemente menores que las de camiones más antiguos. Luego del año 2030, como el parque de camiones sigue creciendo y las emisiones por kilómetro recorrido son las mismas, éstas vuelven al alza.

Luego, los perfiles de emisión de contaminantes para los taxis bencineros (arriba), diesel (centro) son los que se aprecian en la figura 6.4, donde el tercer gráfico presenta el total emitido por ellos. Como se puede ver, las emisiones totales disminuyen hasta el año 2020 para luego mantenerse constantes. Notemos que esta es la misma tendencia que presentan los taxis bencineros, lo que es lógico dado que un 97 % de los taxis usa este combustible. Luego, las emisiones totales se mantienen, y esto es razonable pues los vehículos - kilómetro recorridos también son prácticamente constantes, y los factores de emisión para los vehículos bencineros EURO 4, 5 y 6 son idénticos. Se aprecia una baja en las emisiones por parte de los taxis diésel en un comienzo para luego volver a crecer y estabilizarse. Esto se debe a que en un principio se eliminan los vehículos viejos y luego,

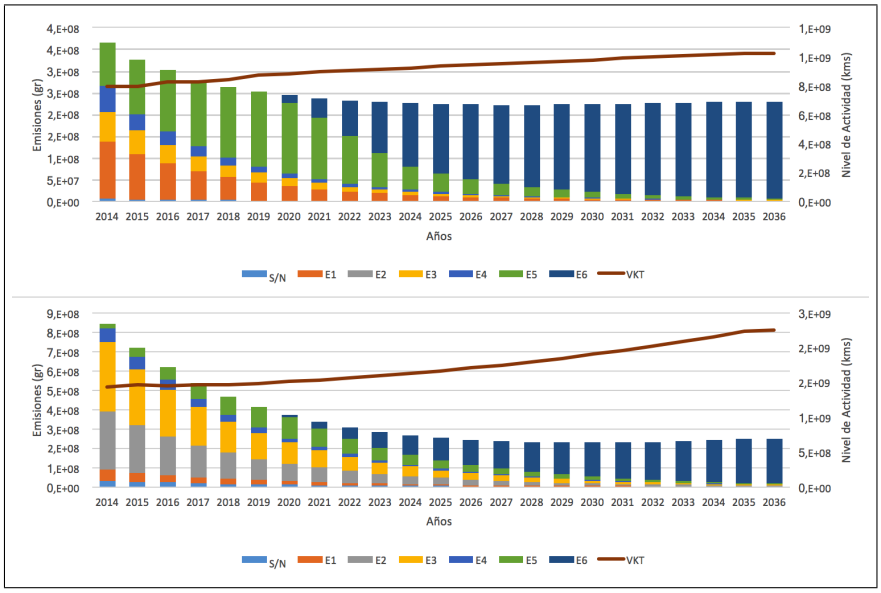

Figura 6.3. Emisiones de CO de buses y camiones

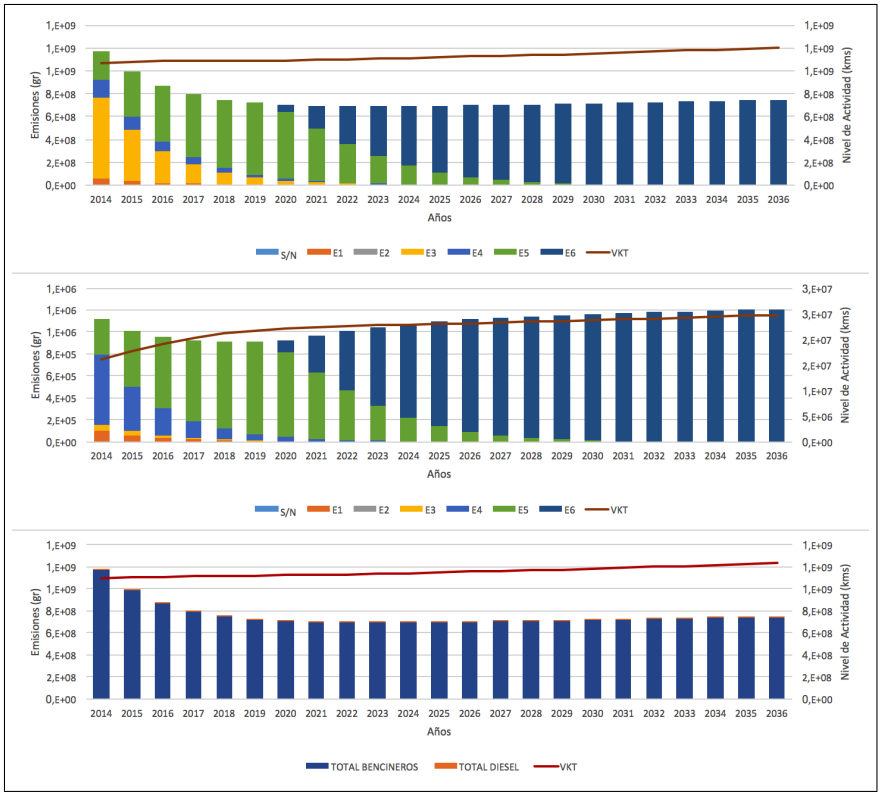

Figura 6.4. Emisiones de CO de taxis

puesto que el parque de vehículos diésel presenta un leve crecimiento, también lo hacen sus emisiones.

Finalmente, nos parece interesante destacar que, en términos generales, por las razones discutidas, las emisiones de los taxis tienden a la baja a pesar del hecho que su nivel de actividad es constante a lo largo del tiempo. Esto parece razonable, sobretodo teniendo en cuenta que la renovación del parque de taxis es rápida; por lo que los vehículos más contaminantes son rápidamente retirados de circulación.

Luego, las emisiones totales de CO del parque vehicular son las que se observan en la Figura 6.5; se aprecia que, en general, la tendencia de las mismas es a la baja. De hecho, la disminución luego de 15 años es de 40 % aproximadamente. Sin embargo, resulta relevante destacar que luego de un fuerte descenso dado por el reemplazo de tecnologías más contaminantes por nuevas más limpias, la tendencia de las emisiones vuelve al alza.

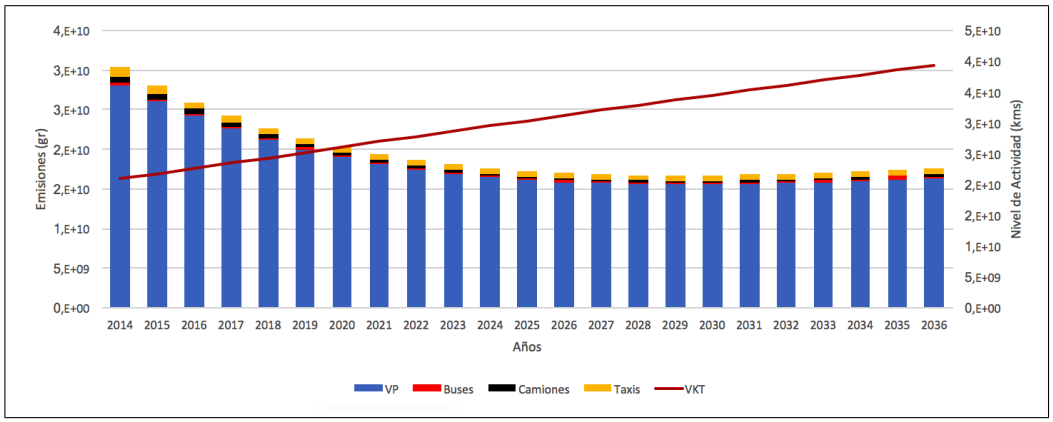

Figura 6.5. Emisiones totales de CO del parque vehicular.

6.3.2. Óxidos de nitrógeno

En la Figura 6.6 se muestran las emisiones de NOx por parte de los vehículos particulares bencineros (arriba) y diésel (medio). Se muestra, además, el total de emisiones de NOx por parte de éstos y la participación de cada tipo de combustible. Igual que antes, en

cada gráfico la línea - a diferencia de las barras - indica el nivel de actividad del parque, es decir, los vehículos - kilómetro recorridos.

Figura 6.6. Emisiones de NOx de vehículos particulares bencineros y diésel

De los gráficos se aprecia que:

- Las emisiones de NOx presentan una tendencia a la baja para los vehículos particulares bencineros a pesar de que los vehículos - kilómetro recorridos aumentan.
- En cuanto a los vehículos diésel, se observa en principio un crecimiento y luego un decrecimiento de las mismas. Esto se debe únicamente a que el factor de emisión de NOx es superior para la norma EURO 5 que para la norma EURO 6.

- En un comienzo el total de emisiones de NOx es superiores para los vehículos bencineros que para los diésel. Luego, esto logra equilibrarse hacia el término de la simulación. Notemos que a pesar de que el parque de vehículos diésel es cerca de tres veces inferior al de los bencineros, su cuota de participación es equiparada.

Para el caso de los buses (arriba) y camiones (abajo), los perfiles obtenidos son los que se observan en la Figura 6.7.

Figura 6.7. Emisiones de NOx de buses y camiones

Tanto las emisiones de buses como de camiones presentan la misma tendencia a la baja. En este caso, el descenso de las emisiones se mantiene hasta el final de la simulación, notando que comienzan a estabilizarse en los últimos tres años.

Los perfiles de emisión de contaminantes para los taxis bencineros (arriba) y diesel (centro) son los que se aprecian en la Figura 6.8, donde el tercer gráfico presenta el total emitido por ellos. Dado que el parque de taxis se renueva de forma acelerada en comparación a los otros vehículos, no se aprecian mayores disminuciones en el parque de taxis bencineros. Respecto a los taxis diésel, se replica lo observado en los vehículos particulares diésel dado que el factor de emisión EURO 5 es superior al EURO 6. Las emisiones

totales de NOx de los taxis disminuyen levemente, manteniéndose constantes a lo largo del tiempo. Por lo tanto, la ganancia bajo concepto de avance tecnológico es baja.

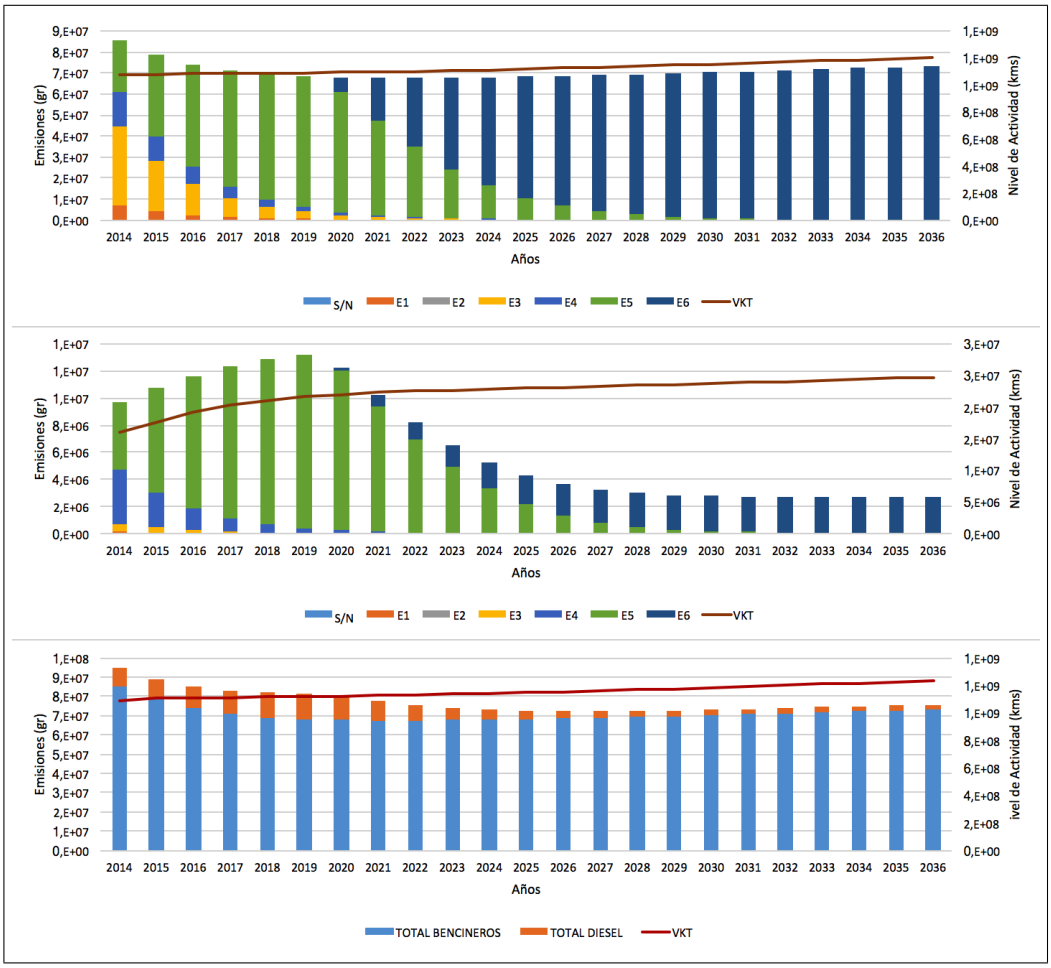

Figura 6.8. Emisiones de NOx de taxis

Las emisiones totales de NOx del parque vehicular se observan en la Figura 6.9, y se aprecia que en general la tendencia es a la baja, mostrando signos de estancamiento pasado el año 2030. Sin embargo, las ganancias por avance tecnológico son notorias; las emisiones al cabo de 20 años se reducen a un tercio, a pesar del hecho que los niveles de actividad se ven duplicados. Se debe destacar que la disminución general de las emisiones es de 67 % al año 2036.

