

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Análisis comparativo de métodos de estimación de emisiones
vehiculares en ambientes urbanos en Lima**

Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil

Autor: **Patrick Marcelo Flores Velarde**

Asesor: **Ian Vázquez Rowe**

Co-asesor: **Félix Israel Cabrera Vega**

Lima, julio, 2020

Resumen

Actualmente, el cambio climático es un fenómeno que afecta a la vida en el planeta Tierra. En este ámbito, existen diferentes dificultades a sortear para poder preservar el medio ambiente. Algunas de las dificultades que existen se revisan en las páginas siguientes y están relacionadas con la cuantificación de los contaminantes aéreos. La guía desarrollada por la Unión Europea (UE) para el cálculo de emisiones vehiculares propone tres métodos para el cálculo de emisiones. Estos métodos son utilizados dentro del marco del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y se presume que no reflejan adecuadamente las emisiones totales. Por ello, en este documento se busca desarrollar un método que brinde una mayor precisión al calcular las emisiones provenientes de los vehículos motorizados en ciudades. Esta metodología incluye el desarrollo de un modelo de microsimulación de tráfico, del cual se obtienen los datos de velocidades y aceleraciones de cada vehículo para cada segundo de simulación. Con estos datos se calculan las emisiones mediante un software de modelado de emisiones (CMEM), el cual considera ciclos de aceleración y desaceleración. Luego de realizarse el modelo y el cálculo de las emisiones se extraen los factores de emisión y se procede a una comparación. Durante la comparación con dos de los tres métodos propuestos por la UE se observa que los factores calculados mediante el CMEM son mayores para el caso de monóxido de carbono (CO) y menores en el caso del dióxido de carbono (CO₂) respecto a los brindados por la guía europea. Esto nos permite concluir que al acelerar y/o desacelerar se deja de emitir CO₂ y en su lugar se emite más CO. De esta forma, se da una situación no deseada en el ámbito urbano, pues el CO favorece la formación de smog fotoquímico. Así, se afirma que utilizando los métodos europeos se pasa por alto un potencial daño a la salud humana cuando se realizan estimaciones en ambientes netamente urbanos.

Abstract

Currently, climate change and air quality are two of the major phenomena that affect human wellbeing on planet Earth. The former thrives on ever-growing greenhouse gas (GHG) emissions due to a set of critical human-related activities, including transport. The latter is of critical importance in urban environments, mainly due to the use of fossil fuels for transport and heating and cooling devices. However, the computation of traffic in life-cycle modelling lacks in most cases the effect of speed, acceleration and deceleration, as well as driving behavior in general, on exhaust pollutant emissions. In this context, Lima, located in a temperate desert, is well known to owe most of its air pollution to traffic, as well as its high level of congestion. Therefore, the aim of this study is to develop a method that provides greater precision when calculating emissions from motor vehicles in cities, using the city of Lima as a case study. The methodology applied includes the development of a traffic microsimulation model, from which the speed and acceleration data of each vehicle are obtained for each second of simulation. With this data, exhaust emissions are calculated using an emission modeling software (CMEM), which considers acceleration and deceleration cycles. Once the model and calculation of the emissions are made, emission factors are extracted and a comparison is realized. This comparison is undergone with the first two methods (i.e., Tiers 1 and 2) proposed by the European Environmental Agency's guide for the calculation of vehicle emissions. These methods are commonly used within the framework of the Life Cycle Assessment (LCA) and it is presumed that they do not adequately reflect total emissions. The results obtained in the comparison confirm that the factors calculated using CMEM are considerably higher in the case of carbon monoxide (CO), but lower in the case of carbon dioxide (CO₂) compared to those provided by the European guide. This suggests that acceleration and deceleration processes enhance air quality pollutants in urban environments, fostering the formation of photochemical smog, whereas climate change emissions dwindle. Thus, it is claimed that using European methods, potential harm to human health is overlooked when estimates are made in purely urban environments.

Agradecimientos

Quiero empezar agradeciendo a mis padres, Luz Marina y Juan Carlos, por siempre estar presentes apoyándome y dándome su amor incondicional. Por eso y todo lo que me han brindado y enseñado, les estaré eternamente agradecido. Agradezco a mi hermano, Juan Carlos, porque sin su compañía y energía mis días serían bastante monótonos y aburridos. A Yobana, por siempre estar apoyándome desde mi infancia. A mis abuelitos, mamá Cori, mamá Luisa, papá Maxi y papá Rafito, por haber estado presentes en mi vida de una u otra forma y ayudado en mi formación como persona. A toda mi familia en general, por siempre haberme dado ánimos y creído en mí.

Quiero agradecer especialmente a Alexandra por estar siempre a mi lado y brindarme todo su cariño y apoyo emocional durante el largo proceso de elaboración de esta tesis. Agradezco también a la PUCP por brindarme las posibilidades y facilidades para realizar esta investigación. A mis profesores y amigos que contribuyeron de una u otra forma a conseguir este objetivo. Al ADEIC 2019 y al Hormigón Armado, porque lograron hacer que esta etapa de mi vida en la universidad sea más amena y alegre.

Asimismo, quiero dar las gracias a mis dos asesores, Ian Vázquez y Félix Cabrera. Ambos me brindaron su confianza para realizar este trabajo de investigación, así como su gran asesoría en temas que eran poco dominados por mí. Les agradezco por haber sido mis profesores, mentores y amigos a lo largo de esta etapa. Finalmente, agradezco a Felipe Jibaja por permitirme usar el modelo de microsimulación de su tesis de pregrado como base para esta investigación.

A todos ellos, simplemente, gracias.

Índice

Resumen.....	iii
Abstract.....	v
Agradecimientos	vii
Índice	ix
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas	xiii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificación	2
1.4. Hipótesis	3
1.5. Estado del arte.....	4
1.5.1. La problemática general: contaminación del aire, emisiones y situación actual del país con respecto a este tema	4
1.5.2. Consecuencias de la contaminación del aire producto de las emisiones vehiculares en el medio ambiente y en la salud humana	5
1.5.3. Dificultades o retos que se enfrentan al intentar medir y/o cuantificar la contaminación del aire	6
1.5.4. Análisis de Ciclo de Vida y su relación con las emisiones vehiculares	8
2. Materiales y métodos	11
2.1. Métodos que dependen de factores de emisión.....	11
2.2. Métodos que utilizan factores de emisión en modelos más complejos.....	13
2.3. Métodos que utilizan microsimulaciones de tráfico junto con modelos de emisión	14
2.4. Metodología propuesta.....	16
2.4.1. Microsimulación en VISSIM	17
2.4.2. Cálculo de emisiones utilizando el Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM)	21
2.5. Métodos planteados por la European Environmental Agency (EEA) para realizar el Análisis de Ciclo de Vida comparativo.....	23
2.5.1. Método de nivel 1	24
2.5.2. Método de nivel 2	26
2.5.3. Método de nivel 3	27
2.6. Análisis comparativo de los resultados	27
2.7. Vehículos de pasajeros.....	30

3.	Resultados y comparación.....	31
3.1.1.	Resultados y análisis para Pre-Euro	31
3.1.2.	Resultados y análisis para Euro 1	34
3.1.3.	Resultados y análisis para Euro 2.....	37
3.1.4.	Resultados y análisis para Euro 3.....	40
4.	Conclusiones	43
5.	Recomendaciones.....	44
6.	Referencias.....	46
7.	Anexos.....	52



Índice de figuras

Figura 1: Esquema resumen del proceso en el que se usan factores de emisión.....	12
Figura 2: Esquema resumen del proceso en el que se incluyen modelos,.....	14
Figura 3: Esquema resumen del proceso en el que se utiliza una microsimulación	16
Figura 4: Esquema resumen del proceso a realizarse en la presente investigación	17
Figura 5: Pestaña donde se deben insertar los datos de entrada del modelo	22
Figura 6: Pestaña donde se arma y analiza una la flota de vehículos específica.....	23
Figura 7: Categorías de vehículos	25
Figura 8: Categorías de vehículos livianos por defecto en el CMEM	27
Figura 9: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO ₂ de vehículos Pre-Euro.....	32
Figura 10: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Pre-Euro	33
Figura 11: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NO _x de vehículos Pre-Euro.....	33
Figura 12: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO ₂ de vehículos Euro 1	35
Figura 13: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Euro 1.....	36
Figura 14: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NO _x de vehículos Euro 1	36
Figura 15: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO ₂ de vehículos Euro 2	38
Figura 16: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Euro 2.....	39
Figura 17: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NO _x de vehículos Euro 2	39
Figura 18: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO ₂ de vehículos Euro 3	41
Figura 19: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Euro 3.....	42
Figura 20: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NO _x de vehículos Euro 3	42

Índice de tablas

Tabla 1: Factores de emisión para CO y compuestos orgánicos volátiles no metálicos (NMVOC).....	25
Tabla 2: Factores de emisión para NO _x y material particulado (PM).....	25
Tabla 3: Factores de emisión para N ₂ O y amoníaco (NH ₃).....	26
Tabla 4: Emisiones estimadas para las categorías usadas en el CMEM.....	28
Tabla 5: Límites de emisión según los estándares de Euro.....	28
Tabla 6: Equivalencias en Euro para categorías usadas en el CMEM para vehículos ligeros.....	29
Tabla 7: Distribución de la flota nacional según su tecnología.....	30
Tabla 8: Estadística de venta de vehículos livianos en el mercado automotor peruano.....	30
Tabla 9: Factores de emisión Pre-Euro calculados por el CMEM en g/km y g/kg.....	31
Tabla 10: Factores de emisión Pre-Euro proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1.....	31
Tabla 11: Factores de emisión Pre-Euro proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2.....	32
Tabla 12: Factores de emisión Euro 1 calculados por el CMEM en g/km y g/kg.....	34
Tabla 13: Factores de emisión Euro 1 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1.....	34
Tabla 14: Factores de emisión Euro 1 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2.....	35
Tabla 15: Factores de emisión Euro 2 calculados por el CMEM en g/km y g/kg.....	37
Tabla 16: Factores de emisión Euro 2 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1.....	37
Tabla 17: Factores de emisión Euro 2 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2.....	38
Tabla 18: Factores de emisión Euro 3 calculados por el CMEM en g/km y g/kg.....	40
Tabla 19: Factores de emisión Euro 3 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1.....	40
Tabla 20: Factores de emisión Euro 3 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2.....	41

1. Introducción

1.1. Motivación

Desde hace varios años se percibe que el planeta está más caliente de lo que debería estar sin la presencia de los seres humanos, más específicamente, sin la presencia del efecto invernadero adicional generado por ellos (Schmidt, 2010). Este, junto con otros problemas medioambientales como el calentamiento global, ha tomado relevancia a nivel mundial durante los años más recientes. Además, se ha convertido en un punto importante para muchos países dentro de su agenda nacional. Por tal motivo, durante estos últimos años se han realizado estudios acerca de qué contaminantes son los que más afectan al medio ambiente, cómo se generan y cómo se puede disminuir su presencia en el planeta.

La contaminación del aire en las ciudades es un tema de suma relevancia tanto en el ámbito de cuidado del medio ambiente como en el entorno de la salud de las personas. En este sentido, se conoce que dentro de las principales fuentes de emisiones de contaminantes se encuentra el sector transporte (Union of Concerned Scientists, 2018). Dicho sector tiene gran presencia e influencia en la calidad del aire de las ciudades (World Health Organization, 2005); por tal motivo, se deben conocer los métodos que existen para cuantificar dichas emisiones vehiculares. Esto es importante especialmente en ciudades de países en vías de desarrollo como el Perú y otros países de Asia, África y el Medio Oriente; debido a las consecuencias que puede traer a la salud de la población (World Health Organization, 2019).

Estos efectos dañinos son más notorios en ciudades altamente urbanizadas como la ciudad de Lima. Al existir una gran concentración de vehículos automotores, en su mayoría sumamente antiguos, los contaminantes generados a partir de la combustión en los motores son más abundantes (World Health Organization, 2019). El Perú es un país con baja inversión en investigación, solamente se destina para este fin el 0.08% del Producto bruto Interno (PBI) según un censo del año 2017 (CONCYTEC, 2017). Debido a ello, es difícil contar con un amplio repertorio de métodos para medir o cuantificar las emisiones de elementos y compuestos dañinos emitidos al ambiente.

Sin embargo, no solo basta conocer las técnicas de medición más usadas, sino que es importante conocer su exactitud y precisión. Con este conocimiento, se planteará una nueva herramienta para la estimación de emisiones vehiculares que apunte a mejorar los dos aspectos mencionados anteriormente. Para tal fin, se pretende utilizar la microsimulación de tráfico junto con un modelo instantáneo de cálculo de emisiones. Posteriormente se podrán verificar

los métodos que usualmente se aplican en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparándolos con la eficacia del método propuesto.

1.2. Objetivos

La presente tesis tiene como objetivo general desarrollar un nuevo método de cálculo de emisiones vehiculares en ambientes urbanos a través del CMEM (Comprehensive Modal Emissions Model) que ayude a utilizar valores que representen con mayor precisión el comportamiento vehicular en zonas con fenómenos recurrentes de aceleración y desaceleración. Asimismo, los objetivos específicos que ayudarán a alcanzar el objetivo general se muestran a continuación:

- Determinar las deficiencias de los métodos que son usados en un ACV para medir emisiones vehiculares con aceleración y desaceleración que siguen la metodología planteada por la European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) y la European Environmental Agency (EEA)
- Comparar el procedimiento propuesto (utilizando una microsimulación de tráfico) con dos de los tres niveles de precisión planteados por la EMEP/EEA en la medición de emisiones vehiculares a nivel de costo y tiempo requeridos para la realización de cada nivel de precisión por separado
- Detallar las omisiones y/o diferencias en precisión que se puedan encontrar al comparar el uso de una microsimulación con respecto a los modelos utilizados por el ACV para medir emisiones que no involucran aceleración y desaceleración

1.3. Justificación

El cambio climático es un elemento importante del grupo de los llamados límites planetarios; estos se establecieron producto de un análisis de las perturbaciones humanas en el planeta Tierra. Sirven para poder controlar y medir los efectos negativos de las actividades humanas en el medio ambiente y así poder tomar medidas adecuadas para mitigarlos (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015). El efecto invernadero provocado por la actividad humana es una parte importante del problema medioambiental del cambio climático. Este efecto se produce por las emisiones provenientes del sector electricidad, transporte y otras formas de energía; los principales gases emitidos son el vapor de agua, óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2) (USEPA, 2017; NASA, 2020). Según la United States

Environmental Protection Agency, más del 10% de los contaminantes que afectan al medio ambiente provienen del sector transporte (USEPA, 2018). De ahí proviene la necesidad del cálculo de las emisiones producidas por dicho sector.

En los últimos años se han realizado diversos estudios y desarrollado diversos métodos referidos a las emisiones vehiculares (J. Lin, Chiu, Vallamsundar, & Bai, 2011; S. D. Oduro, Ha, & Duc, 2016; Quaassdorff, Kwak, Borge, & Lee, 2017; Sider, Alam, Farrell, Hatzopoulou, & Eluru, 2014). Sin embargo, hasta ahora se hace complejo analizar la totalidad de emisiones de algunos contaminantes como NO_x o PM_{10} , pues la metodología empleada no es suficientemente exacta y se realizan una gran cantidad de estimaciones en algunos factores de emisión utilizados (Papson, Hartley, & Kuo, 2012). Una microsimulación de tránsito puede representar la realidad de forma casi exacta, pues es calibrada y validada para tal fin; proporcionando, además, datos de todos los vehículos presentes en una red y en cada instante del tiempo. Por ello, un planteamiento para medir la cantidad de emisiones vehiculares utilizando una microsimulación de tráfico es importante.

Con este acercamiento diferente se podría aportar una nueva herramienta de medición que se puede utilizar en la metodología de ACV. Ya que, se puede generar un nuevo instrumento que contemple un mayor impacto (al contemplar aceleraciones y desaceleraciones) en los procesos que involucran movimientos vehiculares (Ibarra-Espinosa et al., 2018). Además, en caso de que no se presente una mayor diferencia, se pueden validar los métodos que son usados actualmente para cuantificar emisiones vehiculares. Esto se hace con el fin de incrementar la cantidad de métodos con los que puede optar la metodología de ACV para el cálculo de emisiones vehiculares.

1.4. Hipótesis

El uso de una microsimulación de tráfico para cuantificar las emisiones vehiculares de determinados contaminantes no solo es más preciso que dos de los tres niveles de medición planteados por la EMEP/EEA que se utilizan en la metodología de ACV; sino que muestra que con estos otros métodos se omite una gran cantidad de emisiones a la hora de acelerar y desacelerar. Asimismo, se cree que al utilizar la metodología planteada se obtienen diferencias notorias en los impactos ambientales al sumarse lo hallado con los demás factores que influyen en la contaminación del aire al realizar un ACV en la ciudad de Lima.

1.5. Estado del arte

1.5.1. La problemática general: contaminación del aire, emisiones y situación actual del país con respecto a este tema

El Perú está comprometido como miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 30% con respecto a las proyectadas para el año 2030 (MINAM, 2015). Los GEI son gases que atrapan calor en la atmósfera y poco a poco incrementan la temperatura de la Tierra. De ellos, el principal gas de efecto invernadero es el CO₂, pues según la United States Environmental Protection Agency (USEPA), este representa alrededor del 65% de los GEI emitidos a nivel mundial. De este valor, aproximadamente un 14% es emitido por el sector de transporte debido al uso de combustibles fósiles (USEPA, 2018).

En muchas ciudades, la calidad del aire se ve afectada negativamente por la presencia de gases como ozono a nivel del suelo (O₃), contaminación de partículas (PM), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) (Nunez, National Geographic, 2019); algunos de estos contaminantes pertenecen al grupo de los GEI. Asimismo, dicha calidad se ve afectada por diversos factores, como por ejemplo, la contaminación, deforestación, factores meteorológicos y el uso de combustibles fósiles tanto en el área industrial como el de transportes (Zhenghua & Zhihui, 2017). Reforzando lo que dice la USEPA, las mayores concentraciones de contaminantes como las partículas suspendidas totales (TSP, por sus siglas en inglés), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de carbono (CO_x) provienen tanto de los escapes de los vehículos como de la combustión del carbón en otros procesos industriales como la producción de cemento (Niaz, Jiti, & Zhang, 2015).