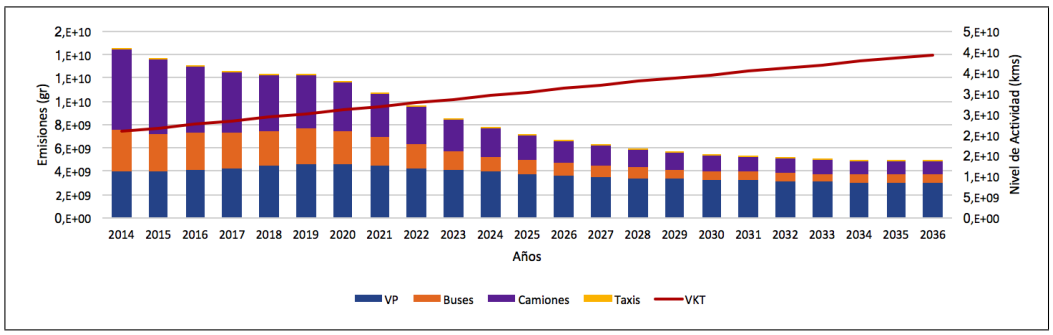

Figura 6.9. Emisiones totales de NOx del parque vehicular

Sin embargo, se nota también que hacia finales de la simulación los vehículos particulares son el tipo de vehículo que más emitirá óxidos de nitrógeno. Resulta notoria la disminución de las emisiones totales de buses y camiones, y gran parte de la disminución total de las emisiones de NOx se atribuye a este hecho.

6.3.3. Material particulado

En los gráficos de la Figura 6.10 se muestran las emisiones de PM2.5 por parte de los vehículos particulares bencineros (arriba) y diésel (medio). Se muestra, además, el total de emisiones de PM2.5 por parte de éstos y la participación de cada tipo de combustible. Para cada gráfico nuevamente, la línea - a diferencia de las barras - indica el nivel de actividad del parque es decir, los vehículos - kilómetro recorridos.

De los gráficos de la Figura 6.10 se aprecia que:

- Las emisiones de PM2.5 crecen paulatinamente para los vehículos particulares bencineros. Este crecimiento se da a un ritmo levemente superior que el de los niveles de actividad. Esto se debe a que los factores de emisión de PM2.5 son superiores para la normativa EURO VI que para la EURO V (y la EURO V es superior a la EURO IV también).

Figura 6.10. Emisiones de PM2.5 de vehículos particulares bencineros y diésel

- En cuanto a los vehículos diésel, se observa que sus emisiones disminuyen con el tiempo para luego estabilizarse. Esto es un efecto esperado, pues los vehículos diésel antiguos son altamente contaminantes.
- En total las emisiones de PM2.5 disminuyen durante los primeros 10 años. Luego vuelven al alza debido principalmente a que los bencineros y diésel no disminuyen su factor de emisión (no existe una normativa más exigente). Por ende, sería esperable que en el largo plazo las emisiones continuen aumentando al mismo ritmo que los niveles de actividad de estos vehículos.

- Se observa también que hoy en día la mayor parte (2/3) del material particulado proviene de los diésel, pero que con la renovación y nuevas tecnologías el diésel pasará a emitir menos (en términos absolutos) que los bencineros.

Para el caso de los buses (arriba) y camiones (abajo), los perfiles obtenidos se aprecian en la Figura 6.11.

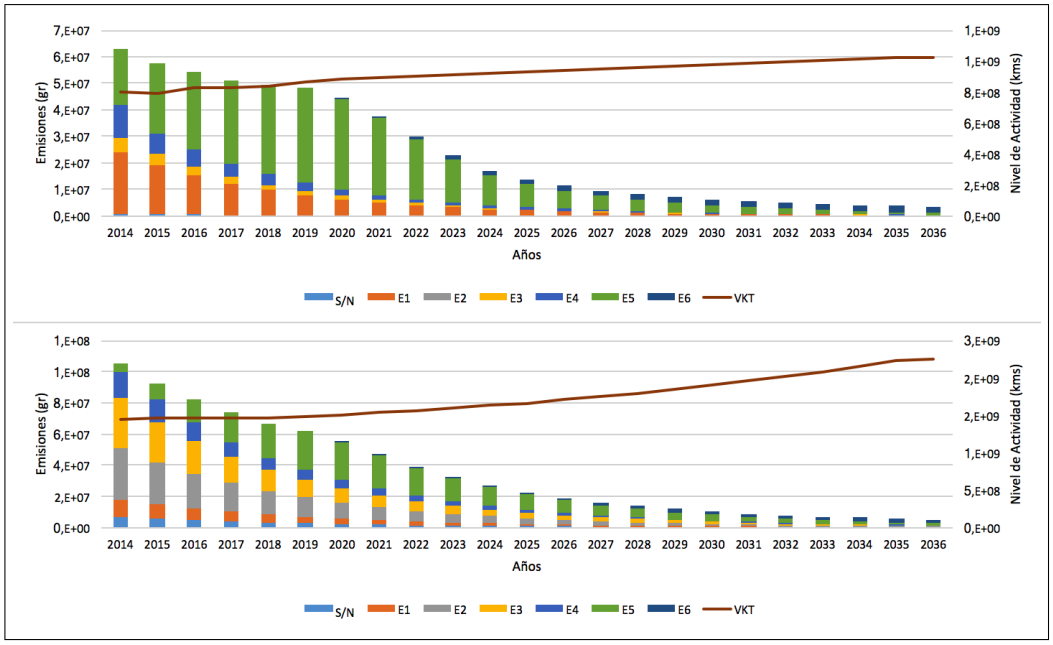

Figura 6.11. Emisiones de PM2.5 de buses y camiones

Es posible notar que tanto las emisiones de buses como las de camiones presentan la misma tendencia a la baja. En este caso, el descenso de las emisiones se mantiene hasta el final de la simulación, notando que comienzan a estabilizarse en los últimos tres años. Resulta destacable también notar que la introducción de la normativa EURO 6 en el año 2020 es la causa de una gran disminución en las emisiones, y en el período 2020 - 2036 su participación en las emisiones es mínima.

Los perfiles de emisión de contaminantes para los taxis bencineros (arriba), diesel (centro) se aprecian en la Figura 6.8, donde el tercer gráfico presenta el total emitido por

ellos. Respecto a los taxis bencineros, la tendencia es similar a la de los vehículos particulares bencineros. Respecto a los taxis diésel, se replica lo observado en los vehículos particulares diésel; esto es, fuertes disminuciones en las emisiones.

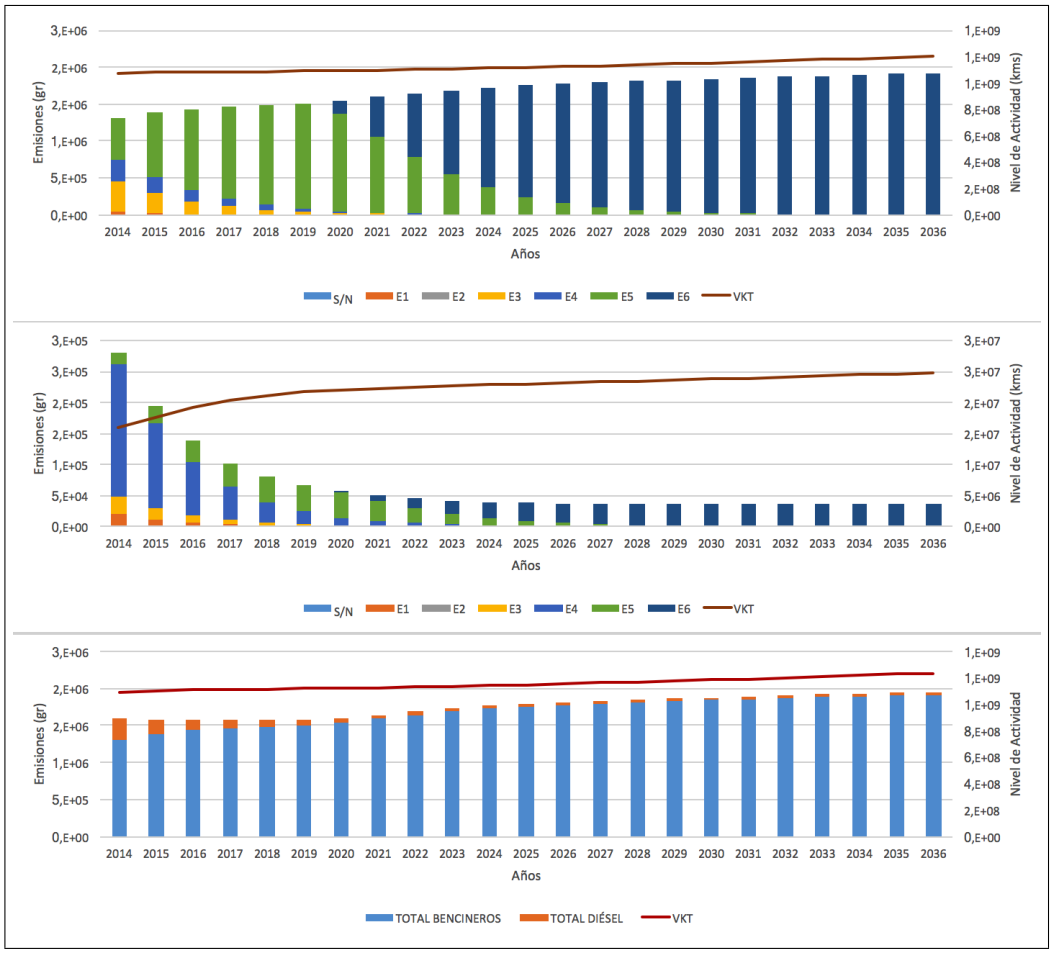

Figura 6.12. Emisiones de PM2.5 de taxis

Con todo lo anterior, las emisiones totales de PM2.5 del parque vehicular son las que se observan en la Figura 6.13. Se aprecia que, en general, la tendencia es a la baja, mostrando signos de estancamiento pasado el año 2030. La disminución de las emisiones de PM2.5, a pesar del aumento de los niveles de actividad del parque, es de 70 %, principalmente dado por la disminución de las emisiones de buses y camiones.

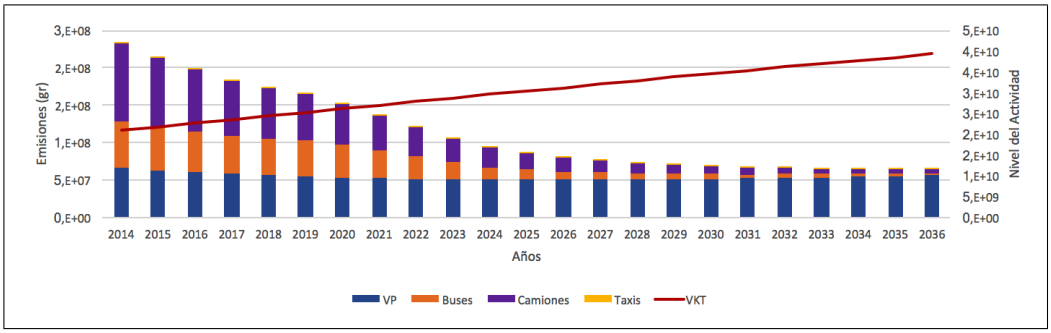

Figura 6.13. Emisiones totales de PM2.5 del parque vehicular

6.4. Comentarios Generales

En las gráficas anteriores se puede apreciar que las emisiones de CO, NOx y PM2.5 presentan una tendencia a la baja a lo largo de la simulación. Esto, sin lugar a dudas, constituye una noticia alentadora para el Gran Santiago, sobretodo teniendo en cuenta las numerosas dificultades que presenta su población en los recurrentes episodios críticos invernales.

No obstante, los resultados anteriores dejan clara una nota de alerta. Las emisiones no disminuirán si no se introducen regularmente nuevos estándares y exigencias de emisiones. Esto se debe a que el parque se encuentra en crecimiento y sus niveles de actividad también. Por ejemplo, ante situaciones de mayor crecimiento económico aumentaría el parque de vehículos particulares y camiones. Ante crecimientos demográficos, lo harían también los parques de buses y taxis. Soluciones tales como la incorporación de vehículos eléctricos - que al menos no contaminan en circulación - pueden suponer notables mejoras en los niveles de emisión. Mayores detalles sobre el efecto del incentivo en su utilización, así como los efectos en las emisiones de distintos escenarios de crecimiento del parque se detallarán en los siguientes capítulos.

7. PROYECCIÓN DE EMISIONES GLOBALES DEL PARQUE VEHICULAR

En este capítulo se mostrarán las emisiones del contaminante global más relevante; el dióxido de carbono (CO_2). Puesto que el CO_2 es un contaminante global, el análisis relevante concierna la proyección de sus emisiones a nivel nacional. Es decir, se deberán modelar los siguientes elementos:

- Totales vehiculares según tipo de vehículo (idem. Capítulo 2)
- Totales vehiculares por categoría tecnológica (idem. Capítulo 3)
- Distancias recorridas anualmente en función de la edad vehicular (idem. Cap. 5)

Sin embargo, la diferencia con este contaminante es que su emisión no depende de la distancia recorrida, sino que de la cantidad de combustible consumida por el parque. De hecho, una forma de estimar las emisiones de CO_2 puede ser determinando la cantidad de combustible vendido en las estaciones de servicio durante cada año, y proyectar esa cifra a futuro.

No obstante, el enfoque que se utilizará en este modelo es el siguiente: obtenidos los vehículos - kilometro recorridos por el parque, se asignará una eficiencia en términos de consumo de combustible promedio al parque y se proyectará esta cifra a futuro. Más detalles sobre esto más adelante.

7.1. Modelación del Parque Vehicular Nacional

Se modela el crecimiento del parque vehicular nacional de igual forma a lo enunciado en los Capítulos 2 y 3. Es decir, en un comienzo se proyectan los totales vehiculares según tipo mediante un modelo gompertz para los vehículos particulares y mediante series de tiempo para el resto. Luego, se estiman los totales según categoría tecnológica (normativas EURO).

En particular el parque vehicular nacional, para el año base (2014), posee la composición mostrada en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Parque Vehicular Nacional según Tipo de Vehículo.

Tipo de Vehículo	Vehículos Particulares	Buses	Camiones	Taxis
Valor	3.917.761	83.895	203.030	102.293

Con esto, las proyecciones de cada tipo de vehículo para Chile son las presentadas en la Figura 7.1. A grandes rasgos, las tendencias son iguales a las observadas para el caso del Gran Santiago. La distribución de la edad del parque vehicular para el año base de la simulación, se puede observar en la Figura 7.2. De esta última se destacan ciertos aspectos mencionados en el Capítulo 3 y otros nuevos:

- Se observan los efectos de las crisis económicas de los años 2000 - 2002 y 2008 - 2009.
- Ya no se aprecia claramente el hecho que los vehículos de transporte público se adquieren en tandas o partidas; esto se debe a que el número de buses y minibuses a nivel nacional, al ser notablemente mayor, oculta los *peaks* observados en el Capítulo 3, o al hecho que los buses dados de baja en el Gran Santiago suelen ir a provincia.
- La distribución de los taxis muestra la misma distribución, notando también una mínima cantidad de taxis cuya edad es superior a los 13 años.

Dado lo anterior, se decidió mantener la distribución de supervivencia respecto a lo enunciado en el Capítulo 3. Es decir los parámetros, para cada tipo de vehículo se mantienen en los valores mostrados por la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Valores Parámetro β para Distribución de Supervicencia según Tipo de Vehículo.

Vehículos Particulares	Buses	Camiones	Taxis
-0,141	-0,188	-0,161	-0,470

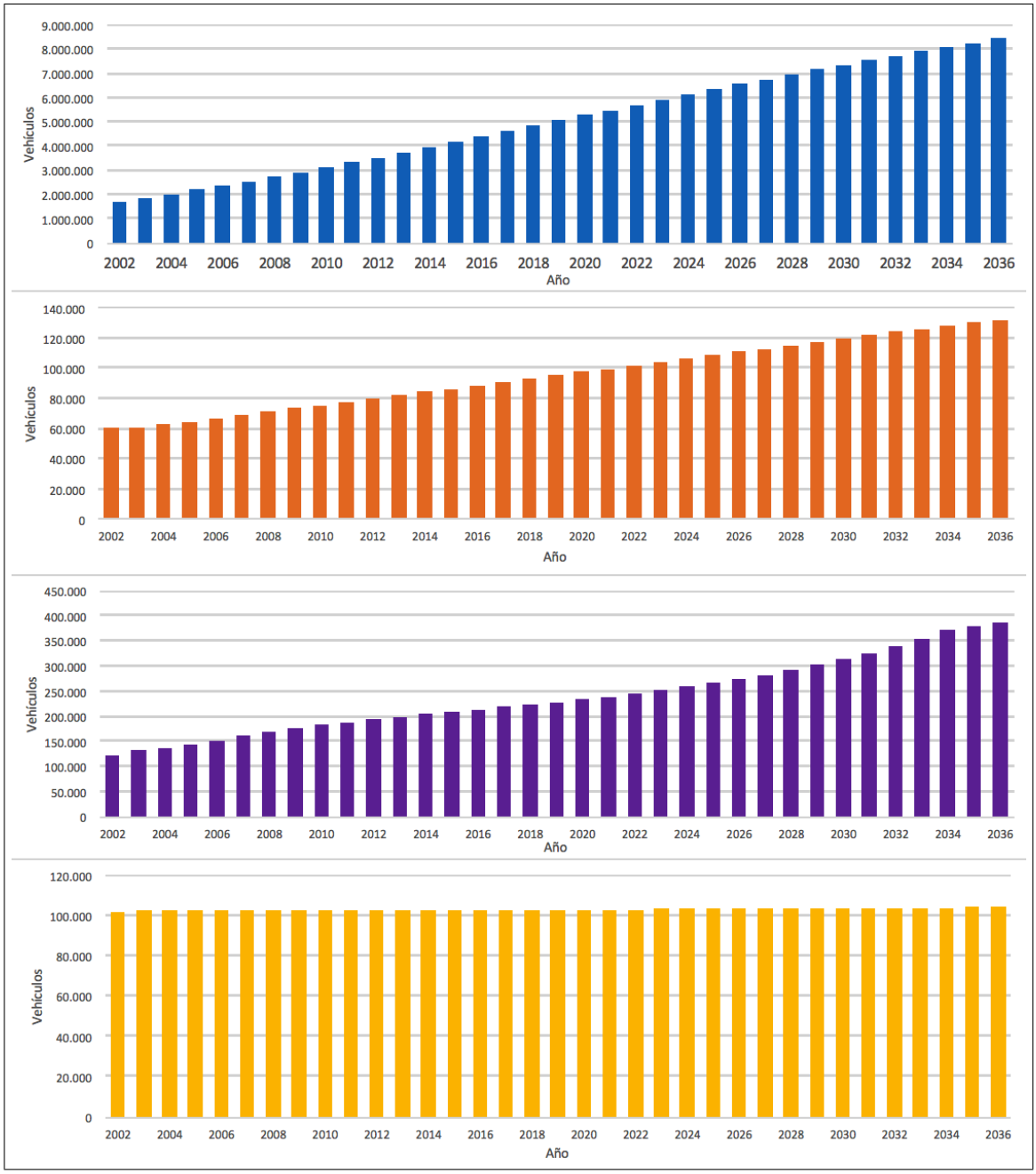

Figura 7.1. Proyecciones de vehículos articulares (azul), buses (naranjo), camiones (morado) y taxis (amarillo) para Chile

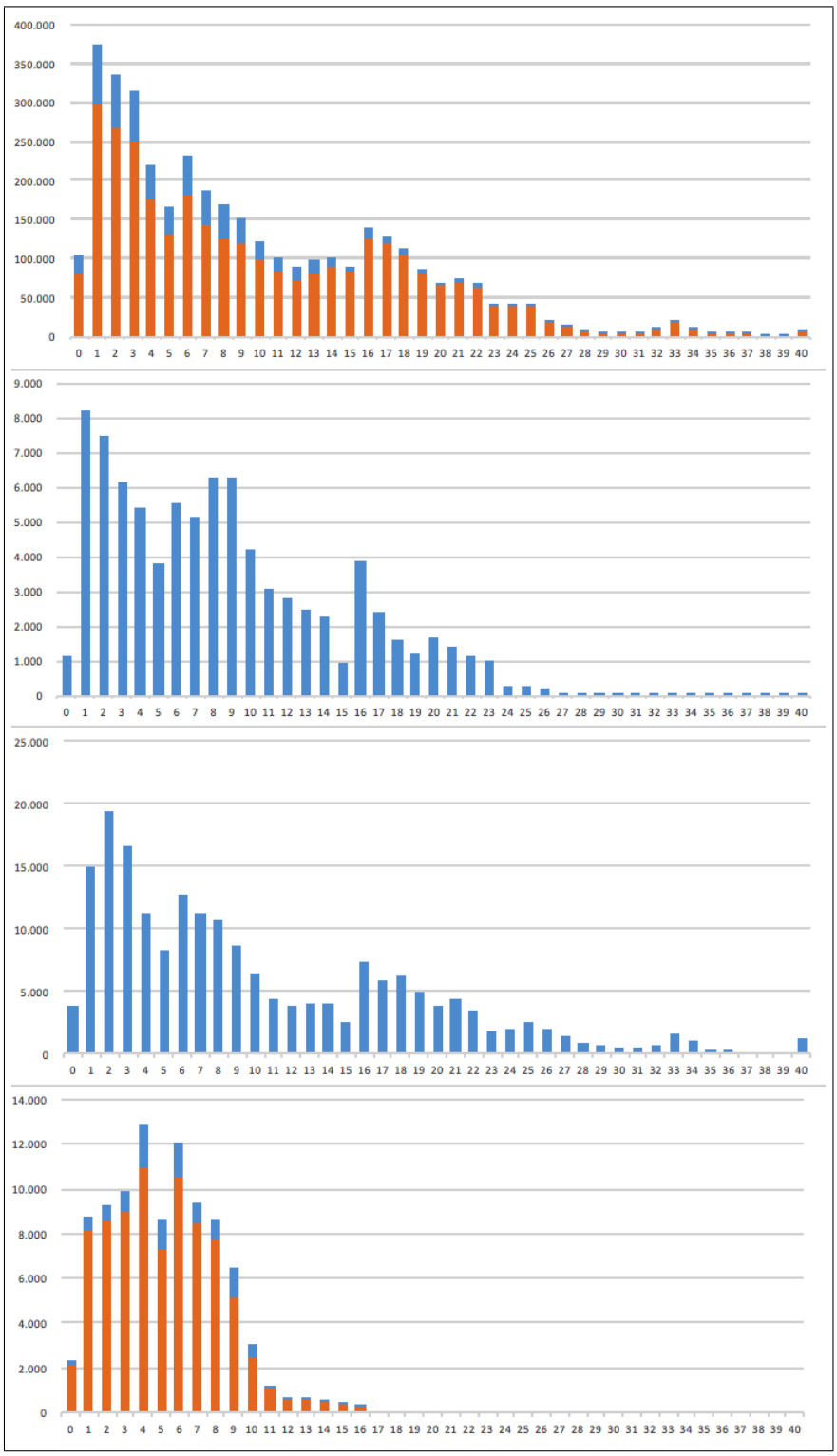

Figura 7.2. Distribución de la edad del parque según tipo de vehículo para Chile

7.2. Distancias Recorridas por el Parque Vehicular

En este caso, se deben determinar los patrones de uso vehicular a nivel nacional, los que no tienen porqué ser iguales a los del Gran Santiago. Los kilometrajes acumulados en función de la edad, para cada tipo de vehículo se muestran en la Figura 7.3.

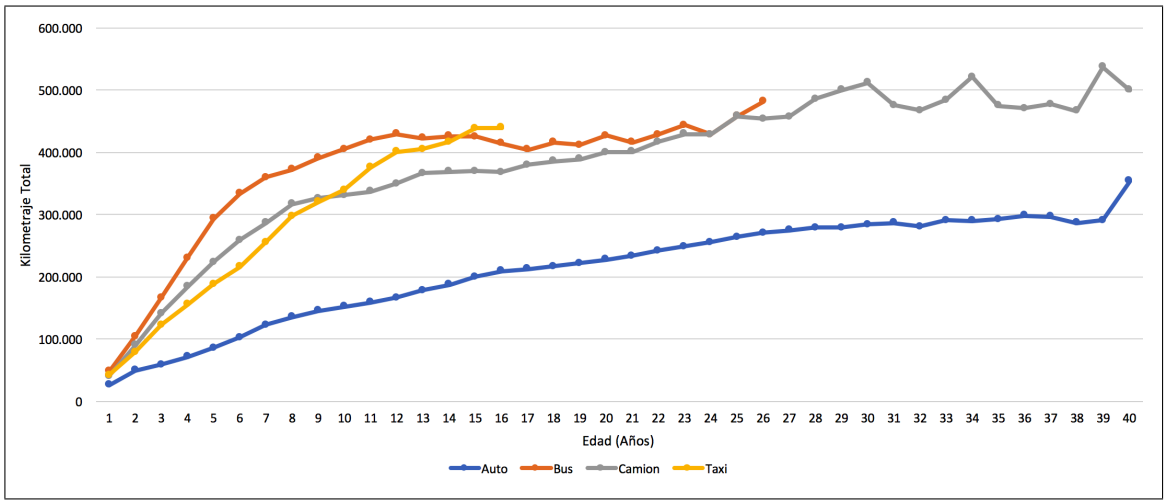

Figura 7.3. Kilometrajes acumulados en función de la edad y tipo de vehículo

Realizando un ajuste de tipo polinómico de tercer grado, los kilometrajes acumulados ajustados son los que se presentan en la Figura 7.4.

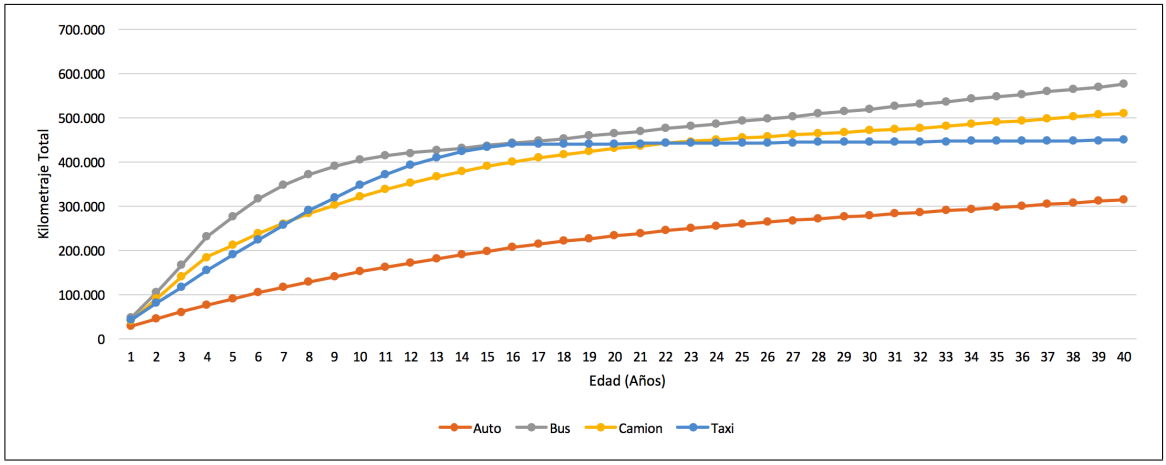

Figura 7.4. Kilometrajes acumulados ajustados en función de la edad y tipo de vehículo

Con lo anterior, las distancias recorridas anualmente en función de la edad resultan ser las que se aprecian en la Figura 7.5.