En la ciudad de Lima, debido al poco planeamiento urbano presente a lo largo de su historia (Castillo García, 2017), se pueden encontrar ambos tipos de emisiones tanto dentro de la ciudad como en las periferias. Esto se debe a que la calidad del aire puede empeorar o mejorar junto con el aumento o disminución de los GEI; ya que, en algunos casos, las fuentes de emisión son las mismas (West et al., 2013). Además, según estudios realizados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en el año 2014, se estima que para el año 2030 las cantidades de CO₂ producto de las emisiones vehiculares en Lima serán de más de 7 millones de toneladas (aproximadamente 75% más que lo que se emitió en el 2014). A este gas de efecto invernadero, se suman otros gases producto de la misma fuente como el CO, NO_x, SO₂, material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}) y compuestos orgánicos volátiles

(COV); todos con la misma tendencia a incrementarse en el futuro (Dawidowski, Sánchez-Ccoyllo, & Alarcón, 2014).

1.5.2. Consecuencias de la contaminación del aire producto de las emisiones vehiculares en el medio ambiente y en la salud humana

Las emisiones vehiculares que contribuyen a la contaminación del aire tienen efectos negativos tanto en el medio ambiente como en la salud humana (USEPA, 2018). Empezando por el medio ambiente, uno de los principales efectos negativos que producen los GEI junto con las demás emisiones vehiculares es el aumento de la temperatura del planeta. Esto se da debido a que los GEI absorben la radiación infrarroja que emite el planeta y no dejan que salga de nuestra atmósfera, reduciendo la velocidad a la que el planeta puede enfriarse y así calentando la superficie (Schmidt, 2010). Este calentamiento afecta a la vida silvestre, la agricultura, la cantidad de agua en los océanos; genera sequías, inundaciones y olas de calor más intensas (Union of Concerned Scientists, 2018). Esto a su vez puede generar cambios más drásticos en el ambiente como el desbalance de los ecosistemas, desarrollo de desastres naturales, esparcimiento de enfermedades y cambios en los patrones del clima (Das Sharma, 2008).

Otro efecto negativo en el ambiente es la destrucción de la capa de ozono, esta es una “capa” estratosférica que tiene una gran concentración de ozono (O_3). El N_2O , junto con otros gases como el óxido nítrico, peróxido de hidrógeno o el cloro (NO , H_2O_2 , Cl), principalmente contribuye a la destrucción de dicha capa, la cual protege a la tierra de los rayos ultravioletas del sol (Portmann, Daniel, & Ravishankara, 2012). Esta destrucción se da por la interacción de los gases mencionados con el O_3 a nivel estratosférico, degradando las moléculas de este gas al quitarle un átomo de oxígeno. La disminución de la cantidad de O_3 en la estratósfera también disminuye la protección contra los rayos del sol y aumenta la exposición a la radiación ultravioleta (UV-B). Esto trae como consecuencia una anomalía en el crecimiento de las plantas; daños en el desarrollo de la vida marina, tanto animal como vegetal; daños a materiales sintéticos y cambios en los ciclos biogeoquímicos de gases importantes (USEPA, 2018).

Asimismo, un tercer efecto negativo en el ambiente se da cuando el SO_2 y NO_2 se juntan con el agua de lluvia para producir lluvia ácida (Green, 2018). Esto genera ácidos sulfúricos y nítricos que posteriormente se mezclan con el agua y otros materiales antes de caer al suelo (USEPA, 2017). Esta lluvia ácida trae consecuencias en el aire como la niebla ácida, la cual dificulta la visibilidad, movimiento y la entrada de luz solar. Además, afecta los monumentos, estatuas o puentes, pues causa corrosión en ellos, así como también destruye materiales sensibles a estos ácidos (telas y papeles). De la misma forma, las plantas se ven perjudicadas por la acidificación de la tierra y su reducción de pH. Esto afecta a los nutrientes que se

encuentran en el suelo y permite que elementos tóxicos como el aluminio (Al) ingresen a las plantas y las maten. De igual manera se ven afectados los lagos y ecosistemas acuáticos, pues la lluvia ácida cambia el pH del agua y por ello muchas especies acuáticas no pueden vivir ni reproducirse con normalidad (Butnariu & Samfira, 2013). Si bien algunas especies toleran la acidificación mejor que otras, al ser parte de un ecosistema interconectado, lo que afecta a una especie eventualmente afecta a otras en la cadena alimenticia, como las aves, por ejemplo (Nunez, 2019).

Por el lado de la salud humana, se conocen los daños específicos que pueden causar los diversos contaminantes generados por las emisiones vehiculares. La mayoría de ellos asociados con problemas respiratorios o daño a los pulmones, así como también cáncer (Chakraborty, 2009). Sin embargo, se ha encontrado una relación potencial entre la presencia de estos contaminantes en el ambiente con accidentes cerebrovasculares y problemas cardíacos, especialmente en personas con insuficiencia cardíaca, arritmias frecuentes o ambos (Brook et al., 2004). Por ejemplo, se sabe que el CO es un gas venenoso que interfiere con la capacidad de la sangre de llevar oxígeno al cerebro o al corazón; el ozono troposférico (O₃), es dañino para los pulmones, ya que empeora su funcionamiento; el SO₂ y los NO_x restringen los pasajes de aire dificultando la respiración de niños y personas asmáticas. Asimismo, el PM_{2.5} y el PM₁₀, al no poder ser retenido en su totalidad en la nariz, llega hasta los pulmones y puede causar irritación; además, dichas partículas ayudan a llevar contaminantes tóxicos como el benceno y formaldehído hasta los pulmones, lo cual puede generar mutaciones genéticas, defectos en recién nacidos o cáncer. Otro contaminante que actualmente ha reducido su presencia en el ambiente es el plomo, debido a que puede causar daño a la sangre, nervios y órganos, reducir la capacidad mental y elevar la presión arterial (Altose, 2000).

Estos efectos negativos en general son las consecuencias finales de la emisión en cantidades exorbitantes de gases contaminantes. Se mencionan o describen estos desenlaces, pues son las muestras más concretas y visibles de un fenómeno existente. En la metodología de ACV se conoce a estos últimos puntos como “endpoints” y forman parte de los resultados finales de un análisis de este tipo. Más detalles acerca de este tema junto con la metodología de ACV se tocarán más a fondo en las siguientes páginas.

1.5.3. Dificultades o retos que se enfrentan al intentar medir y/o cuantificar la contaminación del aire

Junto con los problemas que se generan por la contaminación debido a emisiones vehiculares se presentan otras dificultades en cuanto a la medición, predicción o estimación de dichas emisiones. Una primera dificultad que se debe superar es la falta de información relevante

relacionada a los temas tanto de mediciones como de contaminación aérea en sí. Esto es más grave y notorio en países en vías de desarrollo como el Perú, pues no se cuenta con tecnología ni infraestructura adecuada para realizar una adecuada caracterización de la contaminación del aire (Underhill et al., 2015). Por ejemplo, en la ciudad capital solo se encuentran 10 estaciones de medición para calcular el índice de calidad del aire (ICA), las cuales no son suficientes y por ello no se pueden obtener resultados representativos para una ciudad tan grande y poblada como lo es Lima (Lima Air Quality Monitor - Embassy of the United States, 2018). Asimismo, se han realizado diversos intentos por mejorar la precisión en la estimación y predicción de las emisiones vehiculares en distintas zonas utilizando factores más complejos o simulaciones del tráfico más elaboradas (Jazcilevich et al., 2007). Sin embargo, el problema vuelve a surgir y radica en que muchos de estos métodos requieren información vehicular detallada para cada día, hora o lugar en específico. Datos que muchas veces no se encuentran disponibles tan fácilmente o que demoran en conseguirse en diversos países en desarrollo (Ibarra-Espinosa et al., 2018).

Por otro lado, un segundo reto que se enfrenta a la hora de medir las emisiones vehiculares es el que trae consigo la utilización de diversas aproximaciones, suposiciones u omisiones a la hora de calcular y plantear modelos o métodos de estimación (Usman, Yasin, Rashid, & Nasir, 2017). Como parte de los factores que muchas veces no son tomados en cuenta para la estimación de emisiones se tienen, por un lado, los relacionados al vehículo y al motor y, por otro lado, los relacionados al ambiente en el que se desarrollan las mediciones. Los primeros pueden ser el tipo y composición del combustible, el tamaño del motor (tipo de vehículo), la relación aire-combustible y la eficiencia del motor. Los segundos abarcan la temperatura ambiental, el diseño geométrico de las carreteras o vías y las características específicas de la región involucrada (Abo-Qudais & Qdais, 2005). Sin embargo, existen métodos que son usados para estimar las emisiones vehiculares y que varían según su nivel de precisión e involucran unos u otros de los factores mencionados anteriormente, siendo algunos más precisos que otros (Larrea-Gallegos, Vázquez-Rowe, & Gallice, 2017). Tal es el caso de los tres métodos propuestos por la EEA. De estos métodos, el primero consiste en una multiplicación simple utilizando factores de emisión; el segundo involucra tipos de vehículos al cálculo previo y el tercero considera tiempos de aceleración y desaceleración (Ntziachristos et al., 2012).

Finalmente, una tercera dificultad ligada a la anterior radica en la variabilidad de los resultados obtenidos. Es decir, como se viene indicando desde hace varios años, muchos de los modelos para cuantificar y evaluar emisiones e impactos ambientales derivados del tráfico vehicular no son lo suficientemente adecuados para analizar y valorar situaciones en las cuales los cambios

de comportamiento entre un escenario previo y otro posterior son vitales (Ahn, Rakha, Trani, & Van Aerde, 2002). Además, en la práctica, algunos de los factores que afectan en la medición de emisiones vehiculares como velocidad, volumen vehicular, comportamiento del conductor, condiciones de operación del vehículo o ruido, pueden afectar de forma distinta a la cantidad de contaminación emitida. Por ejemplo, a bajas velocidades se registran mayores niveles de contaminación y a altas velocidades se obtienen niveles de contaminación relativamente más bajos (Gan, Davies, Koehoorn, & Brauer, 2012).

Todas estas complicaciones demuestran la variabilidad de los valores que se pueden obtener al realizarse análisis de emisiones mediante varios métodos y lo complejo que puede llegar a ser realizarlos. Es necesario pues, realizar una comparación entre las formas más utilizadas junto con una nueva metodología para poder obtener un acercamiento hacia un nivel de precisión cada vez mayor. De esta forma se tendrían más claros las pros y contras de cada nivel de precisión y se podría optar por el método que sea más viable para su aplicación a nivel local.

1.5.4. Análisis de Ciclo de Vida y su relación con las emisiones vehiculares

La metodología del ACV es una técnica que puede ser utilizada para evaluar y cuantificar los impactos ambientales ocasionados por un determinado proceso (Hellweg & Milà i Canals, 2014). Esta metodología comienza con la elección de una unidad de función, la cual actuará como la medida en función a la cual se realizará la cuantificación de elementos que ingresan y salen del sistema en cuestión. Dicha enumeración de las entradas y salidas en el sistema generan un listado de emisiones en la salida que conforman lo que es llamado inventario de ciclo de vida. Este inventario nos permite conocer cantidades de ciertos elementos que son emitidos al ambiente en diferentes formas. Con estos datos se pueden utilizar dos tipos de métodos, “midpoint” y “endpoint” para poder cuantificar y expresar los resultados (Bare, Hofstetter, Pennington, & Udo de Haes, 2000). Utilizando los primeros se debe realizar un cálculo utilizando factores de caracterización para así cuantificar los efectos para cada categoría de impacto ambiental (agotamiento de recursos, calentamiento global, eutrofización, toxicidad, acidificación, entre otras). Este tipo de resultados sirven para alertar y trabajar en un nivel técnico entre los especialistas. Por otro lado, los métodos “endpoint” sirven para poder describir y medir el daño que se genera y que se pueda alertar al público en general en categorías más accesibles. Estos métodos pueden partir desde el inventario o desde los resultados de métodos “midpoint” para poder generar los indicadores apropiados. Dichos indicadores son más generales y se dividen en daño a la salud humana, daño a los ecosistemas y escasez de recursos (Treloar, Love, & Crawford, 2004; Yi, Kurisu, & Hanaki, 2014).

En el ámbito de la ingeniería civil se encuentra presente principalmente en el ámbito de la construcción sostenible y en la cuantificación de impactos antes, durante y después de la construcción (Aguilar & Loo, 2017). Dentro de este ámbito se tienen ACV comparativos entre materiales de construcción (como, por ejemplo, albañilería convencional, bloques de ladrillo, bambú y bambú reforzado). En estos casos, el ACV es utilizado para cuantificar los posibles beneficios o perjuicios que pueden traer diversos materiales de construcción al medio ambiente. Esto ayuda a que futuros proyectos tengan en consideración el impacto ambiental de cada material antes de elegir uno u otro antes de iniciar el proceso de construcción (Zea Escamilla et al., 2018).

Asimismo, estos ACVs son utilizados para realizar estudios acerca de los materiales presentes en la construcción, como, por ejemplo, el cemento o el uso de los restos del concreto en lugar de agregado natural (Vázquez-Rowe et al., 2019). Mediante un ACV, para este último caso, se pudo encontrar que utilizando agregado de concreto reciclado y cemento geopolimérico se reducían las emisiones al medio ambiente en un 30% comparado con el uso de cemento Portland y agregado natural. Demostrando así que utilizando un ACV se pueden cuantificar las diferencias en cuanto a emisiones de diferentes técnicas en la construcción (Teh, Wiedmann, & Moore, 2018). Siguiendo la misma línea se encuentran los ACV que se centran en la gestión de los residuos de la construcción. De esta forma se pueden visualizar los resultados para cada tipo de residuos existentes en la construcción e identificar cuáles son los que generan un mayor impacto en el ambiente, para poder prevenir su aparición. De esta forma el ACV es utilizado como un instrumento de prevención de impactos ambientales (Bizcocho & Llatas, 2019).

Alejados del ámbito de la construcción de edificaciones, pero ligados a la prevención de impactos ambientales y la ingeniería civil, se encuentran los ACVs aplicados en caminos y carreteras. En estos se analizan los impactos tanto en la fase de construcción como las etapas de mantenimiento y uso de las vías. Producto de estos análisis se puede identificar que los materiales que se usan en la etapa de construcción tienen una incidencia importante en las emisiones y que pueden variarse para reducir su impacto (Jullien, Dauvergne, & Proust, 2015). En el caso de países tropicales en vías de desarrollo como Perú, también se pueden observar los impactos que se tienen al realizar carreteras no pavimentadas en zonas tropicales. Por ejemplo, en el caso de la selva, al realizarse una carretera de este tipo la mayor emisión de contaminantes se realiza durante la deforestación previa a la construcción misma de la carretera. Esto se aplica principalmente en localidades que cumplen con estas condiciones del terreno (Larrea-Gallegos et al., 2017). Sin embargo, en carreteras pavimentadas de alto tránsito, la etapa de uso a lo largo de su vida activa es la que contribuye en mayor medida con

la generación de emisiones dañinas para el ambiente y el ser humano. En varios estudios se puede observar que las emisiones de GEI y NO_x son sumamente altas debido al tránsito vehicular. Además mediante el uso de ACV se puede observar que los estándares de calidad automotriz contribuyen de forma indirectamente proporcional con la emisión de partículas al ambiente (Araujo, Oliveira, & Silva, 2014; Guo et al., 2018; Verán-Leigh, Larrea-Gallegos, & Vázquez-Rowe, 2019).



2. Materiales y métodos

En esta sección se revisarán algunos de los métodos planteados y usados hasta el momento por la bibliografía junto con sus respectivos datos de entrada, resultados y alcances. Esto servirá para realizar una comparación entre las diferentes metodologías que se presentarán en este documento. Asimismo, al final del capítulo se detallará más concisamente cada paso a realizarse para lograr aplicar el método planteado.

Los diferentes métodos existentes para estimar emisiones vehiculares son diversos y cada uno tiene un proceder diferente. Por tal motivo, se agruparán según la siguiente distribución: métodos que dependen en gran medida de factores de emisión; métodos que utilizan estos factores como parte de modelos más complejos y métodos que utilizan microsimulaciones de tráfico y un modelo para obtener emisiones.

2.1. Métodos que dependen de factores de emisión

Los factores de emisión son coeficientes que intentan representar de la mejor manera la cantidad de un contaminante que es emitida al ambiente en relación con la actividad que lo genera. Estos factores suelen ser dados en valores de peso de contaminante por unidad de la actividad generadora (Ejem. peso del contaminante, volumen del gas o distancia recorrida por el vehículo) (USEPA, 2016; USEPA, 2016). En muchos casos, estos factores varían según la ubicación donde se realiza el estudio. Asimismo, son afectados por la categoría vehicular, el tipo de combustible, edad y modelo del vehículo, uso de aire acondicionado, sistema de control de emisiones y control de la relación aire/combustible (Londoño, Correa, & Palacio, 2011). Un ejemplo bastante representativo es el primero de los tres niveles de precisión (métodos) planteados por la EEA. El cual involucra en el cálculo únicamente el consumo de combustible de la categoría de vehículo para determinado combustible y su respectivo factor de emisión (Ntziachristos et al., 2012).

El segundo método planteado por la EEA también se puede incluir en este grupo, pues en el cálculo realizado en el primer nivel de precisión se reemplaza el factor de emisión por uno que incluye la tecnología del vehículo. Además, este factor es multiplicado por la distancia recorrida por tipo de vehículos y el número de vehículos existentes por categoría (Ntziachristos et al., 2012). Siguiendo por la misma línea, existe metodología que utiliza factores de emisión junto con datos a mayor detalle o mejor resolución; como perfiles horarios de tráfico o tipo y longitud de vías (Carmona et al., 2016).

El procedimiento a seguir generalmente es sumamente sencillo, pues consiste en una multiplicación entre los factores de emisión y los diversos modificadores que se le asignen.

Dicha ecuación se repite para cada tipo de vehículo y cada contaminante estudiado, para terminar siendo una sumatoria en función a ambas variables (Carmona et al., 2016; Londoño et al., 2011). Dicho proceso se muestra a grandes rasgos en la Figura 1.

Luego de observar los resultados de esta metodología, se puede decir que dichos métodos resultan aceptablemente adecuados para la evaluación de las emisiones generadas por el tráfico vehicular y de su dispersión. Asimismo, estos resultados a gran escala son una herramienta que ayuda a la planificación y evaluación de los efectos del tráfico vehicular (Londoño et al., 2011).

Sin embargo, se pueden apreciar, además, ciertas desventajas en el uso de dichos métodos. La principal salta a la vista y es que la estimación de emisiones vehiculares es altamente sensible a la forma de obtener los datos. Es decir, factores como la desactualización de factores de emisión, la falta de homogenización de la información o la ausencia de información confiable sobre flujos vehiculares generan gran incertidumbre en los resultados (Carmona et al., 2016). Asimismo, en algunos lugares no se cuenta con los estudios necesarios para obtener factores de emisión y no hay una base de datos robusta para poder utilizar estos métodos (Tang, Chao, Wang, & Chen, 2014).

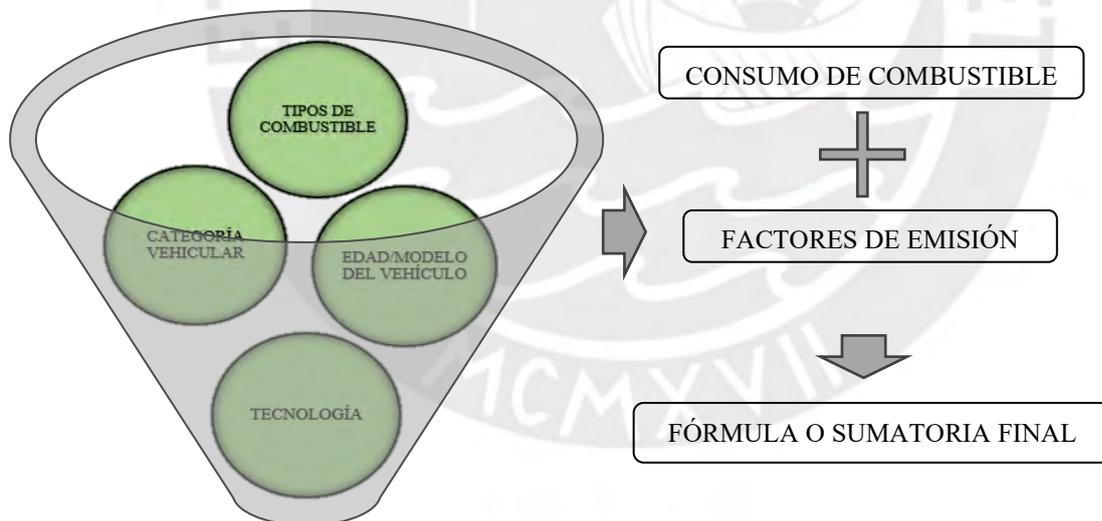


Figura 1: Esquema resumen del proceso en el que se usan factores de emisión

2.2. Métodos que utilizan factores de emisión en modelos más complejos

Ya sea que se cree un nuevo modelo o se utilice uno existente, la diferencia principal que existe entre los métodos que se verán a continuación y los que se vieron en el acápite anterior es que al utilizar modelos se está realizando una operación matemática más compleja. Es decir, el resultado final de los modelos surge producto de numerosas experimentaciones utilizando combinaciones polinómicas, que varían los niveles de velocidad y aceleración. Y muchas veces terminan siendo combinaciones de dichos parámetros elevados a diferentes exponentes (Ahn et al., 2002).

Para poder utilizar o crear un modelo en estos métodos es necesario contar con mayor información, no sólo de los vehículos sino también de su entorno. Por ejemplo, hay modelos que involucran valores de energía potencial/cinética, masa del vehículo, velocidad del viento, resistencia del viento, densidad del aire, aparte de los valores de velocidad y aceleración del vehículo (C. Lin, Gong, & Qu, 2015). Estos valores de entrada a veces son requeridos para varios segmentos o porciones del área analizada y sirven para integrar las ecuaciones (de velocidad, densidad o datos del clima) en una sumatoria que relacione a todas las variables entre sí (Samaranayake et al., 2014).

En relación con los métodos planteados por la EEA, el tercer nivel de precisión se puede considerar dentro de esta categoría (Ntziachristos et al., 2019). Esto debido a que dicho método es más complejo que los anteriores y en su uso requiere de más datos de campo. En esta metodología se consideran dos estancias en el uso del vehículo, uno cuando está “frío” y otro cuando está “caliente”. El primero hace referencia a cuando un carro se está prendiendo y el otro a cuando ya se tiene el vehículo en movimiento. Además, considera la locación del vehículo (rural, urbano o autopista) para poder estimar las condiciones de manejo. Para ello, requieren los datos del número de vehículos, kilometraje de los vehículos, nivel de tecnología, tipos de combustibles y naturalmente de factores de emisión. Estos últimos, modificados según algunas variables mencionadas líneas arriba (Ntziachristos et al., 2012).

En caso de que se desee utilizar algún tipo de modelo, se pueden encontrar varios ya existentes para el cálculo de emisiones vehiculares, como por ejemplo los modelos de dispersión CALINE (Sharma, Gulia, Dhyani, & Singh, 2013). Este tipo de modelos sirven como herramientas para planificación de transporte, pues puede estimar concentraciones provenientes de los automóviles utilizando las emisiones en el borde de una vía como datos de entrada (Samaranayake et al., 2014). Otros modelos que también están relacionados con la estadística funcionan con regresiones lineales múltiples para formar una función de regresión entre las variables. Esto con el fin de predecir factores de emisión o emisiones en sí a partir de

datos de aceleración o desaceleración (Oduro, Metia, Duc, & Ha, 2013). Todos estos procedimientos quedan resumidos en la Figura 2.

Con estos procedimientos se puede obtener datos y estimaciones más precisas y detalladas según escenarios específicos. Sin embargo, en muchos modelos se requieren datos más específicos relacionados con vehículos pesados o de alta emisión; esto puede ser un problema para algunos países sin bases de datos lo suficientemente capacitadas (Ntziachristos et al., 2019). Asimismo, un problema fundamental en el modelado de emisiones vehiculares radica en que es sumamente complejo determinar las relaciones existentes entre las variables dependientes y los predictores como velocidad, aceleración, temperatura ambiental, potencia, peso, temperatura ambiental, entre otros factores (Oduro, Metia, Duc, Hong, & Ha, 2015).

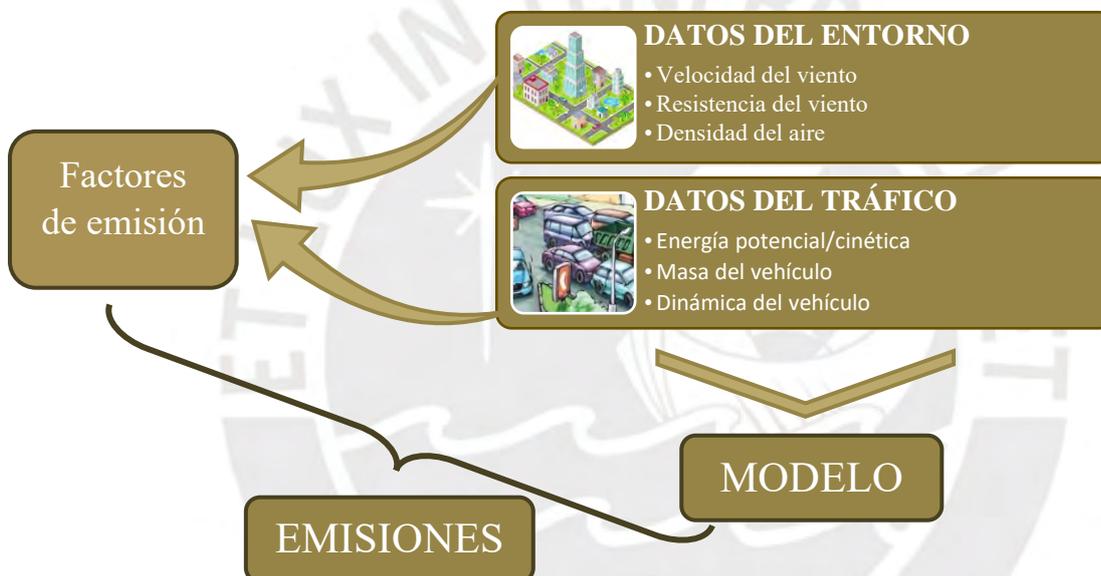


Figura 2: Esquema resumen del proceso en el que se incluyen modelos^{1,2}

2.3. Métodos que utilizan microsimulaciones de tráfico junto con modelos de emisión

El uso de una microsimulación de tráfico es un proceso estocástico, lo que quiere decir que sus resultados están sujetos a probabilidades y evolucionan en el tiempo de forma aleatoria (RAE, 2017). Esto implica que para obtener resultados confiables es necesario realizar un

¹ Imagen 1 recuperada de <https://fr.dreamstime.com/illustration-stock-ic-ne-isom%C3%A9trique-de-conception-plate-de-ville-image60426527>

² Imagen 2 recuperada de <https://www.unocero.com/smartphones/5-apps-para-dejar-atras-al-trafico/>

procedimiento estadístico en base a múltiples datos recolectados a lo largo del tiempo (Dowling, Skabardonis, & Alexiadis, 2004).

Para ello, es necesario contar con otro tipo de enfoque en la recolección de datos. En este caso no se precisan datos referentes a vehículos y velocidades de los mismos; sino que estos datos son generados a partir de otros factores. Dichos factores pueden ser de agresión y/o percepción, los cuales representan las características del comportamiento de los vehículos o conductores en el ambiente simulado (Mascia et al., 2017). Para complementar esos factores, los datos a recolectarse serán principalmente de flujos vehiculares, tiempos de viaje, longitud de colas, fases de semáforos, entre otros relacionados con el funcionamiento del área de estudio (Dowling et al., 2004).

Con los datos recolectados y colocados en el programa de microsimulación se debe calibrar y validar (ambos procesos serán detallados más adelante) el modelo de tráfico. Es decir, se debe garantizar que este represente la realidad con cierto nivel de confianza. Para tal fin, se procede a realizar un análisis estadístico llamado pruebas de hipótesis para verificar la diferencia de medias entre los datos medidos y los que el programa proporciona (Dowling et al., 2004; Mascia et al., 2017). Una vez que se tiene el modelo calibrado y validado se puede correr el programa para obtener los datos necesarios en el cálculo de las emisiones vehiculares. Esto implica operaciones (aceleración o desaceleración) de cada vehículo segundo a segundo, así como también características de la red y otros parámetros de los vehículos (Abou-Senna, Radwan, Westerlund, & Cooper, 2013).

Posteriormente se pueden calcular las emisiones emitidas por los vehículos en el sistema. En muchos casos se utilizan modelos de dispersión o de simulación de tráfico para estimar las emisiones vehiculares; por ejemplo, los modelos CALINE o AIRE. Estos modelos ayudan a generar factores de emisión o utilizan factores ya existentes para calcular lo que se emite en el área de estudio o en segmentos de ella (Alzuhairi, Aldhaheri, Sun, Oh, & Kwigizile, 2016; Mascia et al., 2017). Así, el proceso de trabajo que se utiliza puede quedar sintetizado en la Figura 3.

Estos métodos son altamente precisos pues abarcan una mayor cantidad de elementos en sus cálculos y estimaciones que nos permiten estimar mejor las emisiones del sector transporte. Con estos métodos se ha llegado a saber que el frenado, el ralenti y el movimiento a velocidades más bajas, junto con la consecuente re-aceleración, impactan significativamente a las tasas de emisiones vehiculares de contaminantes (Abou-Senna et al., 2013). Sin embargo, estas metodologías no son perfectas, pues parte de sus limitaciones pasan por la falta o deficiencia en el conteo de tráfico en las intersecciones para poder realizar la calibración y

validación. Esto puede llegar a ser un problema en países donde no se cuenta con tecnología que pueda ayudar a estas actividades y se tienen que realizar manualmente (Ibarra-Espinosa et al., 2018; Irin, 2015).

Asimismo, tanto para el uso del programa de microsimulación como para el uso del modelo se requiere una computadora con alta potencia. Esto se debe a que el proceso de correr la simulación de tráfico requiere una cantidad de tiempo significativo. Usualmente, una microsimulación requiere ser corrida más de una vez y posteriormente se requiere almacenar los datos obtenidos de velocidad o aceleración instantáneas junto con los demás datos del volumen de tráfico. Además, el modelo de emisiones también toma un tiempo considerable en transformar los datos obtenidos anteriormente en resultados de emisiones vehiculares (Dowling et al., 2004; Irin, 2015).

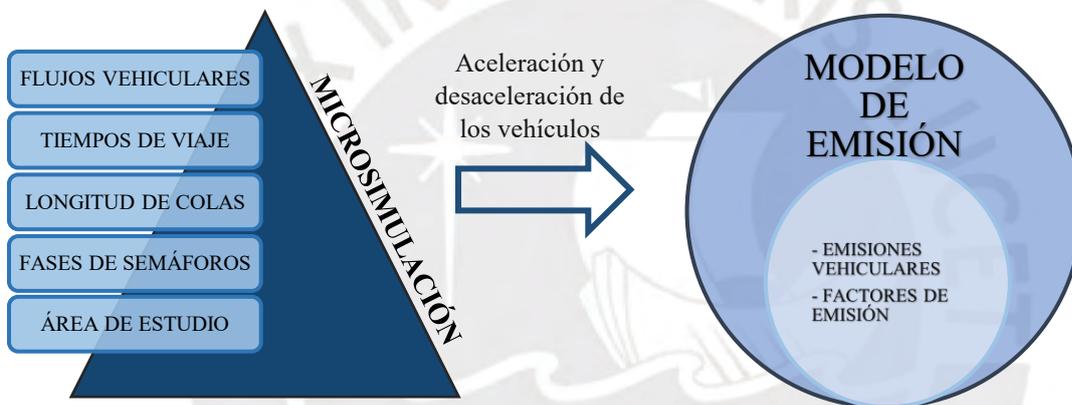


Figura 3: Esquema resumen del proceso en el que se utiliza una microsimulación

2.4. Metodología propuesta

El procedimiento a seguir forma parte del tercer grupo de metodologías. Es decir, se realizará una microsimulación de tráfico que represente la locación elegida de forma realista. Luego de construida la simulación se procederá a obtener los datos necesarios para el cálculo de emisiones vehiculares, que son, básicamente, velocidades y aceleraciones instantáneas. Con ellos se procederá a colocarlos en un software que permite el cálculo o estimación de tres componentes de las emisiones vehiculares. Dicho programa nos proporcionará los resultados necesarios para la comparación que se realizó utilizando otras metodologías dentro del ámbito de un ACV. Dicho proceso puede apreciarse en la Figura 4.

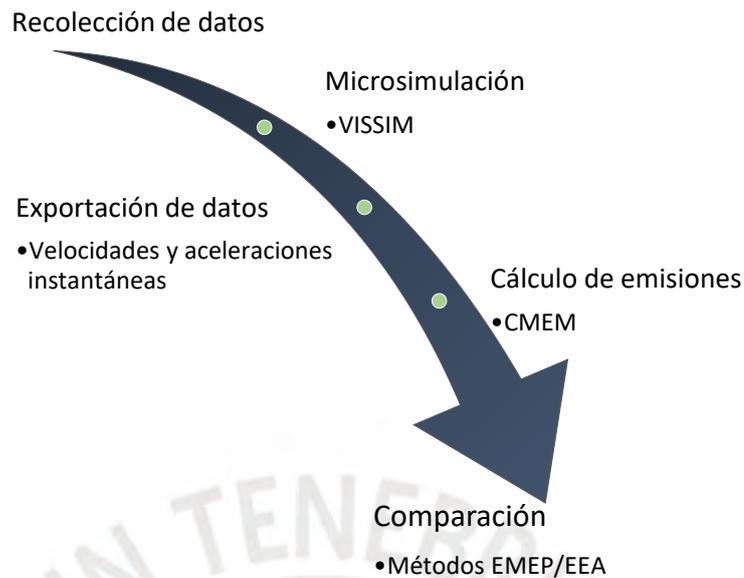


Figura 4: Esquema resumen del proceso a realizarse en la presente investigación

2.4.1. Microsimulación en VISSIM

VISSIM es un software de microsimulación de tráfico que sirve como herramienta para representar el comportamiento individual de los vehículos en una red a pequeña escala determinada (intersección o vías contiguas). Esta representación abarca los patrones de movimiento generados a partir de los datos ingresados de flujos vehiculares, fases de semáforos, tiempos de viaje, longitud de colas, comportamiento vehicular y datos del área de estudio. Asimismo, este modelado de tráfico es discreto y estocástico, lo que significa que cada vehículo es considerado como una entidad única. Esto implica que se deben considerar diversas corridas del programa para la obtención de resultados, pues la naturaleza del modelo es aleatoria (Dowling et al., 2004; Papageorgiou et al., 2009).

Se utilizó la versión número ocho del software VISSIM para realizar la creación de la microsimulación de tráfico. El procedimiento para la elaboración de dicha simulación comprende una serie de pasos, los cuales son brindados por la Federal Highway Administration (FHWA) del departamento de transporte de los Estados Unidos (Federal Highway Administration (FHWA), 2004). Dicha secuencia de operaciones se detalla a continuación: recolección de datos, trazado de la red en el software, calibración y validación del modelo. Cada uno de estos procedimientos se describe a detalle a continuación en este inciso.

2.4.1.1. Recolección de datos

Para empezar, se deben recolectar los datos de campo necesarios para la creación del modelo en la ubicación escogida. Estos datos, como ya se describió previamente, comprenden los flujos vehiculares por cada carril y sus respectivas direcciones de salida. Además, se deben medir los ciclos de los semáforos junto con las longitudes de cola de los vehículos detenidos; estos datos servirán para las etapas de calibración y validación. Asimismo, se debe contar con el tiempo de la fase del semáforo para poder colocarlo en el programa.

La cantidad de datos a recolectarse es tal, que no se podría realizar sin la ayuda de bastantes aforadores. Por tal motivo, se utilizará una grabación del lugar de estudio que dure aproximadamente una hora, de donde se extraerá la información ya descrita. Para tal fin, es necesario contar con un lugar elevado desde donde grabar utilizando una cámara filmadora o bien utilizar un dron para la filmación. Se debe contar con dos tomas de datos, una para la calibración y otra para la validación, las dos mediciones deberán pertenecer a diferentes días y horas.