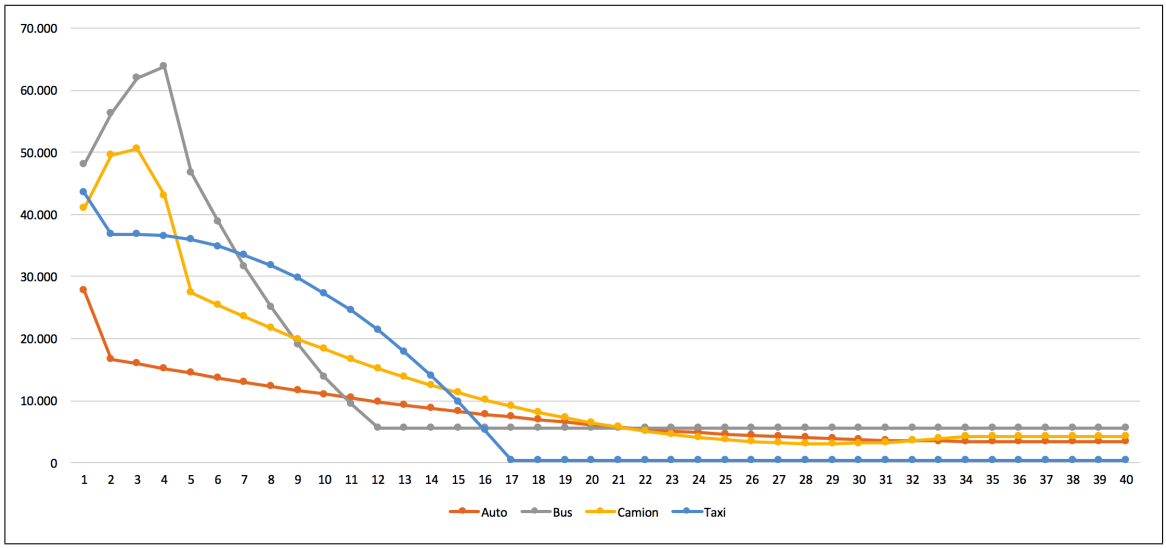

Figura 7.5. Kilometrajes anuales ajustados en función de la edad y tipo de vehículo

Finalmente, los vehículos - kilómetro recorridos por cada tipo de vehículo se muestran en los gráficos de la Figura 7.6. Estas distancias guardan relación con lo observado en el Capítulo 5. Las distancias recorridas por los vehículos presentan una tendencia al alza, al igual que la de buses y camiones. Por otro lado, la de los taxis se mantiene constante lo cual no sorprende considerando que su parque se mantiene constante a lo largo de la simulación (ver. Figura 7.1).

7.3. Consumos de Combustible

Como se mencionó al iniciar este capítulo, las emisiones de CO_2 son calculadas en base al consumo de combustible del parque vehicular. Es por esto que, para poder determinar las emisiones, se debe primero convertir los vehículos - kilómetro recorridos por el parque en litros de combustible consumido por el mismo. Para convertirlo se utiliza la ecuación (7.2).

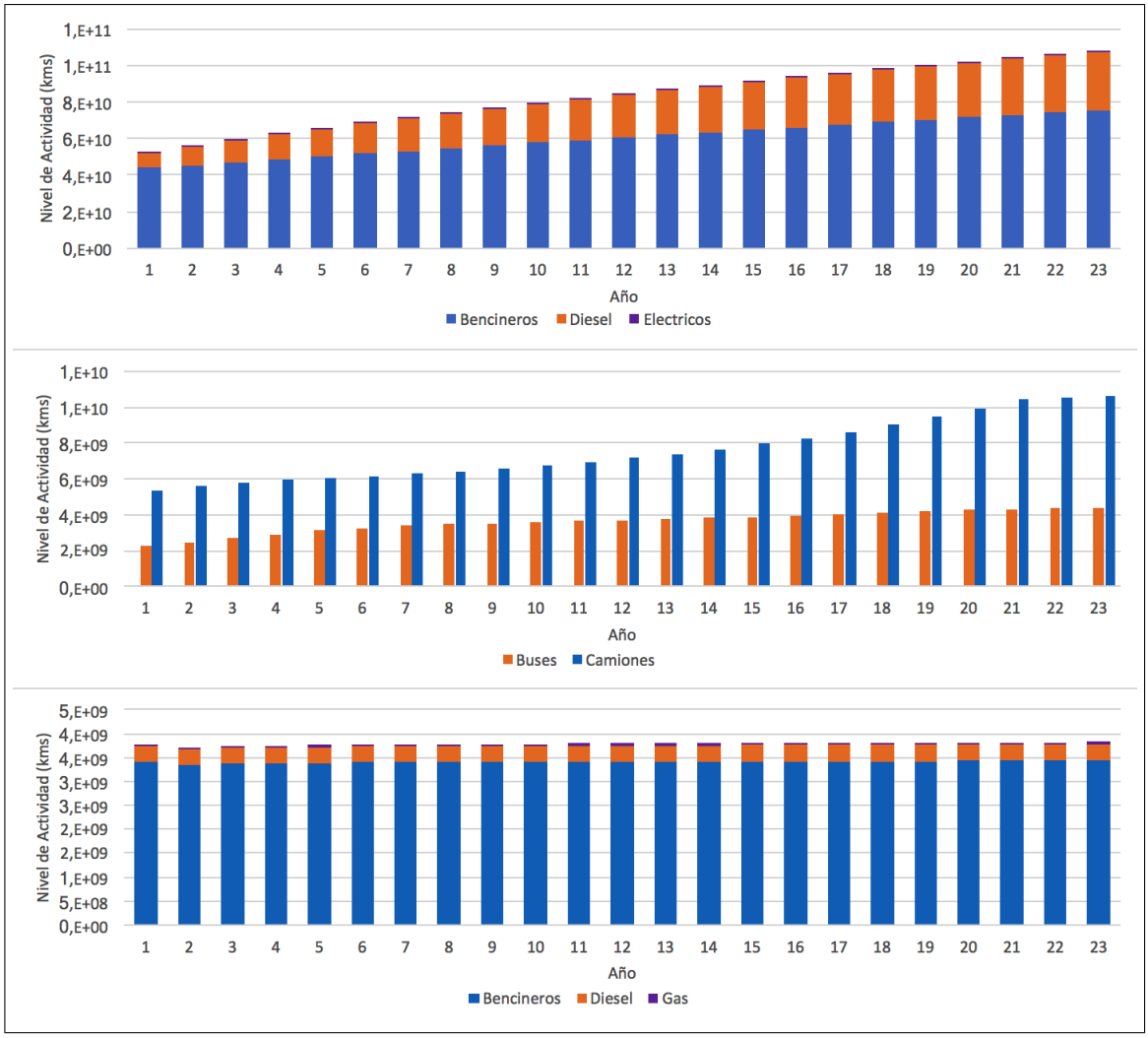

Figura 7.6. Niveles de actividad del parque ajustados

$$L_t^{i,k} = \frac{d_t^{i,k}}{C_t^k} \tag{7.1}$$

Se recuerda que $d_t^{i,k}$ es la distancia total anual recorrida por los vehículos de tipo k, normativa i, en el año t. Si C_t^k es la eficiencia promedio de los vehículos tipo k en el período t expresado en términos de $[km/l]$, entonces $L_t^{i,k}$ será la cantidad de litros consumidos el año t por vehículos de tipo k y normativa i.

Para realizar este procedimiento es necesario hacer el supuesto que todos los vehículos de algún tipo k presentarán una eficiencia promedio C_t^k en el año t. Se sabe que los vehículos más nuevos debiesen ser más eficientes que los antiguos, pero la principal idea es que este promedio contemple ambos elementos. Sin embargo, el simple hecho que los vehículos nuevos sean más eficientes en el consumo de combustible hace que la eficiencia promedio del parque, C_t^k, vaya mejorando paulatinamente con el tiempo. Es decir, es esperable que:

$$C_{t+1}^k > C_t^k \tag{7.2}$$

A este aumento de eficiencia a través del tiempo usualmente se le denomina *Fuel Economics*. Para determinar el *Fuel Economics*, se analizaron los datos de eficiencia de consumo de combustible entregados por la *Environment Protection Agency* (EPA, 2016b) desde los años 1990 a 2014. La Figura 7.7 muestra como varía, año a año, el consumo promedio de distintos tipos de vehículo. Los valores presentados hasta el año 2012 corresponden a valores observados, mientras que los valores posteriores corresponden a estimaciones.

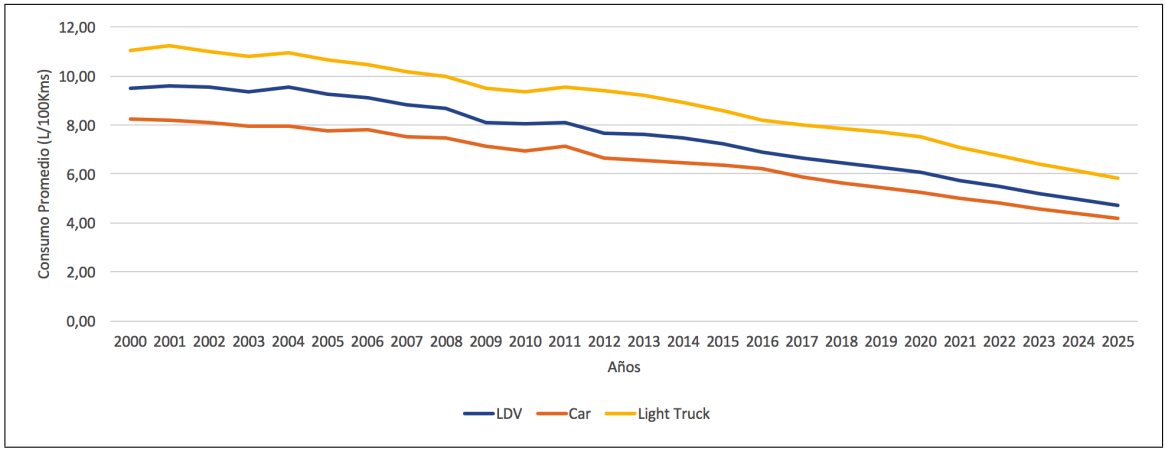

Figura 7.7. Consumo promedio de combustible del parque vehicular de los Estados Unidos en [L/100Km]
Fuente: EPA (2012)

Desde el año 2000 a 2014, el consumo de combustible cae en 21,5 % para vehículos comerciales livianos, 21,9 % para autos y 19,3 % para vehículos de carga livianos. Por lo tanto, en promedio, el consumo cae en 1,49 % al año. Luego, para nuestro modelo, la relación entre las eficiencias de combustibles son las siguientes:

$$C^k_{t+1} = \frac{C^k_t}{1,0149} \tag{7.3}$$

Luego, se debe asignar un valor inicial para las eficiencias de combustible de los distintos tipos de vehículos. Para esto se utilizan los datos de consumo del *Bureau of Transportation Statistics* (BTS (2016a), BTS (2016b), BTS (2016c)) de Estados Unidos; estos indican que, para el año 2015, los consumos promedio según tipo de vehículo son los que se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Valores de Consumo y Eficiencia de Combustible Promedio para el Año Base

	Automóvil	Bus	Camión
Eficiencia (km/l)	9,09	3,06	2,47
Consumo ($l/100km$)	11,0	32,7	40,5

Fuente: BTS (2016a; 2016b; 2016c)

Se destaca que el valor asignado a automóvil corresponde tanto a vehículos particulares como taxis, y el promedio contempla la eficiencia de vehículos bencineros y diésel. Los valores consideran conducción tanto en ciudad como en autopistas interurbanas.

De esta forma, considerando los consumos anteriormente descritos así como la mejora de combustible promedio anual - *Fuel Economics* - se proyectan los litros de combustible consumidos por el parque. Estos se muestran en la Figura 7.8, mientras que en la Figura 7.9 se pueden observar los litros de combustible consumidos según tipo de vehículo. Se

observa que los consumos de bencina crecen en menor medida que el consumo de petróleo diésel. Esto se debe a que el crecimiento del parque de vehículos diesel implica mayores consumos (sobretodo por el parque de buses y camiones). Sin embargo, si se observa la cantidad total de litros consumidos, se aprecia que este crecimiento tiende a disminuir con el paso del tiempo, por efecto del *Fuel Economics*.

Figura 7.8. Litros de bencina, petróleo y gas consumidos por el parque nacional

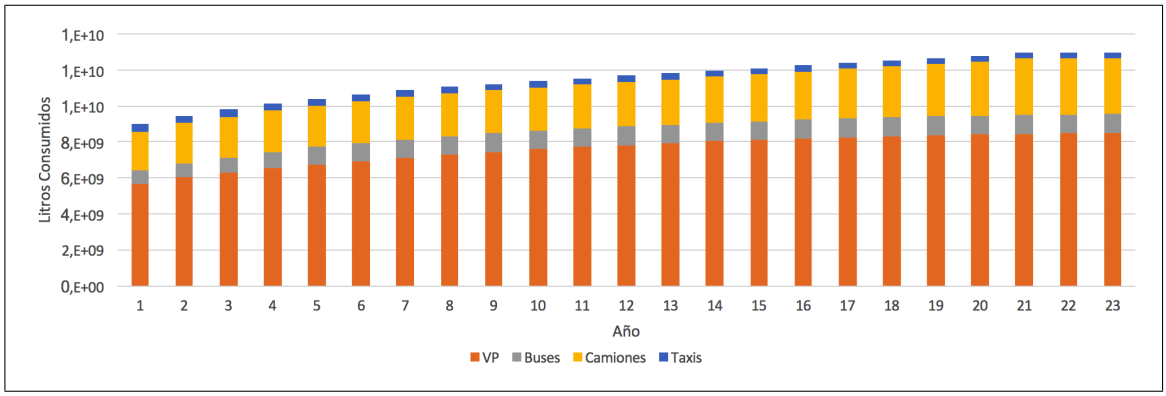

Figura 7.9. Litros de bencina, petróleo y gas consumidos por el parque nacional según tipo de vehículo

7.4. Emisiones de CO_2

Para estimar las emisiones de CO_2, se debe utilizar un factor de conversión entre litro de combustible consumido y emisión de CO_2. Se decidió utilizar los factores de conversión propuestos en el compilado *Emission Factors for Greenhouse Gases Inventory* de EPA (2014). Los factores de conversión σ_l, para el tipo de combistible l, se encuentran en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Factores de Conversión σ_l de Combustión a Emisiones de CO_2

	Bencina	Diesel	Gas
$KgCO2/Gallon$	8,78	10,21	5,68
$KgCO2/Litro$	2,32	2,70	1,50

Fuente: EPA (2014)

Con esto, las emisiones de CO_2, para el vehículo tipo k en el período t se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$E^k_{CO2,t} = L^{i,k}_t * \sigma_l \tag{7.4}$$

En la figura 7.10 se presentan las emisiones de CO_2 según tipo de vehículo junto a los niveles de actividad del parque. Se observa que las emisiones aumentan en menor medida que los niveles de actividad del parque; las emisiones aumentarán en 37 % en veinte años, mientras que los niveles de actividad lo hacen en aproximadamente 90 %. Esto se debe únicamente a los aumentos en eficiencia de consumo de combustible del parque, puesto que la diferencia entre normativas EURO no guarda relación con las emisiones de $CO2$ - aunque puede discutirse el hecho que vehículos de normativa más reciente son más eficientes en su consumo, pero eso no es un resultado directo de la normativa.

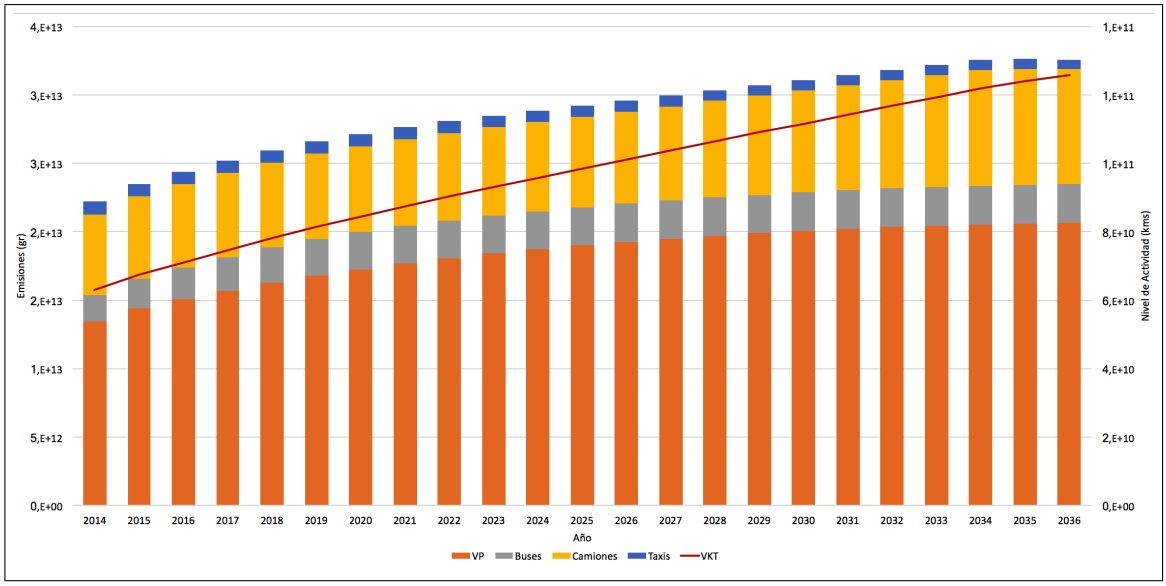

Figura 7.10. Emisiones de CO_2 según tipo de vehículo

Si se revisan los resultados de otros estudios, tales como los de la *International Environment Agency* - IEA (2016) - para 2016, o los del estudio de Opciones de Mitigación para Enfrentar el Cambio Climático del Gobierno de Chile MAPS - MMA (2014) - se puede corroborar la validez de nuestro resultado. Los valores del modelo y de estos estudios se comparan en la Tabla 7.5

Tabla 7.5. Comparación de Resultados de Estimaciones de CO_2 en Chile por Sector Transporte.

	Modelo	IEA	MAPS
Año 2013	<22.217.141.738.926	-	20.600.000.000.000
Año 2016	24.408.212.637.751	23.600.000.000.000	-
Año 2020	27.142.853.152.071	-	30.500.000.000.000

Se puede observar que los órdenes de magnitud y valores de las distintas estimaciones son bastante similares. En particular, destaca la similitud entre la estimación del modelo y el valor entregado por la IEA para el año 2016. La mayor diferencia, para el año

2020, puede deberse a la estimación de la mejora de eficiencia en cuanto a consumo de combustible.

7.5. Sensibilidad del *Fuel Economics* en las Emisiones de CO_2

Se pueden probar distintas especificaciones de la mejora en eficiencia de combustible y ver sus efectos en las emisiones de CO_2. En la Figura 7.11 se puede observar cómo varían el consumo de litros de combustible a nivel país en función del valor del *Fuel Economics*. En azul se muestra el caso en que no hay mejoras en la eficiencia, en gris el caso base (i.e. $1,0149\,\%$), en rojo una mejora promedio anual de $1,3\,\%$ y en amarillo una mejora de $1,5\,\%$.

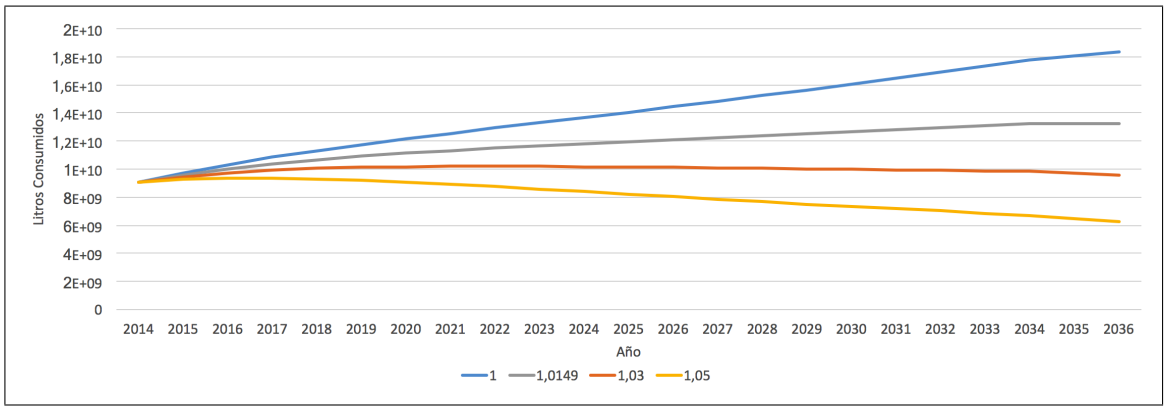

Figura 7.11. Litros consumidos por el parque en función del *Fuel Economics*.

Con esto, las emisiones de CO_2 en función de estos datos se muestran en la Figura 7.12. Claramente esto demuestra que existe un punto para el cual las emisiones de CO_2 pueden disminuir aún considerando el hecho que los niveles de actividad del parque crezcan. Esto recalca la gran relevancia que tiene el desarrollo de nuevas tecnologías en la industria automotriz en la generación de emisiones de contaminantes.

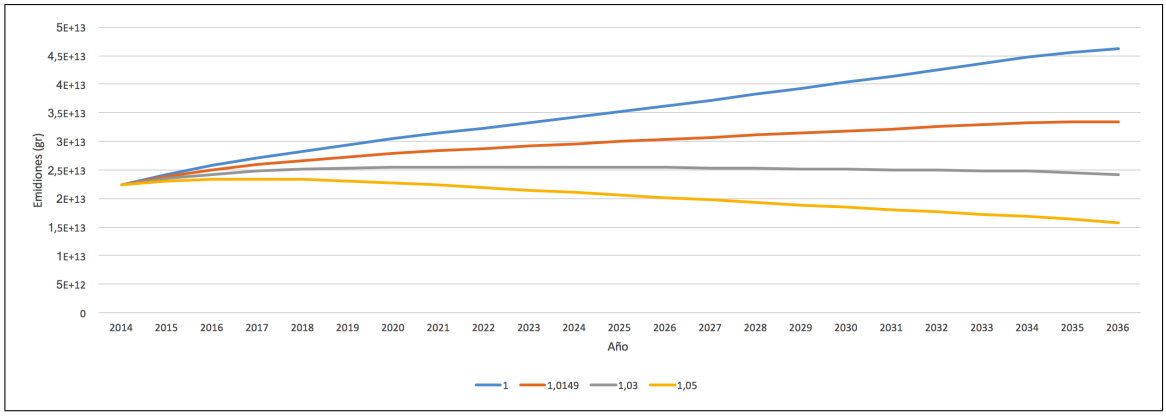

Figura 7.12. Emisiones de CO_2 del parque en función del *Fuel Economics*

Un último elemento interesante a analizar es el valor del *Fuel Economics* que acerca la proyección de emisión de CO_2 del modelo a la de MAPS. Si la eficiencia promedio de consumo de combustible del parque no mejora en el tiempo (*Fuel Economics* igual a 1), las emisiones de CO_2 al año 2020 son de 29.700 toneladas, inferiores a las 30.500 estimadas por MAPS. Por lo tanto, para lograr equiparar el valor de MAPS, el parque tendría que empeorar su eficiencia promedio de consumo de combustible (en un 0,5 % anual).

8. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

En este capítulo se evalúan los impactos en la generación de emisiones de distintos escenarios hipotéticos. Entre los escenarios a evaluar, se prueban distintas configuraciones de crecimiento del parque, introducción de vehículos eléctricos, cambios en la renovación del parque, fechas de introducción de la normativa EURO VI, etc.

Se destaca, ante todo, que los resultados que se muestran a continuación no indican en absoluto la mejor política a adoptar para buscar reducir las emisiones del parque. Se debe tener en cuenta que la imposición de ciertas políticas para lograr los escenarios planteados conllevan costos distintos, cuya determinación escapa del alcance de este esta tesis.

8.1. Crecimiento del Parque Vehicular

Una de las principales variables que puede afectar la generación de emisiones es el crecimiento del parque vehicular. Se evaluarán cuatro escenarios, que consisten en variar su crecimiento en -20 %, -10 %, 10 % y 20 %, para todos los tipos de vehículos.

Se destaca que, dado que se modifica el crecimiento en forma equitativa para todos los tipos de vehículos, las proporciones de generación de emisiones para cada contaminante se mantendrán respecto de los capítulos 6 y 7. Por ende, el análisis se centrará en observar los efectos sobre los totales emitidos de cada contaminante.

En la Figura 8.1 se encuentran los gráficos de las emisiones totales de cada uno de los contaminantes para las distintas variaciones del crecimiento del parque vehicular, y en la Tabla 8.1 se muestran los efectos porcentuales que provocan las variaciones del crecimiento del parque en las emisiones. Se observa que los resultados son razonables. Si el parque crece a un ritmo mayor que la línea base - es decir más que la tendencia original - también lo harán las emisiones. Si todo se mantiene constante (factores de emisión, distancias anuales recorridas, etc.) y sólo se varía la cantidad de vehículos que ingresan al parque, los niveles de actividad del parque aumentarán y con ello lo harán las emisiones.

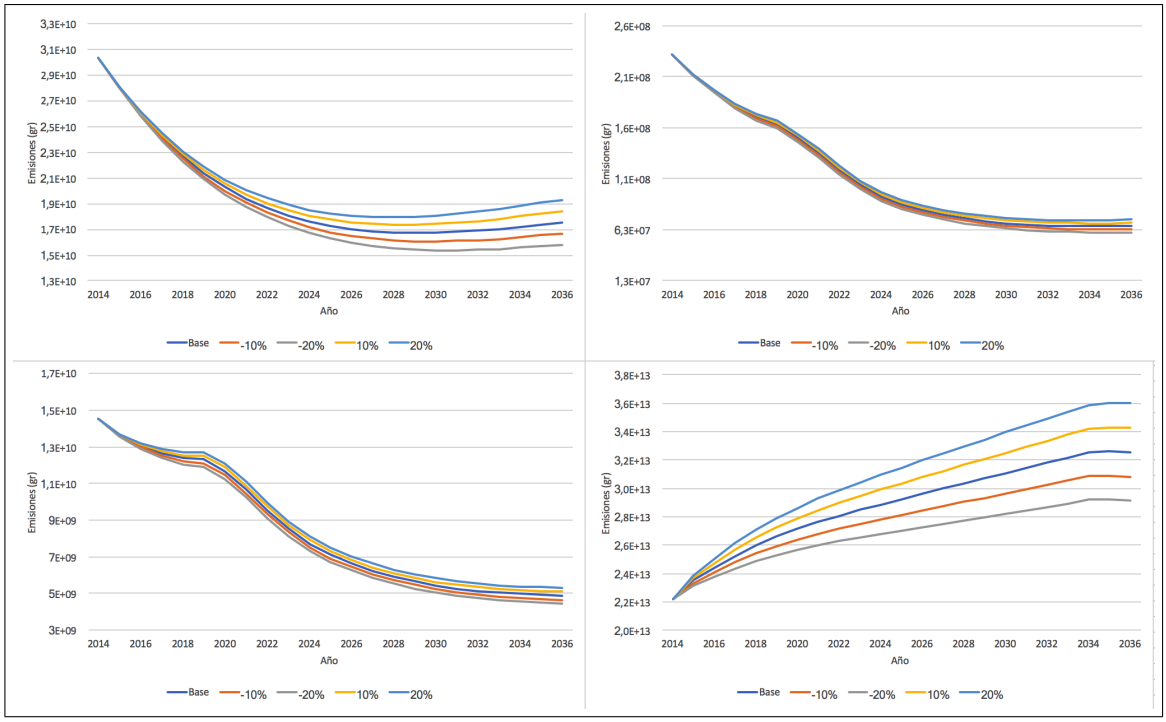

Figura 8.1. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para variaciones de crecimiento del parque vehicular

Tabla 8.1. Variación Porcentuales en las Emisiones al Año 2036 para Distintas Variaciones del Crecimiento del Parque Vehicular

	-20 %	-10 %	10 %	20 %
CO	-10,0 %	-5,0 %	5,0 %	10,0 %
NOx	-9,0 %	-4,5 %	4,5 %	9,0 %
PM2.5	-9,7 %	-4,9 %	4,9 %	9,7 %
CO_2	-10,6 %	-5,3 %	5,3 %	10,6 %

Claramente los efectos porcentuales en las emisiones son simétricos. Si el crecimiento del parque aumenta o disminuye en un X %, entonces la cantidad de vehículos que entrará

o dejará de entrar será en ambos casos iguales. Con lo anterior, es esperable que los efectos sean efectivamente simétricos. Se destaca que los efectos para los contaminantes son distintos (en magnitud), y eso se debe al hecho que los factores de emisión son distintos entre ellos.