En el caso de la presente tesis la grabación utilizada fue realizada por Felipe A. Jibaja Moarri para su trabajo de tesis de pregrado en el año 2018 (Jibaja, 2018). Dicha grabación se realizó con una cámara Go Pro Hero 3+ desde el onceavo piso del edificio ubicado en la esquina de la intersección de las avenidas Aramburú con Arequipa en el distrito de Miraflores – Lima ($12^{\circ}06'12.8''S$ $77^{\circ}01'53.7''W$). Se escogió esta grabación porque la zona estudiada presenta una geometría particular dentro del ámbito urbano y fue grabada desde un punto donde se podía apreciar en su totalidad. En ella se puede observar una reducción de carriles de 3 a 1 y la presencia de una cantidad de vehículos considerable en sus cuatro vías a causa de un semáforo.

La primera grabación se realizó el día 6 de marzo del 2018 a las 6:25pm, esta fue la grabación en hora pico. Esta, según la RAE, se define como “hora en la que se produce mayor aglomeración en los transportes o mayor demanda en el uso de determinados servicios” (RAE, 2005). La segunda grabación fue efectuada el día 28 de marzo del 2018 a las 2:25pm, la cual corresponde a la hora valle. Hora en la cual se registra una aglomeración mucho menor de vehículos en comparación con la hora pico (RAE, 2020). Estos dos escenarios son necesarios para poder realizar el proceso de calibración y validación del modelo (Federal Highway Administration (FHWA), 2004).

2.4.1.2. Trazado de la red

Con esas grabaciones se revisó el modelo de simulación en VISSIM y se corrigieron los detalles para acercarlo a la realidad. Para el trazado del área de estudio en el programa es necesario contar con algunos datos extra. Por ejemplo, es de gran importancia contar con el plano del lugar tanto en planta como en elevación. Esto con el fin de poder conseguir las dimensiones y características de los elementos que forman parte de la geometría de la zona sin la necesidad de medirlas manualmente en campo. Como, por ejemplo, la longitud de los carriles, la dirección y sentido de las vías, los elementos de control de tránsito (señales, líneas peatonales, etc), entre otros. Una vez que se posee el plano, se puede dibujar en el software, ayudándose de este, las vías y conexiones presentes en la red y escalándola con las medidas reales.

A continuación, para que la red pueda mostrar vehículos en los carriles dibujados, así como para que aparezcan visibles los semáforos se tienen que ingresar los datos recolectados al programa. Esto implica que se inserten los flujos vehiculares para cada carril dibujado y que se coloquen las fases del semáforo según correspondan. Además, para poder plasmar el comportamiento de los conductores en el programa, es necesario establecer los límites en las curvas de velocidad deseada y aceleración deseada. Estos valores máximos son colocados según valores característicos de cada región en la que se encuentra el modelo; es decir estos son unos valores preestablecidos ya insertados en la simulación (Jibaja, 2018).

2.4.1.3. Calibración del modelo

La calibración es un procedimiento iterativo mediante el cual se busca que la red creada logre representar la realidad mediante el ajuste de los parámetros que influyen en el comportamiento de los conductores (Siddharth & Ramadurai, 2013). Para realizar la calibración es necesario contar con por lo menos las longitudes de colas, tiempos de viaje o velocidades para puntos específicos. A pesar de tener esos tres parámetros de calibración, no es necesario realizar la calibración con los tres parámetros a la vez. Esto se debe a que al utilizar más de un parámetro se garantiza mayor exactitud, sin embargo el tiempo requerido para la calibración del modelo también aumenta (Dowling et al., 2004).

Una vez se tiene creado el modelo se puede comenzar con la calibración del mismo. Dependiendo del parámetro de comportamiento vehicular con el que se desea calibrar se establecerá en el programa puntos de medición. Esto significa que se debe especificar en el software el parámetro o los parámetros que se desea medir durante una corrida de la simulación. Para poder revisar si el modelo está calibrado (es decir, si representa la realidad)

se deberá realizar un número de corridas determinado estadísticamente, que sea considerado suficiente, y se deberán almacenar los resultados.

Para la verificación se utilizan distribuciones normales, t-student o pruebas no paramétricas con la finalidad de agrupar los resultados y poder compararlos estadísticamente con los datos recolectados. Estos análisis tienen como objetivo confirmar con el 95% de confianza que el modelo representa la realidad. Si no se logra corroborar que el sistema está calibrado se procede a cambiar los parámetros escogidos, los cuales afectan el comportamiento vehicular, y se vuelve a correr el programa. Este procedimiento se repite hasta que los datos medidos en campo sean parecidos a los brindados por el modelo y de esta forma se confirme la similitud entre el modelo y la realidad.

2.4.1.4. Validación del modelo

El proceso de validación es un análisis estadístico que consiste en corroborar si la calibración realizada se puede aplicar a cualquier situación en la que se encuentre la red. Es decir, se busca que el modelo creado funcione y represente la realidad bajo cualquier nivel de demanda u horario de circulación (Dowling et al., 2004). Para realizar la validación es necesario reemplazar los datos recolectados en campo usados en la calibración con nuevos datos pertenecientes a un día y hora diferentes. Con los nuevos datos y sin cambiar los parámetros de comportamiento vehicular definidos para la calibración se procede a correr el programa. Utilizando los resultados de múltiples corridas y la distribución normal, t-student o pruebas no paramétricas se procede a comparar de la misma forma que en la calibración si se representa la realidad con un 95% de confianza. En caso de que no se compruebe la similitud con la realidad se deberá realizar una nueva calibración y una posterior validación. En caso contrario se considerará el modelo validado y lo suficientemente representativo de la realidad.

2.4.1.5. Recolección de resultados y evaluación

Los resultados a extraer son aceleración y velocidades para cada vehículo cada segundo. Para ello se requiere especificar al programa el periodo de toma de datos. Este periodo comprende desde el segundo 600 al 4200 de simulación. Se elige este intervalo debido a que los primeros 600 segundos son parte del proceso conocido como *warm up* o “calentamiento” del modelo. Este proceso consiste en el acondicionamiento del modelo de simulación para que entre en un ciclo continuo de fluidez. Esto sirve para garantizar que los datos sean recolectados fehacientemente y no se estén considerando casos atípicos propios del inicio del modelo al estar vacío (Dowling et al., 2004).

Asimismo, se debe seleccionar el tipo de datos a recolectar, en este caso se deberá remarcar la toma de datos de velocidades y aceleraciones de carros particulares, buses o vehículos pesados dentro del intervalo de los segundos 600 a 4200 como ya se mencionó. Además, se debe especificar la frecuencia (en segundos) de la toma de datos, en este caso se quieren los datos para cada segundo (puede ser, además, cada 10 segundos o cada 0.1 segundos). Con esto establecido se puede escoger el número semilla y la cantidad de corridas que se le desea dar a la simulación. El número semilla es el valor que se le asigna a un conjunto de características de la simulación con tal de hacerlas únicas y fácilmente referenciables. La cantidad de corridas es el valor que nos sirve para poder determinar diferentes escenarios para cada corrida de simulación sucesiva (Dowling et al., 2004). En este caso se escogió el número de semilla 1 y una cantidad de 15 corridas.

2.4.2. Cálculo de emisiones utilizando el Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM)

El CMEM es un programa que fue desarrollado para reflejar con precisión las emisiones de vehículos ligeros producidas en función al modo de funcionamiento del vehículo (Scora & Barth, 2006). La Interfaz Gráfica del Usuario (GUI - *Graphical User Interface*) del CMEM es un ambiente amigable desarrollado en Java, con el fin de poder ser más accesible para quien lo utiliza. En este entorno se pueden apreciar 5 pestañas diferentes a través de las cuales se realizarán los cálculos de las emisiones vehiculares de los siguientes contaminantes: CO₂, CO, HC y NO_x.

La primera pestaña permite registrar los datos de entrada obtenidos en la microsimulación para alimentar el modelo. Estos datos iniciales pueden registrados en una o más columnas en la pestaña mencionada, donde cada columna es un tipo de dato diferente (Figura 5). Estos datos pueden ser cargados desde un modelo de VISSIM o desde un programa que nos proporcione información cada segundo. Los datos se pueden importar al programa y pueden ser solamente velocidades o velocidades y aceleraciones. Por defecto, el programa asume que los datos serán ingresados para cada segundo, lo cual también se puede modificar. Los datos a importar deben estar contenidos en un archivo .txt con el fin de poder ser colocados más fácilmente en el modelo.



Figura 5: Pestaña donde se deben insertar los datos de entrada del modelo

Una vez insertados esos datos, se deberán asignar las características a cada tipo de vehículo que se tenga en la red. Es decir, se deben colocar los datos del motor, el combustible, la tecnología del automóvil, entre otros datos propios para cada categoría de vehículo. Estas características varían según lo visto en la grabación y dependen también de la antigüedad del vehículo. Se tienen dos pestañas principales para la inserción de estas características, estas son la de LD Vehicle (Light Duty Vehicle), que se refiere a los vehículos ligeros. Y la que le sigue es la de HDD Vehicle (High Duty Diesel Vehicle), que se refiere a los vehículos pesados que funcionan con petróleo. En la primera pestaña se colocan los datos y características de vehículos de pasajeros y en general vehículos menores; mientras que en la siguiente se colocan los datos de vehículos pesados.

Una vez que los datos han sido insertados para cada categoría de automóvil presente en la red, se procede a armar la flota de vehículos, para ello se pasa a la pestaña de "fleet" o flota. En ella se puede elegir la proporción porcentual de cada categoría de vehículo dentro de la flota de vehículos analizados. Alternativamente se puede colocar el número exacto de vehículos de cada categoría registrada en las anteriores pestañas. Esta forma de ingresar la proporción de vehículos es más exacta que al introducir por porcentajes. Adicionalmente, en esa pestaña se realiza el cálculo de las emisiones para los cuatro contaminantes analizados (CO₂, CO, HC y NO_x). Este cálculo nos muestra también la cantidad de combustible consumido y la masa emitida por cada contaminante (Figura 6).

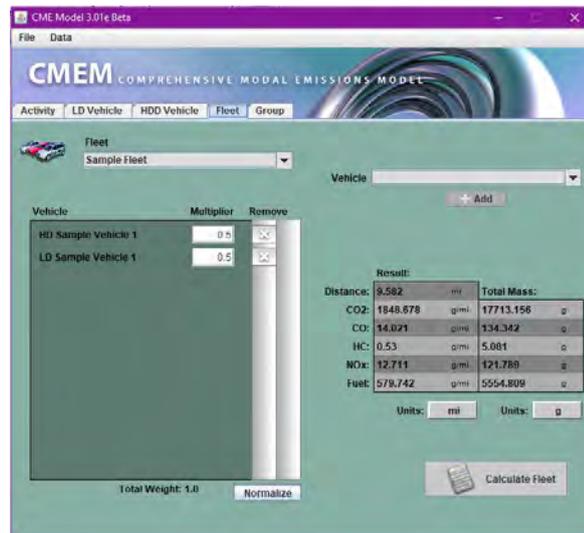


Figura 6: Pestaña donde se arma y analiza una la flota de vehículos específica

La última pestaña del programa funciona de forma similar a la anterior, sin embargo, sirve para analizar un conjunto de flotas a la vez. Esto significa que en esta pestaña se pueden añadir diferentes tipos de flotas y analizarlas en su conjunto. En esta pestaña se realiza el mismo cálculo de emisiones que en la pestaña anterior. En esta pestaña y en la anterior se pueden exportar los resultados obtenidos a un archivo .txt separado por tabulaciones. Los resultados se pueden extraer referidos a cada tipo de vehículo definido o para la flota como conjunto. Existen tres formas de extraer los resultados, las cuales son SbS (Second-by-Second) para cada tipo de vehículo, según el método VSP (Vehicle Specific Power) y resultados de flota. Y se pueden extraer los datos de más de una forma para poder realizar un mejor análisis.

2.5. Métodos planteados por la European Environmental Agency (EEA) para realizar el Análisis de Ciclo de Vida comparativo

En el año 2019, la EEA y el EMPE generaron una guía de inventario de emisiones aéreas contaminantes. En ella se proponen tres métodos para cuantificar las emisiones vehiculares de gases contaminantes. Estos métodos son conocidos como “nivel 1”, “nivel 2” y “nivel 3”; la precisión y complejidad de cada uno aumenta conforme el número de nivel. Las ecuaciones que se muestran en las páginas siguientes fueron extraídas de la guía de inventario de la EMEP/EEA (Ntziachristos et al., 2019). Los diversos métodos discutidos en este manuscrito de tesis harán referencia al estándar europeo de medición de emisiones llamado “Estándar Euro”. Estos estándares se introdujeron con la finalidad de marcar los límites aceptables de emisiones de ciertos contaminantes en la fabricación de autos nuevos. Estos van desde Euro 1 hasta Euro 6, siendo el primero el más antiguo y más permisible (The Automobile Association, 2017).

2.5.1. Método de nivel 1

En primer lugar, el nivel 1 permite hallar las emisiones para un contaminante utilizando una sumatoria. Dicha sumatoria contiene la multiplicación entre la cantidad de combustible consumido y el factor de emisión correspondiente al contaminante, tipo de vehículo y tipo de combustible. Ese cálculo puede realizarse con la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_j (\sum_m (FC_{j,m} \times EF_{i,j,m})) \quad (1)$$

Donde,

E_i = emisión del contaminante i [g],

$FC_{j,m}$ = consumo de combustible de la categoría j usando combustible m [kg],

$EF_{i,j,m}$ = factor de emisión específico de consumo de combustible del contaminante i para la categoría de vehículo j y combustible m [g/kg] (Ntziachristos et al., 2019).

Los factores que se utilizan en este nivel de cálculo son brindados por la misma EEA y corresponden a diversos tipos de combustible (gasolina, GLP o petróleo), contaminantes (CO, NO_x, PM, N₂O) y categorías de vehículo (Figura 7). Para utilizar estos factores de emisión se requieren estadísticas confiables del consumo de combustible y que estas estén divididas según el tipo de vehículo. Adicionalmente, este nivel no contempla el grado de tecnología del vehículo (Euro 1, Euro 2, Euro 3, entre otros) (Ntziachristos et al., 2019).

Passenger Cars (Vehículos de pasajeros)			
Light Duty Vehicles (Vehículos livianos)			
Heavy Duty Vehicles (Vehículos pesados)			
Mopeds (Ciclomotores)			



Figura 7: Categorías de vehículos

Fuente: Adaptado de Gkatzoflias, Koudiris, Mellios, & Ntziachristos (2009)

Algunos de los factores se muestran en las tablas a continuación:

Tabla 1: Factores de emisión para CO y compuestos orgánicos volátiles no metálicos (NMVOC)

Category	Fuel	CO			NMVOC		
		(g/kg fuel)			(g/kg fuel)		
		Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
PC	Petrol	84.7	49.0	269.5	10.05	5.55	34.42
	Diesel	3.33	2.05	8.19	0.70	0.41	1.88
	LPG	84.7	38.7	117.0	13.64	6.10	25.66
LCV	Petrol	152.3	68.7	238.3	14.59	3.91	26.08
	Diesel	7.40	6.37	11.71	1.54	1.29	1.96
HDV	Diesel	7.58	5.73	10.57	1.92	1.33	3.77
	CNG (Buses)	5.70	2.20	15.00	0.26	0.10	0.67
L-category	Petrol	497.7	331.2	664.5	131.4	30.0	364.8

Fuente: EMEP/EEA Guidebook (2019)

Tabla 2: Factores de emisión para NO_x y material particulado (PM)

Category	Fuel	NO _x			PM		
		(g/kg fuel)			(g/kg fuel)		
		Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
PC	Petrol	8.73	4.48	29.89	0.03	0.02	0.04
	Diesel	12.96	11.20	13.88	1.10	0.80	2.64
	LPG	15.20	4.18	34.30	0.00	0.00	0.00
LCV	Petrol	13.22	3.24	25.46	0.02	0.02	0.03
	Diesel	14.91	13.36	18.43	1.52	1.10	2.99
HDV	Diesel	33.37	28.34	38.29	0.94	0.61	1.57
	CNG (Buses)	13.00	5.50	3000	0.02	0.01	0.04
L-category	Petrol	6.64	1.99	10.73	2.20	0.55	6.02

Fuente: EMEP/EEA Guidebook (2019)

Tabla 3: Factores de emisión para N₂O y amoníaco (NH₃)

Category	Fuel	N ₂ O			NH ₃		
		(g/kg fuel)			(g/kg fuel)		
		Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
PC	Petrol	0.206	0.133	0.320	1.106	0.330	1.444
	Diesel	0.087	0.044	0.107	0.065	0.024	0.082
	LPG	0.089	0.024	0.202	0.080	0.022	0.108
LCV	Petrol	0.186	0.103	0.316	0.667	0.324	1.114
	Diesel	0.056	0.025	0.072	0.038	0.018	0.056
HDV	Diesel	0.051	0.030	0.089	0.013	0.010	0.018
	CNG (Buses)	n.a.	0.000	0.000	n.a.	0.000	0.000
L-category	Petrol	0.059	0.048	0.067	0.059	0.048	0.067

Fuente: EMEP/EEA Guidebook (2019)

2.5.2. Método de nivel 2

En segundo lugar, el nivel 2 agrega al cálculo anterior el grado de tecnología de cada vehículo para poder hallar las emisiones ocasionadas por un contaminante. Dicho cálculo es una sumatoria, tal como en el nivel 1, que incluye la multiplicación entre el factor de emisión por categoría de vehículo correspondiente al contaminante, la distancia recorrida de cierta categoría y tecnología de vehículo y el número de vehículos de esa categoría y tecnología. Dicho cálculo se muestra mejor en la siguiente ecuación:

$$E_{i,j} = \sum_k (N_{j,k} \times M_{j,k} \times EF_{i,j,k}) \quad (2)$$

Donde,

$E_{i,j}$ = emisión del contaminante i para la categoría de vehículo j [g],

$N_{j,k}$ = número de vehículos en la flota nacional de categoría j y tecnología k [veh],

$M_{j,k}$ = distancia promedio anual conducida por vehículo de categoría j y tecnología k [km],

$EF_{i,j,k}$ = factor de emisión por tecnología específica del contaminante i para la categoría de vehículo j y tecnología k [g/veh-km] (Ntziachristos et al., 2019).