8.2. Impulso a Vehículos Eléctricos

Si se incentivan las ventas de vehículos eléctricos - mediante la inserción de electrolineras en la red vial, reducción en el valor de su permiso de circulación, eliminación del impueso verde, etc. - se estaría básicamente fomentando el reemplazo de vehículos a combustión interna por vehículos cuya generación de emisiones en circulación es nula. En este análisis no se considera el hecho que los vehículos eléctricos deben recibir energía de fuentes que sí emiten contaminantes. Se evaluará dos escenarios, que consisten en obligar que la venta de vehículos nuevos contengan 5 % y 15 % de vehículos eléctricos respectivamente. Notemos que esto solo contempla las ventas de vehículos particulares eléctricos, no buses, camiones y taxis.

Se destaca que, dado que los vehículos eléctricos no contaminan, las proporciones emitidas según las categorías EURO se mantendrán (es sólo como si la tasa de crecimiento de los vehículos a combustión hubiese disminuido). Lo que sí cambia es la proporción de emisiones entre los distintos tipos de vehículos.

En la Figura 8.2 se encuentran los gráficos de las emisiones totales de cada contaminante para las distintas penetraciones de vehículos eléctricos al parque. En la Tabla 8.2 se muestran los efectos porcentuales debidos a las distintas proporciones de penetración de vehículos eléctricos en el parque.

Se observa que la penetración de vehículos eléctricos en el parque conlleva disminuciones directas en todas las emisiones de contaminantes. Se puede ver que el efecto de aumentar la participación de vehículos eléctricos no es lineal con las emisiones. Esto se

debe a que aumentar la penetración de vehículos eléctricos conlleva dos efectos; el primero es que los vehículos que naturalmente salen del parque (más contaminantes) son reemplazados en parte por vehículos eléctricos, y el segundo a que parte de los vehículos nuevos que entran (dado al crecimiento) también serán eléctricos.

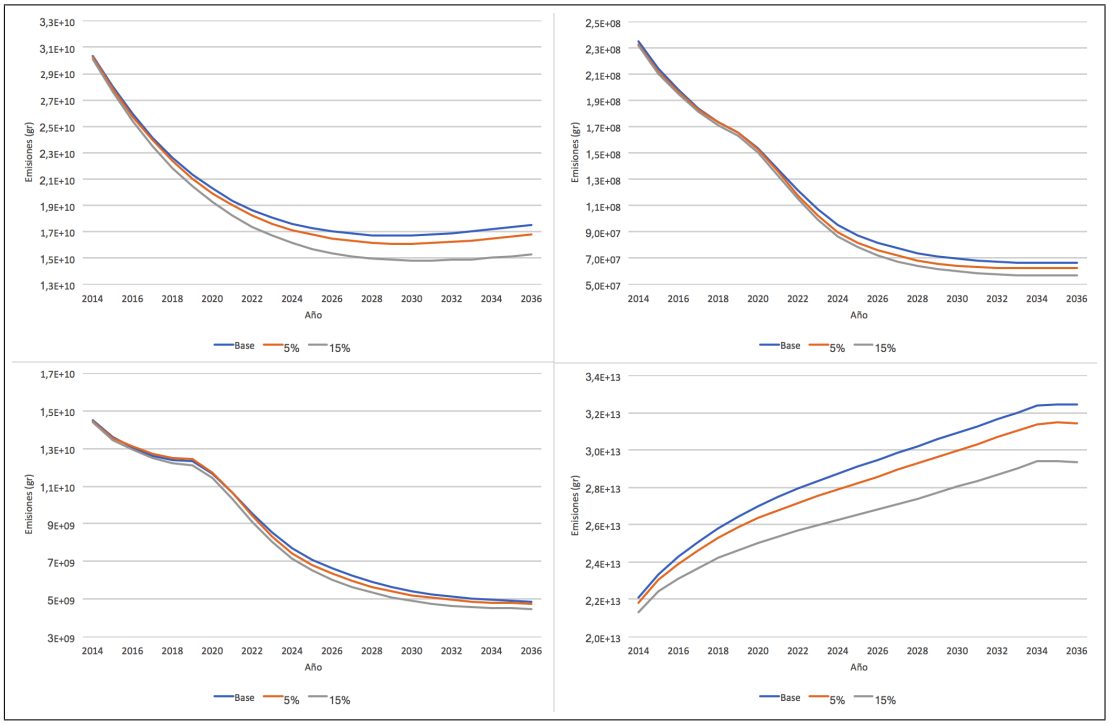

Figura 8.2. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para distintas penetraciones de vehículos particulares eléctricos

Tabla 8.2. Variación Porcentuales en las Emisiones al Año 2036 para Distintas Penetraciones de Vehículos Eléctricos.

	5 %	15 %
CO	-4,0 %	-12,9 %
NOx	-2,1 %	-8,0 %
PM2.5	-5,5 %	-13,6 %
CO_2	-3,1 %	-9,4 %

Si se compara estos valores con los escenarios de distintos crecimientos del parque, se puede apreciar que un 15 % de penetración de vehículos eléctricos tendría mayores beneficios en términos de reducción de emisiones que limitar el crecimiento del parque en un 10 %, pero no en un 20 %.

8.3. Tasa de Renovación del Parque Vehicular

Otro elemento clave a analizar es la renovación del parque vehicular. En teoría, si se acelera la renovación del parque, se estaría eliminando rápidamente a vehículos más contaminantes. Sin embargo, dado como está planteado el modelo (y como ocurre en la realidad), los vehículos más nuevos circulan más que los antiguos, y por ende los efectos en las emisiones no son directos.

Para variar la tasa de renovación del parque vehicular, se debe variar el parámetro de intensidad de la distribución de supervivencia es decir, β. Los valores utilizados de este parámetro, para cada tipo de vehículo, se presentan en la Tabla 8.4. Con esto, las variaciones en las emisiones son las que se muestran en la figura 8.3.

Se puede apreciar que acelerar la renovación, disminuye las emisiones de CO y PM2.5 en los primeros años de la simulación. No obstante, ya hacia el término de ésta, las emisiones de los escenarios acelerados superan a las de los demás principalmente por el hecho que los factores de emisión de estos contaminantes en la normativa EURO VI son superiores a los de la EURO V (efecto derivado de los bencineros, que representan la gran mayoría). Para el NOx el efecto es similar, y aumentar la renovación sólo amplifica lo observado en el Capítulo 6.

Respecto al CO_2, si se acelera la renovación, éstas serán mayores, y esto se debe al hecho que los vehículos nuevos recorren mayores distancias que los vehículos más antiguos. Por ende, si el parque se renueva aceleradamente, habrá más vehículos nuevos, los niveles de actividad del parque aumentarán, y con ello lo harán las emisiones de CO_2.

Tabla 8.3. Valores del Parámetro β para cada Escenario por Tipo de Vehículo.

	Lento 2	Lento 1	Rápido 1	Rápido 2
Auto	-0,041	-0,081	-0,181	-0,281
Bus	-0,055	-0,108	-0,246	-0,379
Camión	-0,047	-0,092	-0,210	-0,324
Taxi	-0,470	-0,470	-0,470	-0,470

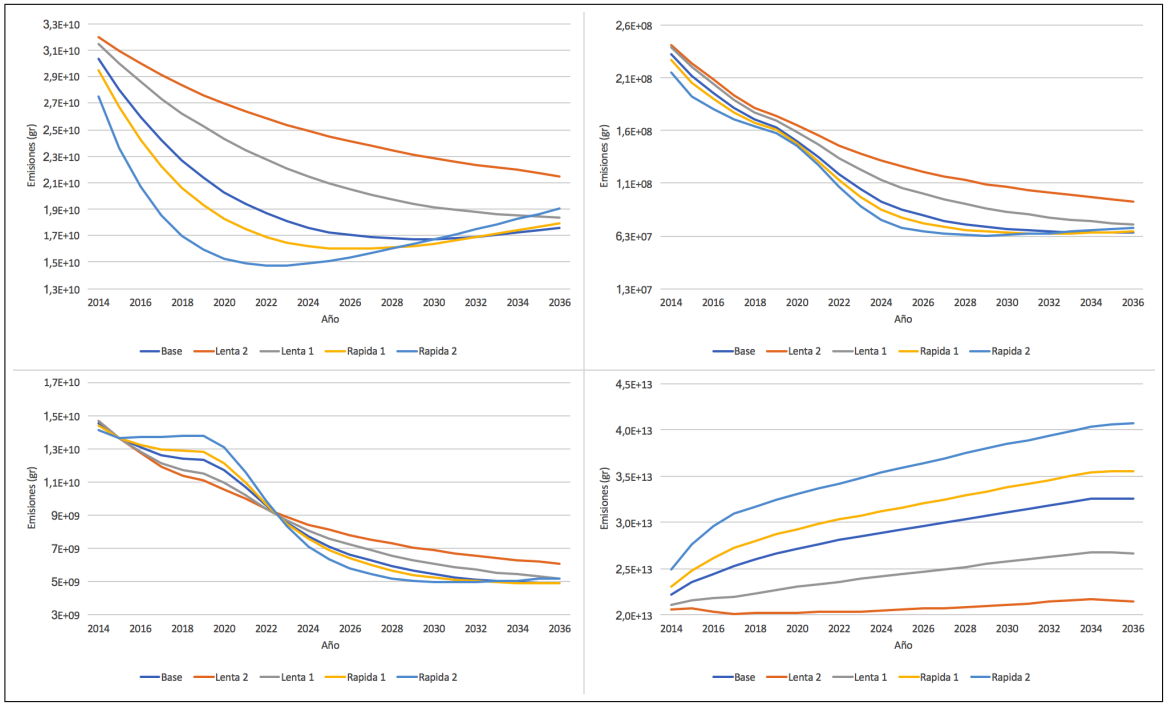

Figura 8.3. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para distintos escenarios de renovación del parque vehicular

Dados los puntos anteriores, se debe destacar que acelerar la renovación bajo esta modalidad no aporta resultados concluyentes a la generación de emisiones. Si los niveles de actividad del parque se mantuviesen constantes para un aumento de la renovación del parque, los beneficios debiesen ser importantes. Un elemento a considerar acá es el hecho

que los vehículos nuevos son más eficientes en cuanto a consumo de combustible y, por ende, debiesen aportar a la disminución de las emisiones de CO_2.

Un escenario más realista que contempla distintas variaciones en la renovación del parque se analizará más adelante (ver sección 8.5).

8.4. Fecha de Introducción de la Norma EURO VI

La introducción de la normativa EURO VI al parque puede traer consecuencias directas en la generación de emisiones. Por ejemplo, en vehículos particulares diésel, las emisiones de NOx son cerca de seis veces más bajas en los EURO VI que en los EURO V. Así, se analizarán dos casos posibles: uno contempla la introducción de la normativa EURO VI en el año 2025 y el otro en el año 2030. En la Figura 8.4 se puede apreciar los efectos que esto tiene en las emisiones.