Los factores que se utilizan en este nivel de cálculo son brindados por la misma EEA y corresponden a diversos contaminantes (CO, NO_x, PM, N₂O) y a tipos de vehículo (automóviles, vehículos pesados, motocicletas, entre otros) subdivididos según la tecnología del mismo (Euro 1, Euro 2, Euro 3, entre otros) (Ntziachristos et al., 2019). Estos factores de emisión se presentan para cada contaminante, tecnología y categoría de vehículo; algunos de ellos se pueden apreciar en el anexo 1.

2.5.3. Método de nivel 3

En tercer lugar, el nivel 3 es un cálculo más complejo que involucra los factores de emisión más específicos para cada tipo de carretera (rural, urbana o autopista), cada tecnología, kilometraje y situación del vehículo; esto puede simplificarse a una suma de dos tipos de situaciones diferentes de emisiones de un mismo gas. Estas situaciones se catalogan como emisiones calientes y frías de un contaminante y suceden bajo diferentes condiciones del motor del vehículo. Ambos tipos de emisiones contienen factores de emisión específicos para cada tipo de tecnología vehicular, tanto pre-Euro como post-Euro. Asimismo, los factores de emisión están relacionados al tipo de vehículo y tipo de combustible que representan (Ntziachristos et al., 2019).

2.6. Análisis comparativo de los resultados

Para poder realizar un análisis correcto de los vehículos en la red, a falta de datos exactos referidos a los tipos de vehículos existentes, se realiza una comparación entre los tipos de vehículos propuestos por el CMEM con los estándares de Euro. De esta forma se puede contrastar y evaluar según Euro utilizando las categorías de vehículos proporcionados por el CMEM por defecto. Estas categorías se pueden apreciar en la siguiente imagen y para acceder a ellas en el CMEM se debe hacer clic en la opción de *Data* y luego en *Load default values*.

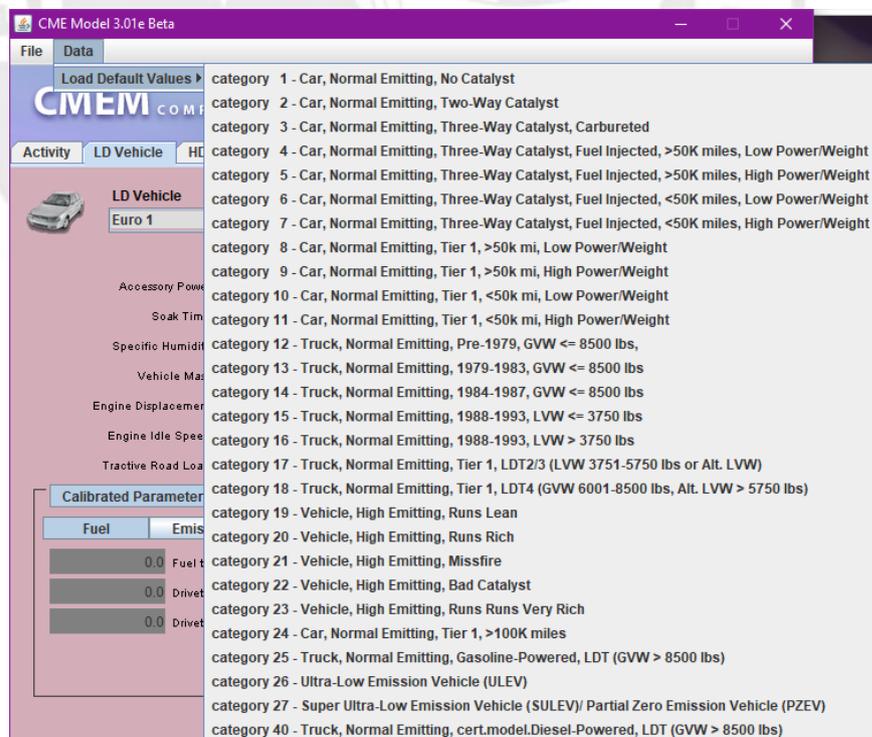


Figura 8: Categorías de vehículos livianos por defecto en el CMEM

Gracias a la literatura provista por Barth et. al. (1997), se pudo comparar gran parte de esas categorías con los estándares actuales de Euro. Para realizar esta comparación se observaron las emisiones que correspondían a las categorías disponibles y se las clasificó según el estándar europeo. El resumen de esta comparación se observa en la Tabla 44.

Tabla 4: Emisiones estimadas para las categorías usadas en el CMEM

Cars	CO (g/mil)	HC (g/mil)	NO _x (g/mil)
No catalyst	4.61	1	1.02
2-way catalyst	7.26	1.71	2.26
3-way catalyst, carburedated	6.87	0.54	0.76
3-way catalyst, FI, >50K miles, low power/weight	3.92	0.31	0.41
3-way catalyst, FI, >50K miles, high power/weight	4.37	0.5	1.7
3-way catalyst, FI, <50K miles, low power/weight	2.99	0.26	0.21
3-way catalyst, FI, <50K miles, high power/weight	1.85	0.18	0.3
Tier 1, >50K miles, low power/weight	1.41	0.26	0.29
Tier 1, >50K miles, high power/weight	2.09	0.23	0.49
Tier 1, <50K miles, low power/weight	1.76	0.23	0.1
Tier 1, <50K miles, high power/weight	0.97	0.18	0.2
Trucks	CO	HC	NO _x
Pre-1979 (<=8500 GVW)	82.12	5.35	1.94
1979 to 1983 (<=8500 GVW)	9.4	2.02	2.01
1984 to 1987 (<=8500 GVW)	8.22	0.52	0.91
1988 to 1993, <=3750 LVW	2.9	0.33	0.2
1988 to 1993, >3750 LVW	8.44	0.54	0.78
Tier 1 LDT2/3 (3751-5750 LVW or Alt. LVW)	2.12	0.25	0.31
Tier 1 LDT4 (6001-8500 GVW, >5750 Alt. LVW)	4.55	0.24	0.36

Fuente: Adaptado de Barth et. al. (1997)

Estas emisiones se evalúan con los estándares de Euro (Tabla 5) para poder determinar las equivalencias aproximadas de cada categoría al estándar deseado. Luego de ese proceso, se obtiene el aproximado de qué estándar cumple cada categoría, esos datos se muestran a continuación:

Tabla 5: Límites de emisión según los estándares de Euro

Euro	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	CO (g/mil)	HC (g/mil)	NO _x (g/mil)
Euro 1	2.72	0.97	0.97	4.38	1.56	1.56
Euro 2	1.00	0.70	0.70	1.61	1.13	1.13
Euro 3	0.66	0.56	0.50	1.06	0.90	0.80
Euro 4	0.50	0.30	0.25	0.80	0.48	0.40
Euro 5	0.50	0.23	0.18	0.80	0.37	0.29

Fuente: Adaptado de la página web del Royal Automovil Club (RAC)

Tabla 6: Equivalencias en Euro para categorías usadas en el CMEM para vehículos ligeros

Cars (Autos)	Euro equivalente
No catalyst	Pre-Euro (a)
2-way catalyst	Pre-Euro (b)
3-way catalyst, carburated	Pre-Euro (c)
3-way catalyst, FI, >50K miles, low power/weight	Euro 1 (a)
3-way catalyst, FI, >50K miles, high power/weight	Pre-Euro (d)
3-way catalyst, FI, <50K miles, low power/weight	Euro 1 (b)
3-way catalyst, FI, <50K miles, high power/weight	Euro 1 (c)
Tier 1, >50K miles, low power/weight	Euro 2
Tier 1, >50K miles, high power/weight	Euro 1 (d)
Tier 1, <50K miles, low power/weight	Euro 1 (e)
Tier 1, <50K miles, high power/weight	Euro 3
Trucks (Camiones)	
Pre-1979 (<=8500 GVW)	Pre-Euro (e)
1979 to 1983 (<=8500 GVW)	Pre-Euro (f)
1984 to 1987 (<=8500 GVW)	Pre-Euro (g)
1988 to 1993, <=3750 LVW	Euro 1 (f)
1988 to 1993, >3750 LVW	Pre-Euro (h)
Tier 1 LDT2/3 (3751-5750 LVW or Alt. LVW)	Euro 1 (g)
Tier 1 LDT4 (6001-8500 GVW, >5750 Alt. LVW)	Pre-Euro (i)

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se contrastarán los resultados de emisiones hallados mediante el modelo CMEM, utilizando las velocidades y aceleraciones instantáneas brindadas por el modelo de VISSIM, con los valores obtenidos en las dos primeras estimaciones propuestas por la EMEP/EEA. Las estimaciones mencionadas son el producto de los cálculos realizados siguiendo los lineamientos propuestos por el Guidebook de EMEP/EEA el 2019. Se eligen estas dos metodologías para la comparación debido a que son las más usadas a nivel local y en la metodología ACV. Los puntos a comparar serán los factores de emisión obtenidos con el CMEM con respecto a los brindados en la guía. Estos resultados nos ayudarán a ver las omisiones o diferencias al usar uno u otro método. Con estos resultados se podrá dar una recomendación sobre cuál debería ser la metodología más usada y cuál de ellas es más factible para ser aplicada en el entorno local. Asimismo, esto será evaluado dentro del entorno proporcionado por el método del ACV.

Luego de extraer los datos en una hoja de cálculo de Microsoft Excel se realizaron los cálculos que corresponden a cada metodología evaluada y cada vehículo de pasajeros en la red. Se asumió las estadísticas para la tecnología de vehículos según los datos obtenidos por Verán-Leigh et. al. (2019). Estos datos estadísticos se muestran en la Tabla 7 y nos indican la distribución de la flota vehicular según su tecnología y tipo de vehículo para el año 2015.

Mediante estas distribuciones se realizaron los cálculos correspondientes para cada tipo de metodología.

Tabla 7: Distribución de la flota nacional según su tecnología

Estándar de emisión	Tipo de vehículo		
	Vehículos de pasajeros	Buses	Vehículos pesados
Pre-Euro standard	30.71	32.75	27.39
Euro 1	6.73	5.72	6.23
Euro 2	31.13	30.11	34.95
Euro 3	31.43	31.43	31.43

Fuente: Adaptado de Verán et. al. (2019)

2.7. Vehículos de pasajeros

Se calcularon las emisiones provenientes de los vehículos de pasajeros, pues esta categoría es la más representativa en nuestra ciudad. Se realizaron las tres metodologías con los datos obtenidos del modelo de microsimulación extraídos exclusivamente para carros. De estos datos se tomó un porcentaje para poder representar exclusivamente vehículos de pasajeros, pues el modelo de VISSIM no distingue entre automóviles de pasajeros y otros vehículos ligeros. Este porcentaje representativo se extrajo en base a las estadísticas obtenidas de la Asociación Automotriz del Perú en el período enero-setiembre del 2019. Esto nos indica que aproximadamente el 37.33% de los vehículos de esta categoría son vehículos de pasajeros y el porcentaje restante son otros vehículos ligeros (SUVs, furgonetas, todoterrenos, pick ups y/o camionetas).

Tabla 8: Estadística de venta de vehículos livianos en el mercado automotor peruano

	Ene-19	Feb-19	Mar-19	Abr-19	May-19	Jun-19	Jul-19	Ago-19	Set-19	Acum Ene-Set 19	Acum Ene-Set 18	% Var Acum
Automóviles, sw	5,683	4,857	4,413	4,335	4,609	3,842	4,434	4,730	5,145	42,048	47,502	-11.5%
Camionetas	2,031	2,051	1,976	1,876	2,013	1,705	1,746	1,751	1,936	17,085	17,106	-0.1%
Pick up, furgonetas	1,805	1,713	1,790	1,906	2,228	1,764	1,750	1,869	2,018	16,843	14,614	15.3%
SUV, todoterrenos	4,595	4,071	3,720	3,958	4,456	3,578	3,902	4,028	4,346	36,654	35,738	2.6%
V. Livianos	14,114	12,692	11,899	12,075	13,306	10,889	11,832	12,378	13,445	112,630	114,960	-2.0%

Fuente: Adaptado de Asociación Automotriz del Perú

3. Resultados y comparación

3.1.1. Resultados y análisis para Pre-Euro

Para el caso de los vehículos de pasajeros pertenecientes al grupo de tecnología Pre-Euro se consideran los resultados obtenidos por el CMEM (Tabla 5) y los factores proporcionados por la guía del EMEP/EEA. El consolidado de factores traducido a unidades equivalentes se halló de la siguiente forma:

Para el caso de los g por km recorrido se utilizaron los km totales (188.55 km). Al dividir la masa total de cada contaminante entre dicho valor se obtienen las tasas de g/km recorrido. A continuación, para el caso de los g por kg de combustible consumido se extrajo un factor para normalizar todo a 1 kg de combustible. Dicho factor es 4.802 y fue hallado dividiendo 1000 g entre la tasa de g/km de combustible que nos proporciona el CMEM (en este caso 208.25 g/km).

Tabla 9: Factores de emisión Pre-Euro calculados por el CMEM en g/km y g/kg

Contaminante	Masa total (kg)	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	93.3	495	2375
CO	17.7	93.8	451
NO _x	0.424	2.25	10.8

Asimismo, se convirtieron los factores de emisión proporcionados por la guía del EMEP/EEA a valores comparables en unidades de g/km recorrido y g/kg de combustible consumido. El proceso seguido para ambos métodos (nivel 1 y nivel 2) es similar al anterior. La diferencia radica en que los factores de emisión de nivel 1 son brindados en g/kg de combustible consumido; mientras que los factores de emisión del nivel 2 se encuentran en g/km recorrido. Para el nivel 1 se utilizó el factor de 4.802 ya previamente calculado. Por otro lado, para el nivel 2 se calculó el factor de 12.987 de forma similar a la anterior, en este caso se divide 1000 g entre la tasa de g/km de combustible que nos proporciona dicho nivel. Los datos calculados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 10: Factores de emisión Pre-Euro proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	660	3169
CO	17.6	84.7
NO _x	1.82	8.73

Tabla 11: Factores de emisión Pre-Euro proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	244	3169
CO	6.49	84.3
NO _x	2.53	32.9

Para corroborar la coherencia de los factores encontrados se realizó un breve análisis estequiométrico relacionado al carbono entre los diferentes métodos. Para ello, se utilizan los dos elementos contaminantes que contienen carbono (CO₂ y CO). Se calcula la cantidad del contaminante y se multiplica este peso por el peso atómico del carbono (12 g). Estos valores calculados para cada contaminante y según los factores de cada método se suman y se comparan entre sí. Obteniendo de esta comparación márgenes de error de 6.63% y 6.61% entre nivel 1 – CMEM y nivel 2 – CMEM, respectivamente. Con los datos validados de esta forma, se realizaron gráficos para cada contaminante comparando los factores encontrados.

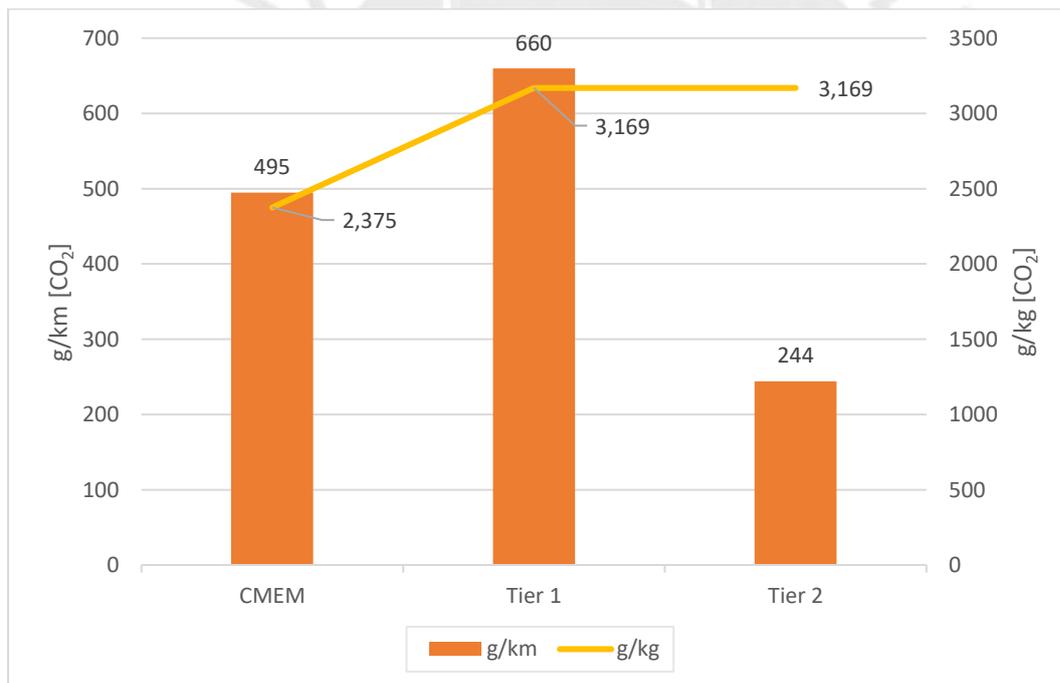


Figura 9: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO₂ de vehículos Pre-Euro