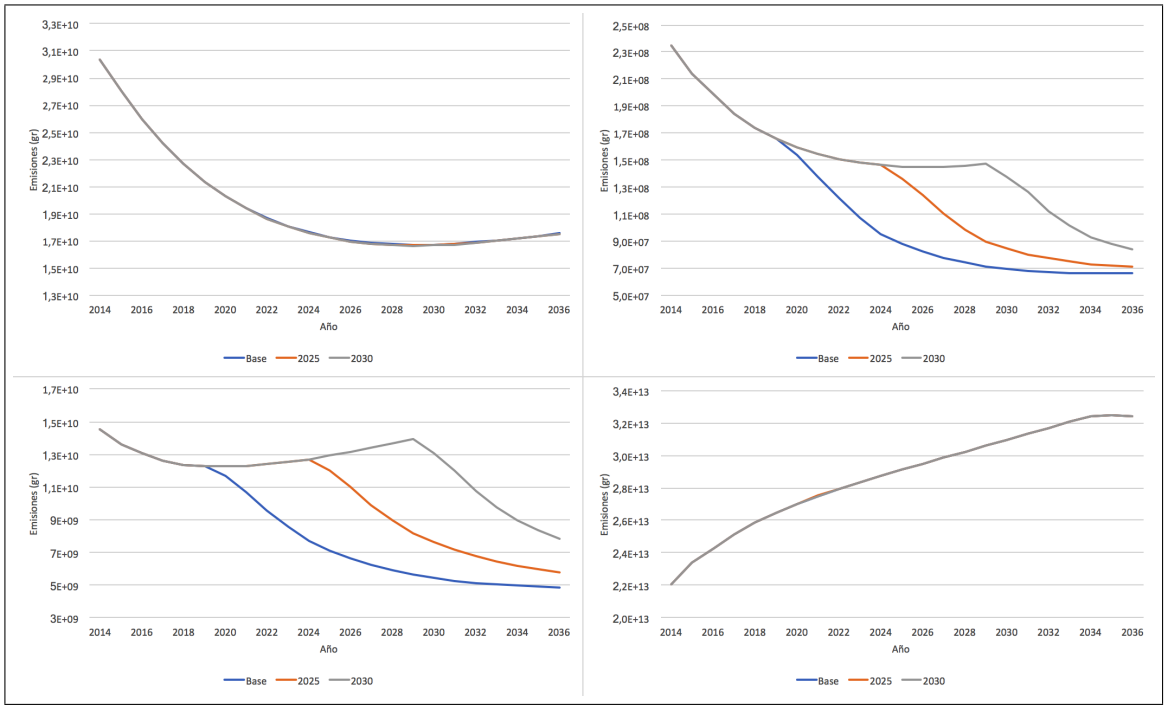

Figura 8.4. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha) para distintos años de introducción de la normativa EURO VI

Dado que la introducción de la normativa EURO VI no afecta en absoluto a la cantidad de vehículos del parque, así como su edad, distancias recorridas, etc., este análisis no afecta la generación de CO_2. Puesto que los niveles de actividad del parque se mantienen constantes, también lo hará el consumo de combustible total del parque, por lo que las emisiones de CO_2 debieran ser las mismas en cada escenario.

Se puede observar, también, que las emisiones de CO son las mismas en cada escenario planteado. Esto es normal dado que la diferencia en los factores de emisión entre la EURO V y VI es nula. Luego, este es un resultado también esperable.

Respecto al NOx y PM2.5, se puede aprecia que las diferencias son muy grandes. La introducción de la normativa EURO VI representa grandes diferencias, y atrasar su fecha de introducción implicará aumentar considerablemente las emisiones en el parque vehicular. Por lo tanto, de ser posible, esta normativa debiese incorporarse al parque vehicular lo antes posible. La Tabla 8.4 muestra la generación extra de contaminantes que supone atrasar en 5 y 10 años la introducción de la normativa EURO VI al parque.

Tabla 8.4. Emisiones de NOx y PM2.5 para Distintas Fechas de Introducción de Normativa EURO VI

	NOx	PM2.5
Emisiones Base (gr)	1,94*10^{11}	2,65*10^{9}
2025 (gr)	2,37*10^{11}	3,02*10^{9}
2030 (gr)	2,79*10^{11}	3,40*10^{9}
Generacion Extra 2025	22,1 %	14,0 %
Generacion Extra 2030	43,7 %	28,3 %

8.5. Venta de Vehículos Nuevos Bajo Permisos

Para la evaluación de estos escenarios, se supuso lo siguiente:

- La venta de vehículos nuevos requiere la adquisición de un permiso de valor no despreciable. Es decir, el permiso reduce las ventas de vehículos nuevos en X %.
- Dado que adquirir un vehículo nuevo es considerablemente más costoso, los usuarios deberán cuidar y mantener de mejor forma sus actuales vehículos. Esto último implicará que la renovación de los vehículos disminuya (i.e. que salgan menos vehículos viejos del parque).
- Puesto que el parque se renueva más lentamente y los usuarios deben seguir utilizando sus vehículos, las distancias recorridas anualmente por los vehículos más viejos aumentarán también.

Bajo estas condiciones, básicamente se está combinando distintos escenarios, afectando en especial la tasa de crecimiento del parque vehicular, la tasa de renovación - a través de β y las distancias recorridas por el parque. Se probó las dos configuraciones:

Tabla 8.5. Parámetros de los Escenarios Combinados

Delta Crecimiento Parque	-10 %	-20 %
β Auto	-0,121	-0,101
β Bus	-0,161	-0,135
β Camión	-0,138	-0,115
Delta Distancias Recorridas	10 %	20 %

Los delta de distancias recorridas impactan las distancias modificando la tasa de decrecimiento de las mismas. Es decir, un valor de 10 % quiere decir que los kilómetros recorridos anualmente decrecerán 10 % más lentamente que lo originalmente planteado en el Capítulo 5. Los efectos en las emisiones de contaminantes se observan en la Figura 8.5.

De los gráficos se puede deducir que:

- El escenario más extremo (reducir ventas en 20 %, reducir la renovación aumentando las distancias recorridas de los vehículos más viejos en un 20 %) no conlleva beneficios en la generación de emisiones. Para todos los contaminantes, las emisiones son mayores.
- El escenario menos extremo supone disminuciones de las emisiones de CO_2 en los últimos años de la simulación. Sin embargo, supone mayores emisiones de contaminantes locales.

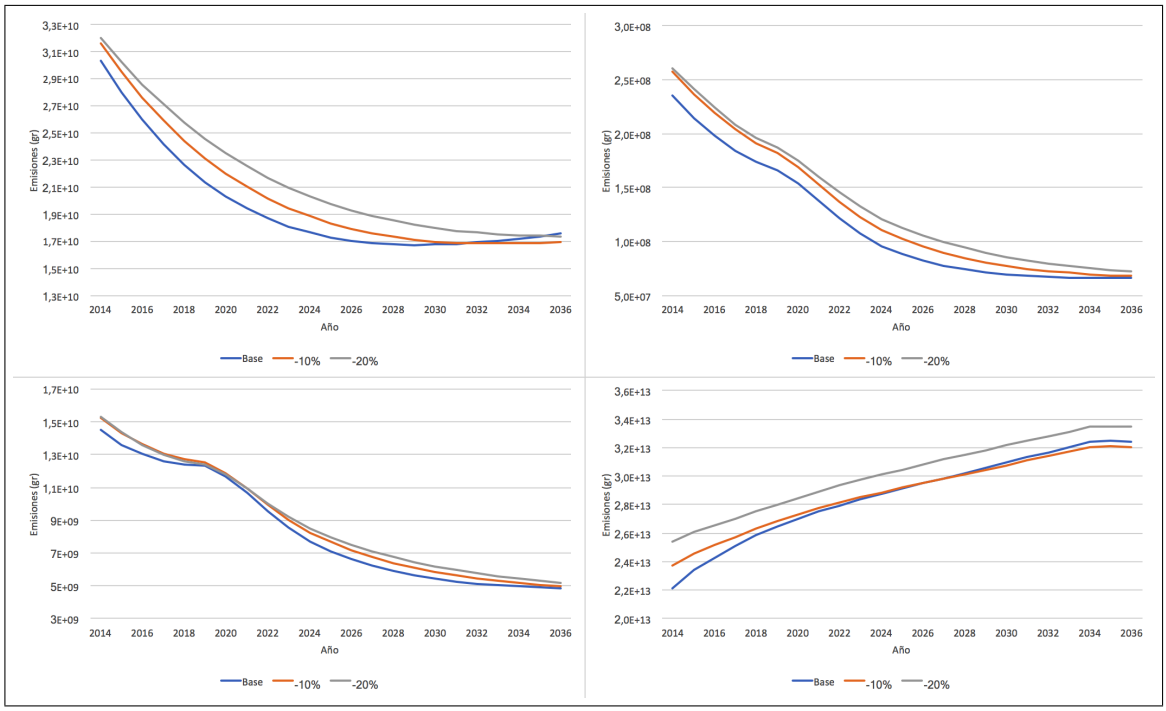

Figura 8.5. Variación en las emisiones totales de CO (arriba izquierda), NOx (abajo izquierda), PM2.5 (arriba derecha) y CO_2 (abajo derecha)..

De este análisis se puede concluir que la introducción de un permiso para la adquisición de vehículos nuevos no se ve como una medida atractiva para disminuir las emisiones de contaminantes. Sin embargo, se debe recalcar que probablemente los efectos de tal medida no sean los que se plantean en aquí (variaciones en la renovación y distancias recorridas).

8.6. Consideraciones Finales

La efectividad de los escenarios propuestos puede ser distinta en la realidad, sobretodo en el caso de los escenarios de variación en la renovación y en la introducción de permisos. De hecho, este tipo de políticas debe ser evaluada mediante técnicas más complejas, incorporando modelos de comportamiento de usuarios entre otros factores, lo cual escapa al alcance de esta investigación.

Sin embargo, para escenarios tales como la variación del crecimiento del parque, el incentivo de ventas de vehículos eléctricos, y la fecha de introducción de la normativa EURO VI, sus efectos debieran ser más cercanos a la realidad. Esto se debe al hecho que no implican modificaciones en factores ajenos. Dentro de estos, se destaca que la medida más atractiva concierna la introducción de vehículos eléctricos.

9. SOFTWARE GUESS

En este capítulo se describe el Modelo GUESS. Este es un software cuyo principal objetivo es proyectar las emisiones de contaminantes de un parque vehicular, que integra todas las etapas detalladas en los Capítulos 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Es decir, el software toma en cuenta los siguientes elementos para estimar las emisiones:

- Estima totales vehiculares según tipo de vehículo permitiendo variar la tasa de crecimiento del mismo.
- Recibiendo un parque para el año base, simula el proceso de envejecimiento mediante una distribución de supervivencia, permitiendo modificar la tasa a la cual se renueva el parque.
- El modelo permite variar la fecha de introducción de la normativa EURO VI.
- Contempla que las distancias recorridas por un vehículo al año dependen del tipo de vehículo y su edad.
- Permite obtener, para distintas configuraciones, la evolución del parque vehicular.
- Utiliza los factores de emisión de COPERT V.

En las siguientes secciones se detallará primero las pestañas del software, indicando lo que se muestra, las funcionalidades integradas, así como las salidas de cada una de ellas. Luego, se mostrará un ejemplo de tarea que posee potencial para ser enseñada en algún curso relacionado con el tema de generación de emisiones o externalidades.

9.1. Pestañas *TOTAL*

En estas pestañas el usuario puede observar cómo se realizan las proyecciones de los totales vehiculares según el tipo de vehículo. Respecto a los vehículos particulares, se explica la dinámica de la estimación. Se indica que, dados datos de población y crecimiento económico (GDP per cápita), se debe estimar mediante un modelo Gompertz el índice de vehículos cada 1.000 habitantes. Respecto a los buses, camiones y taxis, se muestra la

tendencia del parque total en función del tiempo. La idea de la pestaña *FleetAdjustment* es resumir los totales vehiculares de la flota a lo largo de la simulación.

Estas pestañas están diseñadas con el fin que se puedan ajustar distintas configuraciones del crecimiento del parque, así como de la participación de distintos combustibles. En resumen:

- **Entradas**: Crecimiento económico, población.
- **Salidas**: Indice de vehículos cada 1.000 habitantes, parque de vehículos particulares, buses, camiones y taxis.
- **Parámetros modificables**: Crecimiento económico, nivel de saturación del parque, crecimiento del parque de buses y camiones. Composición del parque de vehículos particulares y taxis según tipo de combustible.

9.2. Pestaña *INITIAL*

Esta pestaña muestra la distribución del parque vehicular utilizado en el año base de la simulación. Permite observar los efectos de las crisis económicas en los vehículos particulares, así como notar que el parque de taxis se concentra en los primeros 13 años de edad. En resumen:

- **Entradas**: Composición según edad del parque por tipo de vehículo.
- **Salidas**: Gráficos de distribución de la edad.

9.3. Pestaña *SD - Survival Distribution*

En esta pestaña se muestra la función que determina la probabilidad que tiene un vehículo de seguir operando al siguiente período, y ésta es el pilar que determinará en gran parte las emisiones de contaminantes.

- **Salidas**: Probabilidades de supervivencia.
- **Parámetros modificables**: Parámetros de la función de supervivencia.

9.4. Pestañas *COMP*

Estas pestañas permiten, para vehículos particulares y taxis, revisar la composición de la flota según el tipo de combustible escogido en la pestaña *TOTAL VehicleFleetAdjustment*. Se permite, además, variar la tasa a la cual se renueva el parque y la fecha en la cual se introduce la normativa EURO VI. En resumen:

- **Salidas**: Variaciones del parque vehicular según normativa EURO.
- **Parámetros modificables**: Tasa de renovación según tipo de vehículo, fecha de introducción de la normativa EURO VI.

9.5. Pestañas *DistancesTravelled*

En esta pestaña se muestra la función que permite estimar los kilómetros recorridos por cada tipo de vehículo. Se permite, además, variar la tasa a la cual decrecen los kilómetros anuales ajustando el valor mínimo recorrido. En resumen:

- **Salidas**: Distancias recorridas anualmente según tipo de vehículo y edad, kilometrajes totales en función de la edad.
- **Parámetros modificables**: Tasa a la que decaen los kilómetros anualmente recorridos.

9.6. Pestañas *EmissionFactors*

En esta pestaña se muestran los factores de emisión del modelo COPERT V. La idea es entender cómo disminuyen los factores de emisión a medida que avanzan las normativas EURO y considerar elementos básicos, tales como el hecho que los vehículos diésel emiten más material particulado $PM2{,}5$ que los vehículos bencineros. En esta pestaña no hay parámetros modificables.

9.7. Pestañas *Emissions*

En estas pestañas se pueden observar las emisiones de los distintos contaminantes modelados. La idea de este software es probar distintas configuraciones del parque, y evidenciar de forma directa los efectos en las emisiones.

9.8. Ejercicios Propuestos

Uno de los potenciales de GUESS es que puede ser utilizado para enseñar la dinámica bajo la cual opera el parque vehicular y la generación de emisiones de contaminantes. Por ejemplo, podría pedirse a estudiantes que analicen, para distintos escenarios de crecimiento económico, los efectos en cuanto a emisiones de contaminantes. Dado esto, a continuación se presenta una serie de preguntas o instrucciones tipo ejercicio.

- Explique qué datos son necesarios para estimar el modelo Gompertz, para determinar el índice de vehículos cada 1.000 habitantes.
- Explique la relación existente entre el crecimiento económico y el crecimiento de la población en la estimación del parque de vehículos particulares.
- Debería la distribución de supervivencia ser idéntica para todos los tipos de vehículos? ¿Porqué?
- ¿Debe la distribución de supervivencia permitir la existencia de vehículos cuya edad es superior a los 30 años? ¿Es esto real?
- Determine la relación existente entre la variación del tamaño del parque, su edad y los kilómetros totales recorridos. Para el caso base, ¿qué crece en mayor medida, el parque o los kilómetros recorridos?
- Si se acelera la renovación del parque vehicular y se mantiene el resto constante, qué debiese suceder con los niveles de actividad del parque?, ¿y con la edad del parque?

- Determine el impacto que tiene en las emisiones de material particulado aumentar la participación de los vehículos diésel a un 20 %, y luego en un 30 %. ¿Le parece una política correcta?
- Realice el mismo análisis que el punto anterior, ahora respecto del monóxido de carbono. ¿Qué puede decir ahora?
- ¿Qué impactos tendría aumentar la participación de los vehículos eléctricos a un 10 %? ¿Porqué esto no es factible de realizar en el corto plazo?
- Muestre los efectos que tendría en la generación de $PM2{,}5$, al término de la simulación, el adelantar la normativa EURO VI al año 5. ¿Son estos efectos similares si ésta se introduce el año 10? ¿Se gana algo adelantando la introducción de la normativa EURO VI?
- ¿De qué factor, además de la normativa, debiesen depender los factores de emisión de contaminantes?

10. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un modelo realista y flexible que permite proyectar las emisiones del parque vehicular del Gran Santiago, entre otras ciudades.

Modelar y proyectar las emisiones de contaminantes de un parque vehicular requiere de cuatro etapas. Primero, se deben proyectar los totales vehiculares según el tipo de vehículo. Luego, dados los totales, se debe determinar cuál es la composición tecnológica del parque para el año base para así poder simular el proceso de envejecimiento a lo largo de la simulación. El proceso anterior requiere también ajustar una distribución de supervivencia a los datos. Hasta este punto, ya se posee una caracterización completa de la composición del parque y, para estimar las emisiones, sólo se requieren los patrones de uso - o niveles de actividad - del parque.

Los totales vehiculares se proyectaron utilizando distintos modelos. Para los vehículos particulares, se siguió las recomendaciones de la literatura al ajustar mediante regresión lineal un modelo Gompertz sobre el índice de vehículos cada 1.000 habitantes. En particular, se observó que el parque vehicular del Gran Santiago, al ser relativamente nuevo, no presentaba mayores variaciones frente a la elección del nivel de saturación del mismo. De hecho, para los primeros 15 años de ajuste, no existen variaciones en el parque de vehículos particulares utilizando distintos niveles de saturación. Considerando los múltiples niveles de saturación evaluados, el parque de vehículos particulares crecería hasta sobre los tres millones de vehículos para el año 2036. Es decir, se espera un crecimiento de sobre un 100 % de aquí a un plazo de 20 años.

El parque de buses, camiones y taxis se modeló utilizando modelos de series de tiempo. Se trabajó las series eliminando tendencias, descartando presencia de estacionalidades, y se ligó variaciones en variables de tipo económica y poblacional. Se determinó que el parque de camiones era más afín a variaciones económicas que demográficas. Lo contrario sucede para los parques de buses y taxis.

Luego, a partir del modelo MODEM (MODEM, 2010) se obtuvo la distribución de las edades del parque vehicular según tipo de vehículo y combustible utilizado para el año 2013. A partir de esta información, se ajustó una distribución de supervivencia propuesta por la EPA (2016b), con el fin de replicar los datos observados. De esta forma se simula el proceso de envejecimiento del parque a lo largo de las proyecciones.

En base a lo anterior, se deteminó que el parque vehicular del Gran Santiago se encontraba bajo un proceso de envejecimiento. La edad promedio de los vehículos particulares del Gran Santiago pasaría de 6,7 a 9,4 años en el transcurso de 22 años. Se destaca, además, que la edad promedio del parque de vehículos particulares a nivel nacional es de 8,7 años. Sin embargo, resulta importante destacar que la edad del parque puede disminuir si se modifica de la intensidad de renovación del parque.

Los niveles de actividad son una variable clave en la determinación de las emisiones del parque vehicular. Para ello, los datos provenientes de las Plantas de Revisión Técnicas fueron fundamentales a la hora de determinar las distancias que recorre un vehículo en función de su edad. Los datos muestran que, mientras mayor es la edad del vehículo, menor será la distancia que recorrerá anualmente. Dado lo anterior, puesto que el parque vehicular se encuentra envejeciendo, se determinó también que los niveles de actividad del parque - o los vehículos - kilómetro recorridos - aumentaban en menor medida que el parque de vehículos.

Se debe destacar que los niveles de actividad del parque estimados concuerdan con las estimaciones realizadas por SECTRA, lo cual es una buena fuente de calibración para determinar las emisiones de contaminantes locales.

Se determinó, en primera instancia, las emisiones de contaminantes locales para el Gran Santiago, y luego las emisiones de CO_2 para el parque vehicular nacional. El modelo estima que las emisiones de CO, NOx y PM2.5 disminuirán con el paso del tiempo. Estas disminuciones se obtienen aún a pesar del hecho que los niveles de actividad del parque

vehicular se encuentran al alza. Por lo tanto, esta disminución de emisiones se debe única y exclusivamente a mejoras tecnológicas impulsadas por las normativas EURO.

Respecto a las emisiones de CO_2, el modelo estima que éstas tendrán una tendencia al alza durante el período de evaluación. Sin embargo, su crecimiento será inferior al crecimiento de los niveles de actividad del parque. Esto se debe al hecho que, con el paso del tiempo, el parque vehicular va siendo cada vez más eficiente en términos de consumo de combustible. Este último factor, denomidado *Fuel Economics*, permitió encontrar el nivel de mejora en la eficiencia de consumo promedeio del parque para el cual las emisiones de CO_2 presentarían una baja. En particular, para una mejora de 3 % anual promedio del parque, las emisiones de este contaminante no aumentan y, para 4 %, muestran claros signos de decrecimiento.

Los avances tecnológicos de la industria automotriz, tanto en referencia a la disminución de contaminantes locales, como en la eficiencia de consumo de combustible, son una de las variables claves a la hora de atacar la generación de contaminantes en el mundo. La imposición de la normativa EURO VI para el año 2020 en Chile traería consigo reducciones de 22 % y 14 % en las emisiones de NOx y PM2.5 respectivamente, en relación a que si esta fuese impuesta cinco años después.

El análisis de distintos escenarios permitió observar la relación de ciertos parámetros de comportamiento del parque vehicular en la generación de las emisiones. Se destaca que reducir el crecimiento del parque debiera traer resultados positivos en la reducción de las emisiones. Sin embargo, lograr disminuir el crecimiento del parque no es trivial.

Por otra parte, impulsar las ventas de vehículos eléctricos aparece también como una de las mejores políticas en cuanto a disminución de las emisiones. Sin embargo, sus elevados precios, baja autonomía sumado a la baja - o prácticamente nula - dotación de electrolineras en el Gran Santiago, hacen que su penetración en el mercado sea limitada. De hecho, en la actualidad menos del 1 % de los vehículos comercializados son eléctricos.

Se debe mencionar finalmente, que como futuras extensiones, este tipo de modelos debiese incorporar factores tales como la congestión vehicular y sus efectos en las velocidades de operación en la red. Esto último impactaría los factores de emisión, y probablemente modificaría los perfiles de emisiones estimados. Otros elementos tales como la degradación de los motores y catalizadores, enriquecerían también las estimaciones. Por último, la incorporación de modelos de comportamiento que impacten las ventas de vehículos nuevos, los patrones de uso vehicular y su renovación en el tiempo, permitirían simular de forma más realista los escenarios que se intentó plantear en el presente estudio.

BIBLIOGRAFÍA

ACEA. (2016). *European automobile manufacturers association.* Descargado Diciembre 2016, de http://www.acea.be/statistics/tag/category/average-vehicle-age

AirNow.gov. (2016). *Particle pollution (pm).* Descargado de https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.particle

ANAC. (2015). *Estudios de mercado.* Descargado de http://www.anac.cl/uploads/web/Conferencia%20de%20prensa%20enero%202016.pdf

BTS. (2015). *Bureau of transportation statistics - united states department of transportation.* Descargado Diciembre 2016, de http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_26.html_mfd

BTS. (2016a). *Average fuel efficiency of u.s. light duty vehicles - united states department of transportation.* Descargado de http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_04_23.html

BTS. (2016b). *Bus fuel consumption and travel - united states department of transportation.* Descargado de http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_04_15.html

BTS. (2016c). *Combination truck fuel consumption and travel - united states department of transportation.* Descargado de http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_04_14.html

COPERT. (2014). Emep / eea emission inventory guidebook 2013 [Manual de software informático].

Dargay, J., y Gately, D. (2001). Modelling global vehicle ownership. En *Proceedings of*

the 9th world conference on transport research. Seoul, Korea.

Dargay, J., Gately, D., y Sommer, M. (2007). Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960 - 2030. *Energy Journal*, *28*(4), 143-170.

EPA. (2006). *2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventories.*

EPA. (2014). *Emission factors for greenhouse gases inventory.*

EPA. (2016a). *Calidad del aire interior.* Descargado de https://espanol.epa.gov/cai/monoxido-de-carbono

EPA. (2016b). *Light-duty automotive technology, carbon dioxide emissions, and fuel economy trends:1975 through 2013.* Descargado de http://www.epa.gov/fueleconomy/fetrends/1975-2012/420r13001.pdf

FMI. (2016). Descargado de http://www.imf.org/external/country/CHL/index.htm

Fridstrom, L. (2016). Vehicle fleet forecasts based on stock-flow modelling. *European Transport Research Review*, *8*(22).

GreenFacts. (2016). *Glosario - óxidos nitrosos.* Descargado de http://www.greenfacts.org/es/glosario/mno/oxidos-nitrogeno-nox-oxido-nitrico-no-dioxido-nitrogeno-no2.htm

Guajarati, D., y Porter, D. (2010). *Econometría* (5th ed.; S. D. C. Interamericana Editores, Ed.). McGrawHill Educación, 737 - 773.

IEA. (2016). *Co2 emissions from fuel combustion.*

INE. (2016a). *Actualización de población 2002-2012 y proyecciones 2013-2020.* Descargado de http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php

INE. (2016b). *Parques de vehículos en circulación.* Descargado de http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/transporte_y_comunicaciones/parquevehiculos.php

MMA. (2014). *Maps chile - opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático.* Descargado de http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/12/ResultadosdeFase2_MAPSChile.pdf

MODEM. (2010). *Actualización metodológica modem - modec para el gran santiago* (Inf. Téc. n.º 886846). Santiago de Chile: Ministerio de Planificación.

MODEM. (2013). *Implementación del modelo cálculo de emisiones vehiculares (modem) en ciudades con planes de transporte y planes de gestión de tránsito* (Inf. Téc. n.º 1073487). Santiago de Chile: Ministerio de Planificación.

MODEM. (2016). *Base de datos del modelo modem.* Santiago de Chile.

MTT. (2016). *Ministerio de transportes y telecomunicaciones - preguntas frecuentes sobre taxis.* Descargado Diciembre 2016, de `http://www.transportescucha.cl/faq/preguntas-frecuentes-sobre-taxis-2.html`

Ortúzar, J. d. D., y Willumsen, L. (2011). *Modelling transport* (4th Edition ed.). John Wiley & Sons.

RDataMining. (2016). Descargado de `https://i.stack.imgur.com/JusVI.png`

SECTRA. (2016). *Información de transporte urbano.* Descargado de `http://www.mtt.gob.cl/transporteurbano/`

Williams, H. C. W. L. (2016). Remit: Reducing emissions in transport [Manual de software informático].

Wu, T., Zhao, H., y Ou, X. (2014, August). Vehicle ownership analysis based on gdp per cápita in china: 1963 - 2050. *Sustainability*, *6*, 4877 - 4899.

Zegras, C. (2010, July). The built environment and motor vehicle ownership and use: Evidence from santiago de chile. *Urban Studies*(47), 1793 - 1817.

APÉNDICE

A. ANEXO 1: FACTORES DE EMISIÓN

Tabla A.1. Factores de Emisión para Buses en $[g/km]$

	CO	NOx	$PM2{,}5$
S/N	$5,71$	$16,5$	$0,909$
Euro 1	$2,71$	$10,1$	$0,479$
Euro 2	$2,44$	$10,7$	$0,220$
Euro 3	$2,67$	$9,38$	$0,207$
Euro 4	$0,223$	$5,42$	$0,0462$
Euro 5	$0,223$	$3,09$	$0,0462$
Euro 6	$0,223$	$0,597$	$0,0023$

Fuente: COPERT (2014)

Tabla A.2. Factores de Emisión para Camiones en $[g/km]$

	CO	NOx	$PM2{,}5$
S/N	$1,93$	$10,7$	$0,418$
Euro 1	$1,55$	$7,52$	$0,297$
Euro 2	$1,38$	$7,91$	$0,155$
Euro 3	$1,49$	$6,27$	$0,130$
Euro 4	$0,105$	$3,83$	$0,0239$
Euro 5	$0,105$	$2,18$	$0,0239$
Euro 6	$0,105$	$0,422$	$0,0012$

Fuente: COPERT (2014)