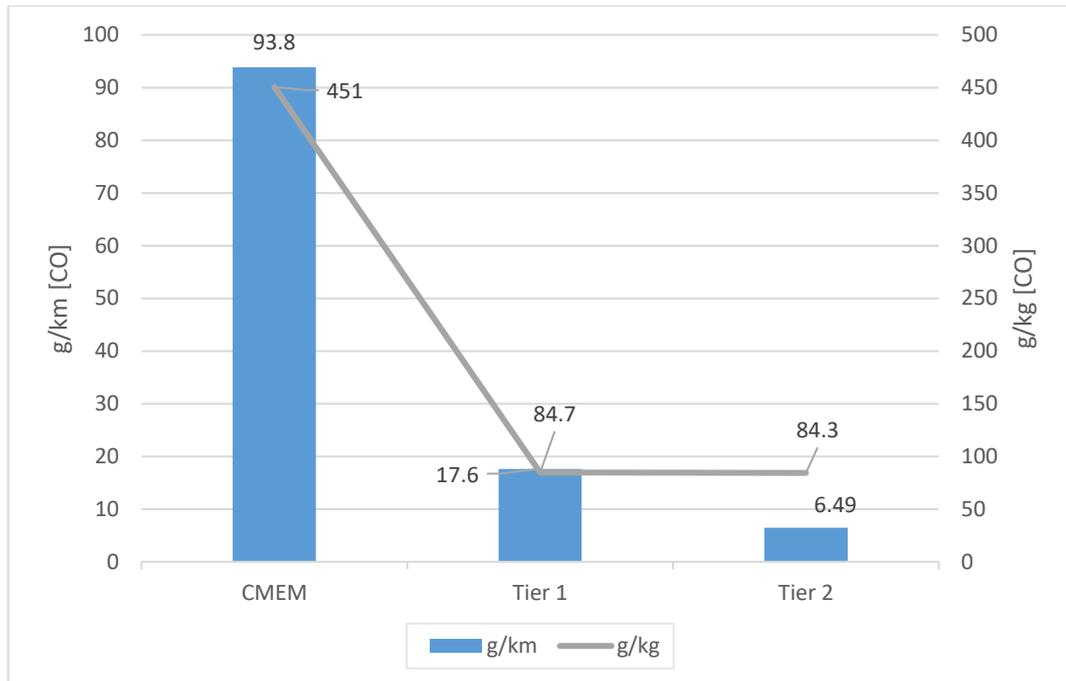


Figura 10: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Pre-Euro

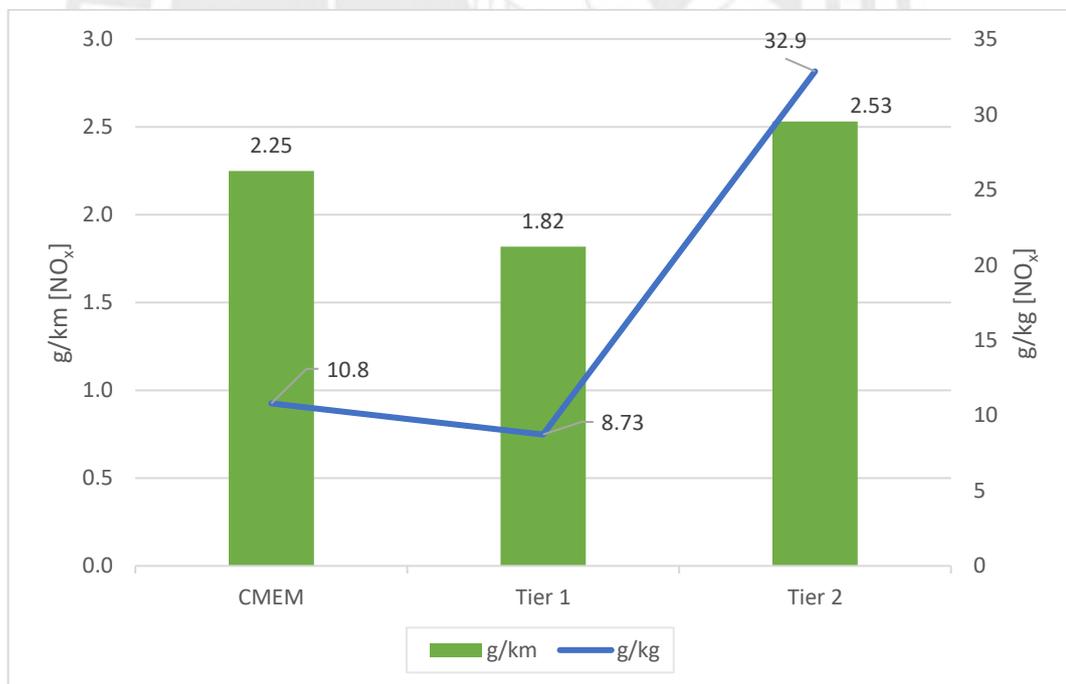


Figura 11: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NO_x de vehículos Pre-Euro

3.1.2. Resultados y análisis para Euro 1

Con los vehículos de pasajeros de tecnología Euro 1 se utilizaron los resultados correspondientes hallados por el CMEM (Tabla 12) y los factores proporcionados por la guía del EMEP/EEA. El consolidado de factores traducido a unidades equivalentes se halló de la siguiente forma:

Para el caso de los g por km recorrido se utilizaron los km totales (66.78 km). Al dividir la masa total de cada contaminante entre dicho valor se obtienen las tasas de g/km recorrido. Seguidamente, para el caso de los g por kg de combustible consumido se extrajo un factor para normalizar todo a 1 kg de combustible. Dicho factor es 7.66 y fue hallado dividiendo 1000 g entre la tasa de g/km de combustible que nos proporciona el CMEM (en este caso 130.55 g/km).

Tabla 12: Factores de emisión Euro 1 calculados por el CMEM en g/km y g/kg

Contaminante	Masa total (kg)	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	22.5	336	2575
CO	3.24	48.5	372
NO _x	0.047	0.704	3.38

Posteriormente, al convertir los factores de emisión proporcionados por la guía del EMEP/EEA a valores comparables en unidades de g/km recorrido y g/kg de combustible consumido se utilizó el mismo procedimiento que para el caso de los vehículos Pre-Euro. Para el nivel 1 se utilizó el factor de 7.66, calculado previamente. Mientras que para el nivel 2 se calculó el factor de 15.152 de la misma forma que en el caso de los vehículos Pre-Euro, utilizando el factor proporcionado por dicho nivel. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 13: Factores de emisión Euro 1 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	414	3169
CO	11.1	84.7
NO _x	1.14	8.73

Tabla 14: Factores de emisión Euro 1 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	209	3169
CO	3.92	59.4
NO _x	0.485	7.35

Para corroborar la coherencia de los factores encontrados se volvió a realizar un breve análisis estequiométrico con el carbono de los diferentes métodos. El procedimiento es el mismo que el ya mencionado en el caso de los vehículos Pre-Euro, aplicado a diferentes cantidades de carbono. De ese análisis se obtuvieron márgenes de error de 4.33% y 3.16% entre nivel 1 – CMEM y nivel 2 – CMEM, respectivamente. Con estos datos validados se realizaron gráficos para cada contaminante comparando los factores encontrados.

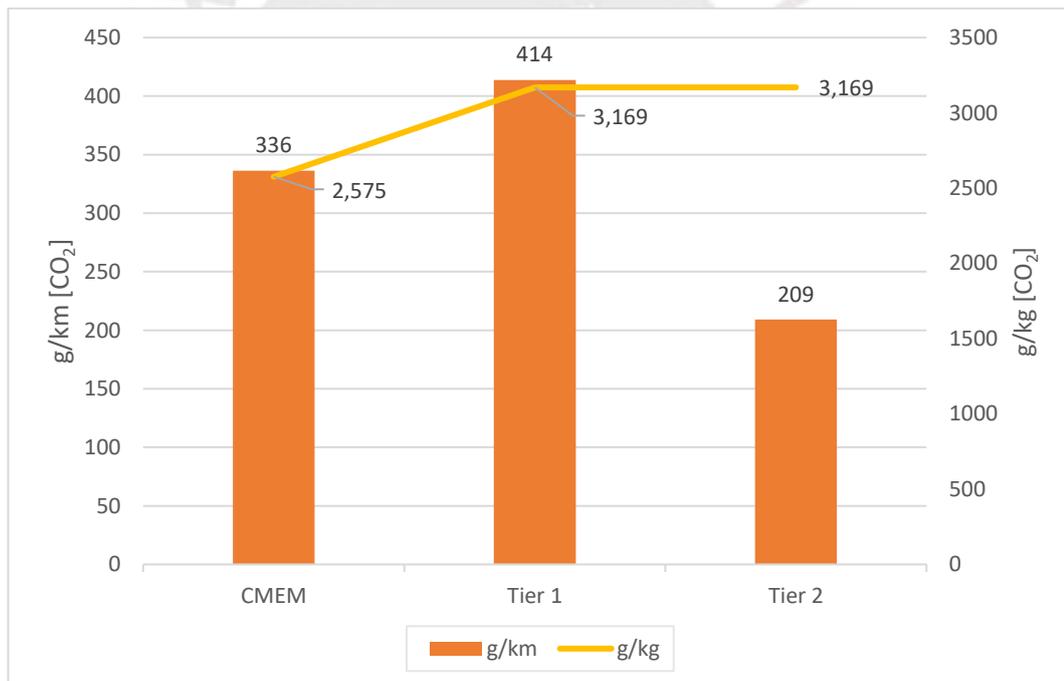


Figura 12: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO₂ de vehículos Euro 1

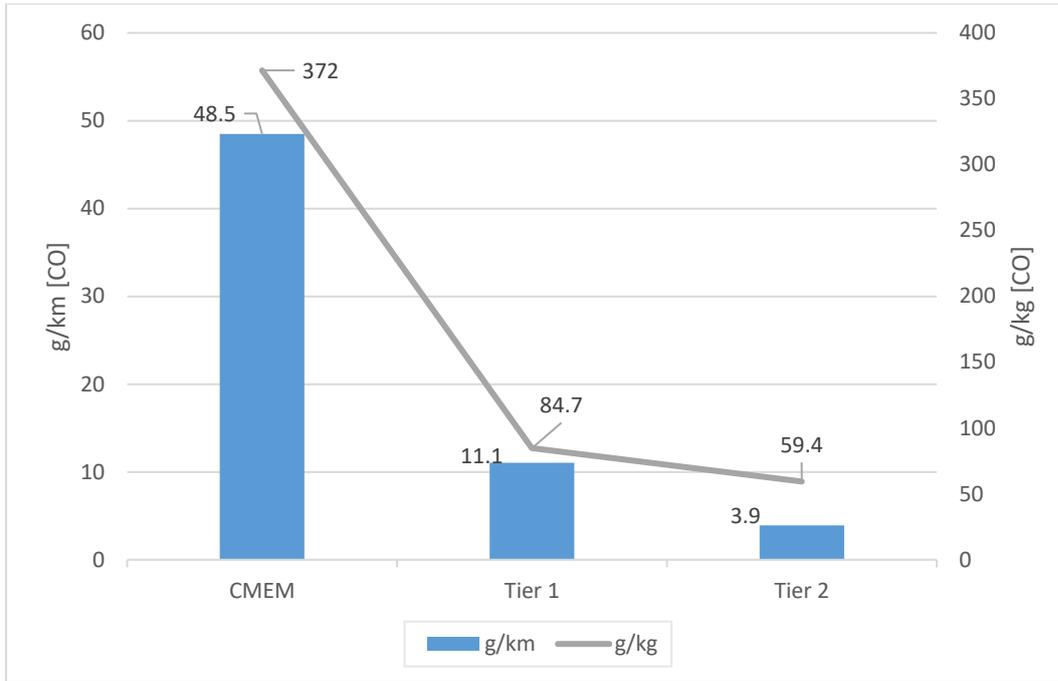


Figura 13: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Euro 1

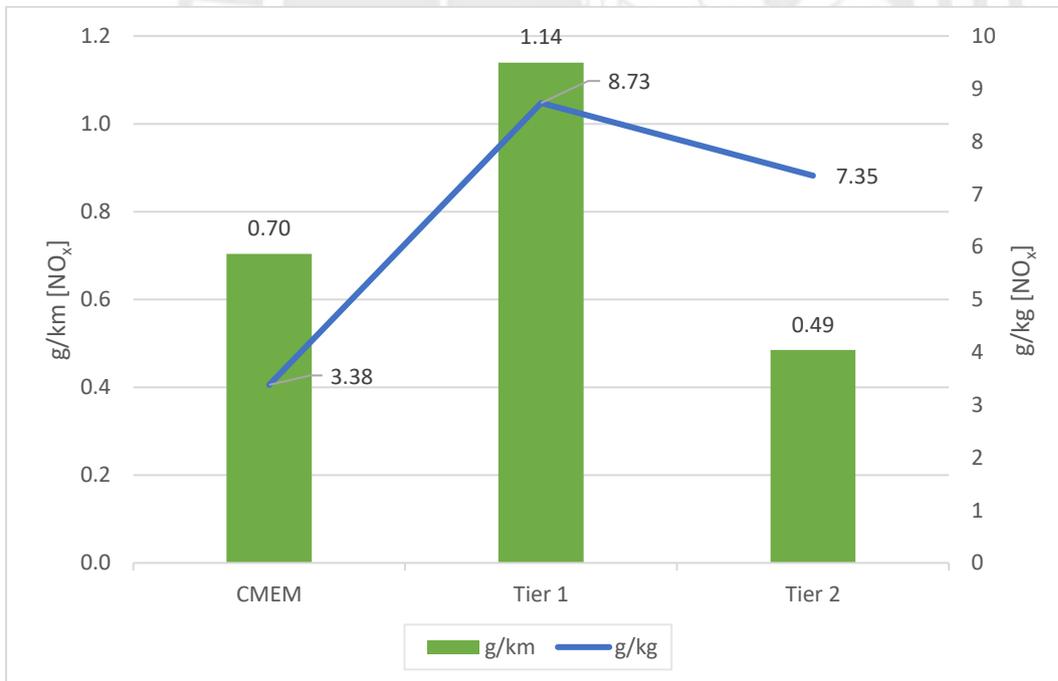


Figura 14: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NO_x de vehículos Euro 1

3.1.3. Resultados y análisis para Euro 2

El procedimiento se repitió de igual manera para los vehículos de tecnología Euro 2. Los resultados y factores utilizados provinieron del CMEM (Tabla 15) y de la guía del EMEP/EEA. El consolidado de factores traducido a unidades equivalentes se halló de la siguiente forma:

Para el caso de los g por km recorrido se utilizaron los km totales (237.1 km). Al dividir la masa total de cada contaminante entre dicho valor se obtienen las tasas de g/km recorrido observadas en la tabla. Luego de ello, para el caso de los g por kg de combustible consumido se extrajo un factor para normalizar los valores a 1 kg de combustible. Dicho factor es 6.642 y fue obtenido al dividir 1000 g entre la tasa de g/km de combustible que nos proporciona el CMEM (para este caso 150.57 g/km).

Tabla 15: Factores de emisión Euro 2 calculados por el CMEM en g/km y g/kg

Contaminante	Masa total (kg)	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	92.7	391	2596
CO	12.8	54.1	360
NO _x	0.132	0.557	3.70

A continuación, para convertir los factores de emisión proporcionados por la guía del EMEP/EEA a valores comparables en unidades de g/km recorrido y g/kg de combustible consumido se utilizó el mismo procedimiento que para el caso de los vehículos Euro 1. Para el nivel 1 se utilizó el factor, calculado con anterioridad, de 6.642. Además, para el nivel 2 se calculó, siguiendo el procedimiento ya descrito en los otros tipos de vehículo, el factor de 15.152. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 16: Factores de emisión Euro 2 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	477	3169
CO	12.8	84.7
NO _x	1.31	8.73

Tabla 17: Factores de emisión Euro 2 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	209	3169
CO	2.04	30.9
NO _x	0.255	3.86

Con la finalidad de corroborar la coherencia de los factores obtenidos se realizó una vez más un breve análisis estequiométrico entre los diferentes métodos utilizando el carbono. Este proceso involucró los valores de los factores de emisión de cada método para el caso de vehículos Euro 2. Obteniendo de ellos márgenes de error de 4.26% y 1.75% entre nivel 1 – CMEM y nivel 2 – CMEM, respectivamente. Con estos resultados validados se realizaron gráficos para cada contaminante comparando los factores encontrados.

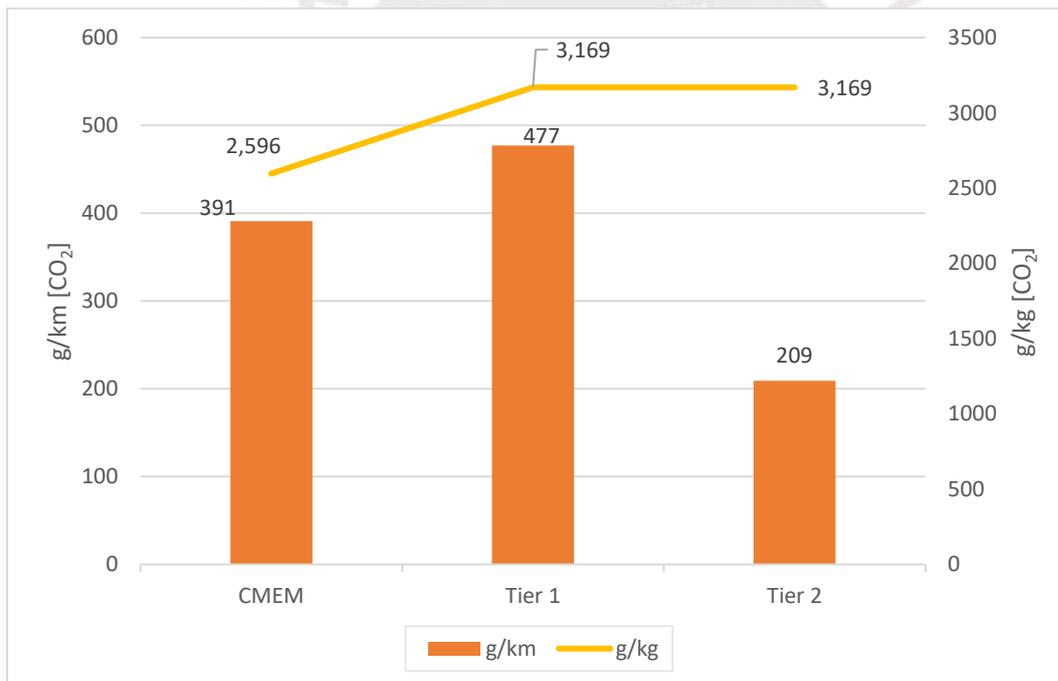


Figura 15: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO₂ de vehículos Euro 2

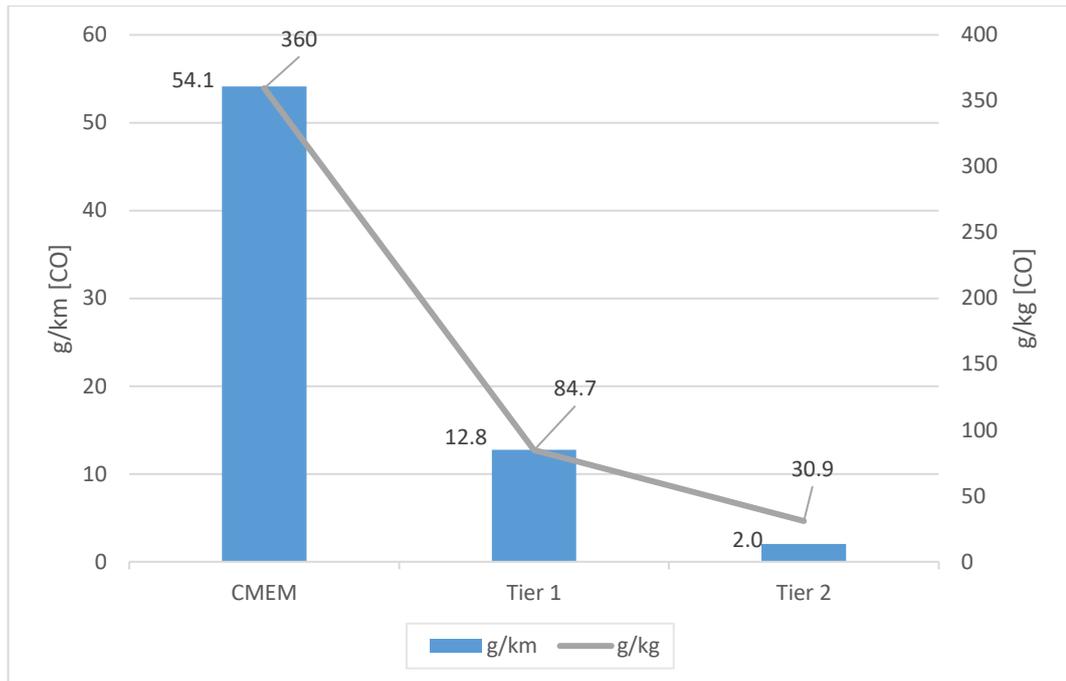


Figura 16: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Euro 2

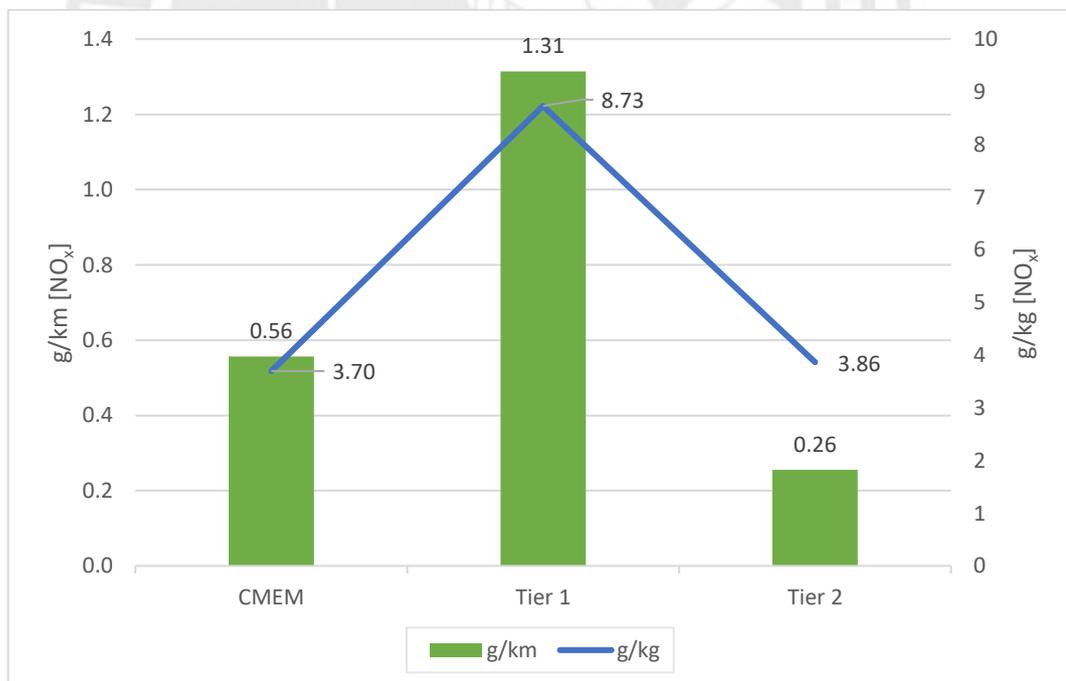


Figura 17: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NOx de vehículos Euro 2

3.1.4. Resultados y análisis para Euro 3

Los pasos a seguir en el caso de los vehículos de tecnología Euro 3 fueron los mismos que para de tecnología Euro 2. Asimismo, los resultados y factores utilizados provinieron del CMEM (Tabla 18) y de la guía europea. El consolidado de factores traducido a unidades equivalentes se halló de la siguiente forma:

Para el caso de los g por km recorrido se utilizaron los km recorridos totales (231.78 km). Al dividir la masa total de cada contaminante entre dicho valor se obtienen las tasas de g/km recorrido observadas en la tabla. A continuación, en el caso de los g por kg de combustible consumido se extrajo un factor para normalizar los valores a 1 kg de combustible. Este factor es 5.711 y fue obtenido al dividir 1000 g entre la tasa de g/km de combustible que nos proporciona el CMEM (para este caso 175.12 g/km).

Tabla 18: Factores de emisión Euro 3 calculados por el CMEM en g/km y g/kg

Contaminante	Masa total (kg)	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	104	441	2516
CO	15.2	64	366
NO _x	0.117	0.493	2.82

Seguidamente, para convertir los factores de emisión proporcionados por la guía del EMEP/EEA a valores comparables en unidades de g/km recorrido y g/kg de combustible consumido se utilizó el mismo procedimiento ya realizado en el caso de los vehículos Pre-Euro, Euro 1 y Euro 2. Para el nivel 1 se utilizó el factor ya calculado de 5.711 y, por otro lado, para el nivel 2 se calculó el factor de 15.152, del mismo modo que para los casos de los vehículos anteriores. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 19: Factores de emisión Euro 3 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 1

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	555	3169
CO	14.8	84.7
NO _x	1.53	8.73

Tabla 20: Factores de emisión Euro 3 proporcionados por la guía de EMEP/EEA para el nivel 2

Contaminante	g por km recorrido	g por kg combustible consumido
CO ₂	209	3169
CO	1.82	27.6
NO _x	0.097	1.47

Con la intención de comprobar que los valores de los factores obtenidos sean coherentes se realizó una vez más un pequeño análisis estequiométrico entre el carbono presente en los diferentes métodos. Obteniendo de ellos márgenes de error de 6.41% y 3.79% entre nivel 1 – CMEM y nivel 2 – CMEM respectivamente. Con estos resultados validados se realizaron gráficos para cada contaminante comparando los factores encontrados.

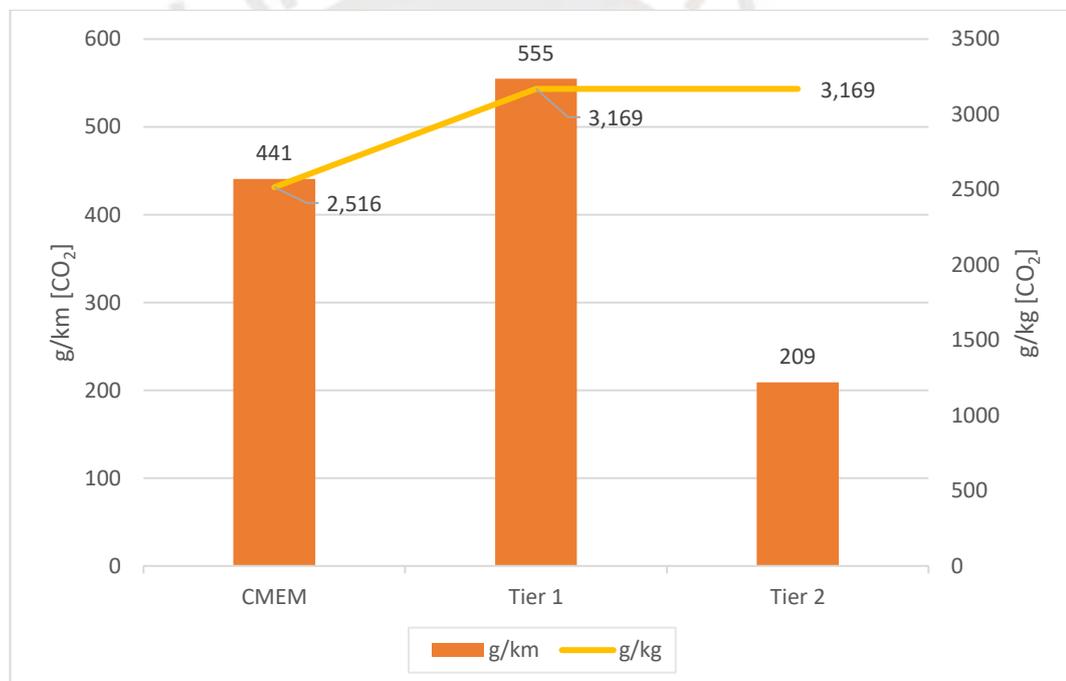


Figura 18: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO₂ de vehículos Euro 3

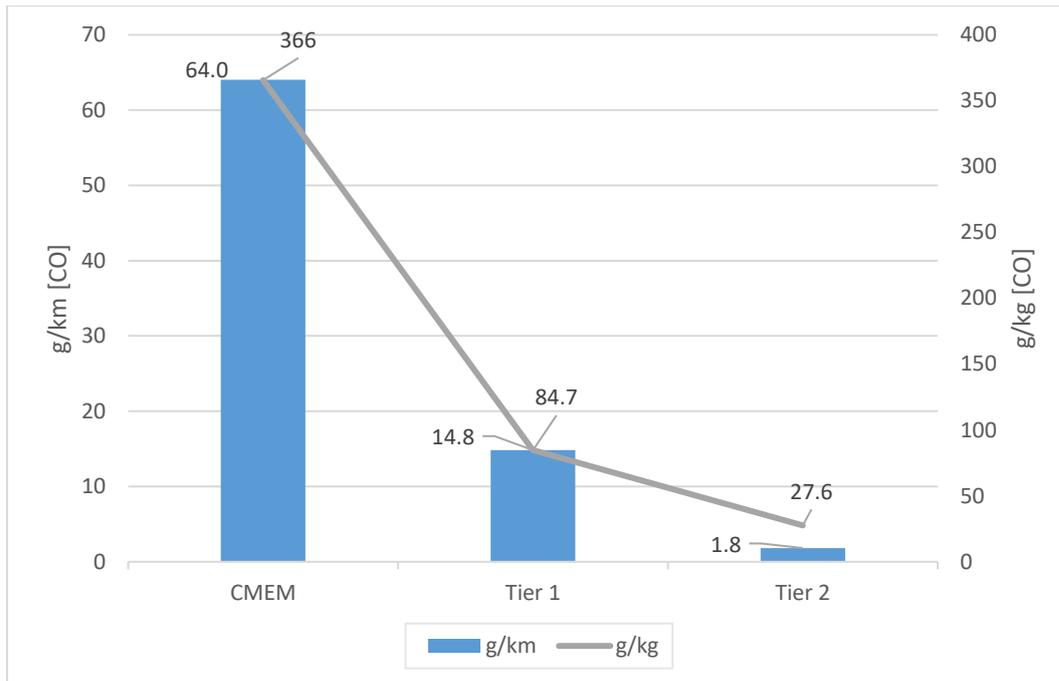


Figura 19: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de CO de vehículos Euro 3

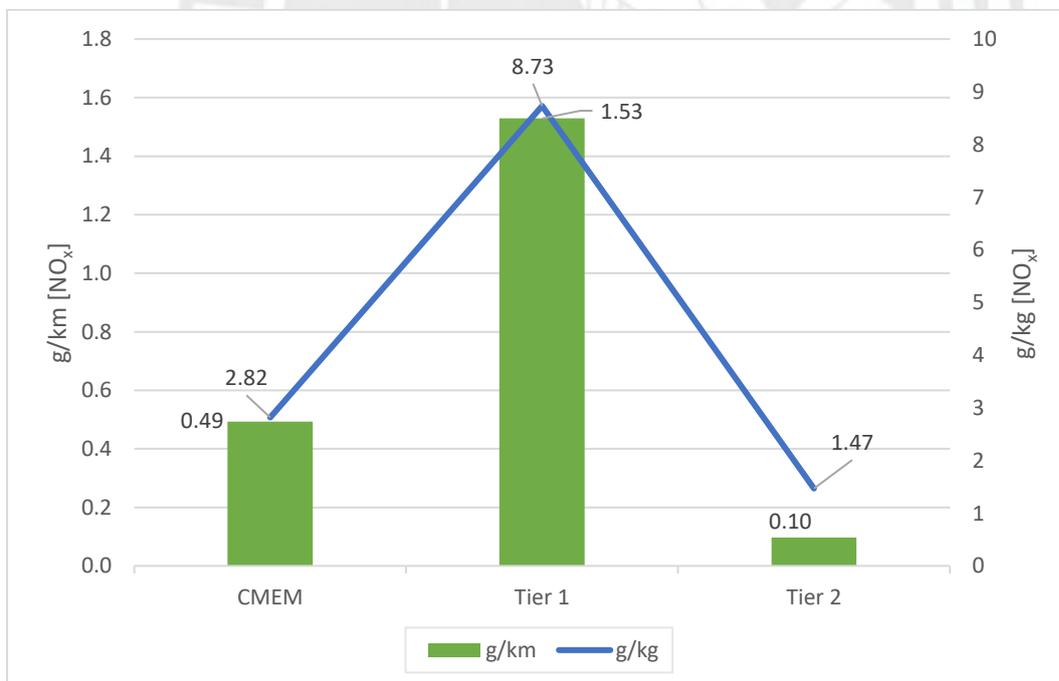


Figura 20: Comparación entre los diferentes factores de emisión de cada metodología para emisiones de NO_x de vehículos Euro 3

4. Conclusiones

En primer lugar, se logró formular adecuadamente la metodología que se esperaba en los objetivos. El procedimiento de crear un modelo de microsimulación de tráfico para obtener datos de aceleración y velocidad para instantes muy pequeños de tiempo funcionó tal como se esperaba. Además, se pudieron extraer estos valores para poder alimentar al CMEM y así poder calcular las emisiones vehiculares de forma bastante detallada. Ciertamente se tienen diversas asunciones y limitaciones; sin embargo, los resultados encontrados son altamente confiables. Las variables asumidas involucran el uso de la interfaz del CMEM que se rige bajo estándares norteamericanos del año 2004 o anteriores. Asimismo, un segundo grupo de asunciones se ubica en las corridas de los datos, pues se escogió un set de datos al azar para las muestras de cada tipo y tecnología de vehículo. A pesar de ello, las comprobaciones realizadas mediante los análisis estequiométricos nos demuestran que dichos datos asumidos no afectan significativamente en los resultados finales.

Siguiendo la línea de los objetivos específicos, se encontraron las deficiencias y limitaciones que se presentan en los primeros dos métodos planteados por el EMEP/EEA. Estas son, que sus resultados no pueden considerar el proceso de emisiones que ocurre cuando un vehículo acelera o desacelera. Esto no implica que consideren a las emisiones en esas etapas como inexistentes, sino que las consideran provenientes de otras fuentes de emisión. Lo cual se debe principalmente a que, al utilizar factores de emisión casi fijos, se “asume” un movimiento rectilíneo uniforme. Hecho que no se da en la vida real, sino que, al contrario, el movimiento de los vehículos por la ciudad se da en una suma constante de aceleraciones y desaceleraciones. Lo cual implica que finalmente las emisiones vehiculares varían en cantidad y tipo según la precisión del análisis que se utilice para cuantificarlas, especialmente si estas se ubican en un nivel urbano.

Asimismo, se pudo comprobar que, si bien el uso de la interfaz gráfica del CMEM es más amigable que su versión de código, su utilización requiere de un mayor tiempo en función a la cantidad de datos ingresados. Esto no va en desmedro de la calidad de resultados que puede proporcionar, ya que, a pesar de introducirse una cantidad alta de datos, el programa logra brindar los resultados al instante y con una adecuada precisión. Por otro lado, otros contratiempos que pueden alargar el tiempo de obtención de resultados podrían ser: el tiempo de aprendizaje y conocimiento del programa y la toma de datos de aceleraciones y velocidades. Esta última está más en función al modelo de microsimulación que al uso del CMEM en sí, sin embargo, repercute en el tiempo de modelado de emisiones. Este tiempo de ejecución, comparado con el lapso de tiempo que podría tomar el cálculo de emisiones mediante los métodos del EMEP/EEA, es sumamente similar y no debería requerir más del tiempo necesario

en insertar los datos y realizar la formulación en una hoja de cálculo. De esta forma se podrían emplear bien cualquiera de los 3, según la disponibilidad de los datos.

Al revisar el último objetivo específico, podemos comentar que se cumple nuestra hipótesis principal. Esto se puede afirmar debido a que los resultados que obtenemos nos indican que existe una diferencia en la precisión de las emisiones vehiculares según el método que se use para cuantificarlas. Asimismo, los resultados nos demuestran que al acelerar y desacelerar se dejan de emitir grandes cantidades de CO₂ y en su lugar se emiten esas mismas cantidades de CO. Esto se puede apreciar en los diferentes tipos y tecnologías de vehículos y en diferentes magnitudes. Este hecho requiere atención, pues en ambientes urbanos, la presencia de altas cantidades de este gas puede ocasionar problemas a la salud humana en personas con algún tipo de malestar respiratorio, personas mayores y niños (Charmaine, 2019).

Lo cual se debe, principalmente, a que, en sí, el CO es un gas venenoso que afecta la capacidad de llevar sangre a órganos importantes (USEPA, 2016). Además, se sabe de la relación que existe entre el CO y la formación de O₃ a nivel del suelo. Esto implica que la presencia de CO en el ambiente acelera el proceso de oxidación del óxido de nitrógeno (NO) a NO₂ y con ello la relación de formación de O₃ (Westberg, Cohen, & Wilson, 1971). Por consiguiente, se refuerza la idea de que dentro de un ACV el sector transporte terrestre es uno de los que peor se comporta en cuanto a los tres indicadores de “*endpoint*” (Fries & Hellweg, 2014). Por ello, se ve demostrada la necesidad de conocer adecuadamente las formas más exactas de medición de emisiones.

5. Recomendaciones

Como recomendación básica se sugiere que, al utilizar un software de modelado y cálculo de emisiones, es preferible que este sea uno moderno. En esta tesis se tuvo la complicación de que, si bien el CMEM es un software que aún funciona adecuadamente; este mismo, está desactualizado y por momentos llega a ser obsoleto, pues es del año 2004. Esto representó una dificultad para calcular las emisiones eficientemente y se tuvo que confiar en que los métodos utilizados en ese año siguen vigentes hasta hoy.

Derivado del problema de la antigüedad del programa, se tiene una asunción bastante fuerte en cuanto a los datos ingresados. Estos fueron ingresados como si fuese un solo vehículo el que realizaba todo el ciclo de aceleraciones y desaceleraciones, ciclo que pertenecía a cientos de vehículos extraídos de la red de simulación. Este contratiempo/asunción surgió debido a la cantidad de datos que nos brindaba el programa VISSIM y que no se podían colocar uno a uno dentro del CMEM por falta de tiempo y por resultar ineficiente.

Asimismo, con respecto a este programa de modelado, se sabe que es un modelo desarrollado por la Universidad de California en Estados Unidos. Por ello, este es un programa que trabaja con estándares norteamericanos propios de la región. En Perú y en esta tesis se utilizaron como líneas base guías de origen europeo. Es decir, se tenía que realizar la conversión y equivalencia entre los estándares europeos y los norteamericanos mediante varias asunciones, estas pueden afectar en la precisión de los datos encontrados. Por este motivo, siempre es recomendable realizar una comprobación simple y calcular el porcentaje de error.



6. Referencias

- Abo-Qudais, S., & Qdais, H. A. (2005). Performance evaluation of vehicles emissions prediction models. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7(4), 279–284. <https://doi.org/10.1007/s10098-005-0279-x>
- Abou-Senna, H., Radwan, E., Westerlund, K., & Cooper, C. D. (2013). Using a traffic simulation model (VISSIM) with an emissions model (MOVES) to predict emissions from vehicles on a limited-access highway. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 63(7), 819–831. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.795918>
- Aguilar, D., & Loo, F. (2017). *Análisis de eco-eficiencia de la demolición de una edificación en Lima. Tesis de grado*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. (2002). Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 182–190. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:2\(182\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182))
- Altose, L. (2000). *Health Effects from Automobile Emissions*. Washington: Washington State Department of Ecology. Recuperado el 2 de Octubre de 2018, de <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/publications/0002008.pdf>
- Alzuhairi, A., Aldhaheri, M., Sun, Z. bo, Oh, J. S., & Kwigizile, V. (2016). Vehicular emissions and concentrations in school zones: A case study. *Journal of Central South University*, 23(7), 1778–1785. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3231-9>
- Araujo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., & Silva, H. M. R. D. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *TRANSPORTATION RESEARCH PART D*, 32, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006>
- Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D. W., & Udo de Haes, H. A. (2000). Midpoints versus Endpoints : The Sacrifices and Benefits ProceO e. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 319–326.
- Bizcocho, N., & Llatas, C. (2019). Inclusion of prevention scenarios in LCA of construction waste management. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 468–484.
- Brook, R. D., Franklin, B., Cascio, W., Hong, Y., Howard, G., Lipsett, M., ... Tager, I. (2004). Air pollution and cardiovascular disease: A statement for healthcare professionals from the expert panel on population and prevention science of the American Heart Association. *Circulation*, 109(21), 2655–2671. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000128587.30041.C8>
- Butnariu, M., & Samfira, I. (2013). Consequences of Acid Rain. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 04(02), 2–4. <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000e119>
- Carmona, L. G., Rincón, M. A., Castillo, A. M., Galvis, B. R., Sáenz, H. E., Manrique, R. A., & Pachón, J. E. (2016). Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 59. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04>
- Castillo García, R. F. (2017). La planificación urbana de Lima-callao 1949-2013: del urbanismo funcionalista a la planificación del desarrollo urbano sostenible. *Paideia*, 3(4), 20–32. <https://doi.org/10.31381/paideia.v3i4.925>
- Chakraborty, J. (2009). Automobiles , Air Toxics , and Adverse Health Risks : Environmental Inequities in Tampa Bay , Florida. *Annals of the Association of American Geographers*, 99(912280237), 674–697. <https://doi.org/10.1080/00045600903066490>
- Charmaine, M. (22 de Noviembre de 2019). *Effect of Photochemical Smog*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2019, de sciencing.com: <https://sciencing.com/short-term-effects-air-pollution-5325756.html>

- CONCYTEC. (19 de Mayo de 2017). *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología e Innovación Tecnológica*. Obtenido de Primer Censo revela baja inversión en investigación y desarrollo en el Perú: <https://portal.concytec.gob.pe/index.php/noticias/1051-primer-censo-revela-baja-inversion-en-investigacion-y-desarrollo-en-el-peru>
- Das Sharma, P. (31 de Octubre de 2008). *Partha Das Sharma's Weblog on "Keeping World Environment Safer and Greener"*. Obtenido de Global Warming, greenhouse gases and their harmful effects – Urgent reduction of these are essential to save our environment: <https://saferenvironment.wordpress.com/2008/10/31/global-warming-greenhouse-gases-and-their-harmful-effects-%E2%80%93urgent-reduction-of-these-are-essential-to-save-our-environment/>
- Dawidowski, L., Sánchez-Ccoyllo, O., & Alarcón, N. (2014). Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana, 46. Retrieved from <http://www.senamhi.gob.pe>
- Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. U.S. Department of Transportation. (Vol. III).
- Federal Highway Administration (FHWA). (Julio de 2004). Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. Estados Unidos: Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Fries, N., & Hellweg, S. (2014). LCA of land-based freight transportation: Facilitating practical application and including accidents in LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 546–557. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0657-2>
- Gan, W. Q., Davies, H. W., Koehoorn, M., & Brauer, M. (2012). Association of long-term exposure to community noise and traffic-related air pollution with coronary heart disease mortality. *American Journal of Epidemiology*, 175(9), 898–906. <https://doi.org/10.1093/aje/kwr424>
- Gkatzoflias, D., Koudiris, C., Mellios, G., & Ntziachristos, L. (17 de Junio de 2009). COPERT 4. Copenhagen, Dinamarca. Obtenido de <https://slideplayer.com/slide/12187164/>
- Green, J. (13 de Marzo de 2018). *Sciencing*. Recuperado el 2 de Octubre de 2018, de Effects of Car Pollutants on the Environment: <https://sciencing.com/effects-car-pollutants-environment-23581.html>
- Guo, B., Chen, F., Deng, Y., Zhang, H., Qiao, X., Qiao, Z., ... Zhao, X. (2018). Using rush hour and daytime exposure indicators to estimate the short-term mortality effects of air pollution: A case study in the Sichuan Basin, China. *Environmental Pollution*, 242, 1291–1298. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.028>
- Hellweg, S., & Milà i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), 1109–1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>
- Ibarra-Espinosa, S., Ynoue, R., O'Sullivan, S., Pebesma, E., Andrade, M. d., & Osses, M. (2018). VEIN v0.2.2: an R package for bottom-up vehicular emissions inventories. *Geoscientific Model Development*, 2209-2229. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-11-2209-2018>
- Irin, S. (2015). *Development of Traffic Microsimulation and Emission*. Dalhousie University.
- Jazcilevich, A. D., García-Fragoso, A., Reynoso, A. G., Grutter, M., Diego-Ayala, U., Lents, J., & Davis, N. (2007). A vehicle emissions system using a car simulator and a geographical information system: Part 1 - System description and testing. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(10), 1234–1240. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.10.1234>
- Jibaja, F. (2018). *Micro simulación de la intersección de las avenidas arequipa y aramburú con el software VISSIM y con énfasis en la seguridad del ciclista*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Jullien, A., Dauvergne, M., & Proust, C. (2015). Road LCA : the dedicated ECORCE tool and database. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 655–670.

- <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0858-y>
- Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I., & Gallice, G. (2017). Life cycle assessment of the construction of an unpaved road in an undisturbed tropical rainforest area in the vicinity of Manu National Park, Peru. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(7), 1109–1124. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1221-7>
- Lima Air Quality Monitor - Embassy of the United States. (7 de Noviembre de 2018). *Contaminación del aire de US Embassy, Lima*. Obtenido de Índice de la Calidad del Aire (ICA) en tiempo real: <http://aqicn.org/city/peru/lima/us-embassy/es/>
- Lin, C., Gong, B., & Qu, X. (2015). Low emissions and delay optimization for an isolated signalized intersection based on vehicular trajectories. *PLoS ONE*, 10(12), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146018>
- Lin, J., Chiu, Y. C., Vallamsundar, S., & Bai, S. (2011). Integration of MOVES and dynamic traffic assignment models for fine-grained transportation and air quality analyses. *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, FISTS 2011*, 176–181. <https://doi.org/10.1109/FISTS.2011.5973657>
- Londoño, J., Correa, M., & Palacio, C. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)*, 16, 149–162.
- Mascia, M., Hu, S., Han, K., North, R., Van Poppel, M., Theunis, J., ... Litzberger, M. (2017). Impact of Traffic Management on Black Carbon Emissions: a Microsimulation Study. *Networks and Spatial Economics*, 17(1), 269–291. <https://doi.org/10.1007/s11067-016-9326-x>
- MINAM. (2015). *Contribución prevista y determinada a nivel nacional (INDC) de la república del Perú*. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/09/ESPA%C3%91OL.pdf>
- NASA. (07 de Enero de 2020). *Global Climate Change Vital Signs of the Planet*. Obtenido de The Causes of Climate Change: <https://climate.nasa.gov/causes/>
- Niaz, Y., Jiti, Z., & Zhang, Y. (2015). Influence of automotive emission on air pollution using gis in faisalabad, pakistan. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(1), 111–116. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150801.015>
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., Kouridis, C., Hassel, D., Mccrae, I., Hickman, J., ... Hausberger, S. (2012). *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated May 2012*.
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., Kouridis, C., Samaras, C., Hassel, D., Mellios, G., ... Hausberger, S. (2019). EMEP/EEA emission inventory guidebook 2019. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Nunez, C. (4 de Febrero de 2019). *National Geographic*. Obtenido de Air pollution, explained: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/pollution/>
- Nunez, C. (28 de Febrero de 2019). *National Geographic*. Obtenido de Acid rain, explained: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/acid-rain/>
- Oduro, S. D., Ha, Q. P., & Duc, H. (2016). Vehicular emissions prediction with CART-BMARS hybrid models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 188–202. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.012>
- Oduro, S., Metia, S., Duc, H., & Ha, Q. P. (2013). CO2 vehicular emission statistical analysis with instantaneous speed and acceleration as predictor variables. *2013 International Conference on Control, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2013*, 158–163. <https://doi.org/10.1109/ICCAIS.2013.6720547>
- Oduro, Seth, Metia, S., Duc, H., Hong, G., & Ha, Q. P. (2015). Multivariate adaptive regression splines models for vehicular emission prediction. *Visualization in Engineering*, 3(1).

<https://doi.org/10.1353/arc.2011.0028>

- Papageorgiou, G., Damianou, P., Pitsillides, A., Aphantis, T., Charalambous, D., & Ioannou, P. (2009). Modelling and simulation of transportation systems: a scenario planning approach. *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 50(1–2), 39–50. <https://doi.org/ISSN 0005—1144>
- Papson, A., Hartley, S., & Kuo, K.-L. (2012). Analysis of Emissions at Congested and Uncongested Intersections with Motor Vehicle Emission Simulation 2010. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2270, 124–131. <https://doi.org/10.3141/2270-15>
- Portmann, R. W., Daniel, J. S., & Ravishankara, A. R. (2012). Stratospheric ozone depletion due to nitrous oxide: Influences of other gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1593), 1256–1264. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0377>
- Quaassdorff, C., Kwak, K. H., Borge, R., & Lee, S. B. (2017). Traffic emission simulation and validation with measured data in South Korea. *HARMO 2017 - 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Proceedings, 2017-October(December)*, 65–69.
- RAE. (2005). *Diccionario panhispánico de dudas*. Obtenido de Real Academia Española: <http://lema.rae.es/dpd/srv/search?id=ehJiogBtkD6Hli7E9D>
- RAE. (2017). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de Real Academia Española: <http://dle.rae.es/?id=Gu89KMq>
- RAE. (2020). *Diccionario de la Lengua Española*. Obtenido de Real Academia Española: <https://dle.rae.es/hora#CpGwgWa>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... Foley, J. A. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Samaranayake, S., Glaser, S., Holstius, D., Monteil, J., Tracton, K., Seto, E., & Bayen, A. (2014). Real-Time Estimation of Pollution Emissions and Dispersion from Highway Traffic. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(7), 546–558. <https://doi.org/10.1111/mice.12078>
- Schmidt, G. (Octubre de 2010). *Taking the Measure of the Greenhouse Effect*. Obtenido de NASA Goddard Institute for Space Studies: https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/schmidt_05/
- Scora, G., & Barth, M. (2006). *CMEM User's Guide*. Riverside: University of California.
- Sharma, N., Gulia, S., Dhyani, R., & Singh, A. (2013). Performance evaluation of CALINE 4 dispersion model for an urban highway corridor in Delhi. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 72(8), 521–530.
- Siddharth, S. M. P., & Ramadurai, G. (2013). Calibration of VISSIM for Indian Heterogeneous Traffic Conditions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.131>
- Sider, T. M. N., Alam, A., Farrell, W., Hatzopoulou, M., & Eluru, N. (2014). Evaluating vehicular emissions with an integrated mesoscopic and microscopic traffic simulation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(10), 856–868. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0536>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Tang, G., Chao, N., Wang, Y., & Chen, J. (2014). Vehicular emissions in China in 2006 and 2010. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 14, 4905–4956. <https://doi.org/10.5194/acpd-14-4905-2014>
- Teh, S. H., Wiedmann, T., & Moore, S. (2018). Mixed - unit hybrid life cycle assessment applied to

- the recycling of construction materials. *Journal of Economic Structures*, 7(13), 25.
<https://doi.org/10.1186/s40008-018-0112-4>
- The Automobile Association. (11 de Diciembre de 2017). The Automobile Association. Recuperado el 27 de Octubre de 2020, de Limits to improve air quality and health:
<https://www.theaa.com/driving-advice/fuels-environment/euro-emissions-standards>
- Treloar, G. J., Love, P. E. D., & Crawford, R. H. (2004). Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use. *Journal of Construction Engineering and Management*, (February), 43–50.
- Underhill, L. J., Bose, S., Williams, D. L., Romero, K. M., Malpartida, G., Breysse, P. N., ... Hansel, N. N. (2015). Association of roadway proximity with indoor air pollution in a Peri-urban community in Lima, Peru. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(10), 13466–13481. <https://doi.org/10.3390/ijerph121013466>
- Union of Concerned Scientists. (19 de Julio de 2018). *Union of Concerned Scientists*. Recuperado el 3 de Octubre de 2018, de Cars, Trucks, Buses and Air Pollution: <https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/vehicles-air-pollution-and-human-health/cars-trucks-air-pollution#.W7THgGzblIU>
- USEPA. (27 de Setiembre de 2016). *EPA*. Recuperado el 22 de Octubre de 2018, de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification>
- USEPA. (8 de Setiembre de 2016). *EPA*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2019, de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#Effects>
- USEPA. (1 de Marzo de 2017). *EPA*. Recuperado el 22 de Octubre de 2018, de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>
- USEPA. (22 de Febrero de 2017). *EPA*. Obtenido de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/climate-indicators/greenhouse-gases>
- USEPA. (24 de Setiembre de 2018). *EPA*. Obtenido de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/basic-ozone-layer-science>
- USEPA. (11 de Abril de 2018). *EPA*. Recuperado el 2 de Octubre de 2018, de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- USEPA. (24 de Setiembre de 2018). *EPA*. Recuperado el 22 de Octubre de 2018, de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/health-and-environmental-effects-ozone-layer-depletion>
- USEPA. (23 de Abril de 2018). *EPA*. Obtenido de U. S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/report-environment/greenhouse-gases>
- Usman, M., Yasin, H., Rashid, H., & Nasir, A. (2017). Earth Science Pakistan (ESP) Quantification of CO₂ Emissions from Vehicles and Possible Remedial Strategies in Faisalabad City. *Earth Science Pakistan*, 1(1), 15–18.
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodríguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., & Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 142(December), 283–292.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.017>
- Verán-Leigh, D., Larrea-Gallegos, G., & Vázquez-Rowe, I. (2019). Environmental impacts of a highly congested section of the Pan-American highway in Peru using life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(8), 1496–1514.
<https://doi.org/10.1007/s11367-018-1574-1>
- West, J. J., Smith, S. J., Silva, R. A., Naik, V., Zhang, Y., Adelman, Z., ... Lamarque, J. F. (2013). Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human

health. *Nature Climate Change*, 3(10), 885–889. <https://doi.org/10.1038/nclimate2009>

Westberg, K., Cohen, N., & Wilson, K. W. (1971). Carbon monoxide: Its role in photochemical smog formation 1013-1015. *Science*, 171(3975), 1013–1015. <https://doi.org/10.1126/science.171.3975.1013>

World Health Organization. (2005). *Health effects of transport-related air pollution*. (J. Kryzanowski, Michal; Kuna-Dibbert, Birgit; Schneider, Ed.). Copenhagen: World Health Organization. Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/74715/E86650.pdf?ua=1

World Health Organization. (2019). *Health and sustainable development*. Obtenido de Air pollution: <https://www.who.int/sustainable-development/transport/health-risks/air-pollution/en/>

Yi, S., Kurisu, K. H., & Hanaki, K. (2014). Application of LCA by Using Midpoint and Endpoint Interpretations for Urban Solid Waste Management. *Journal of Environmental Protection*, 05(12), 1091–1103. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.512107>

Zea Escamilla, E., Habert, G., Correal Daza, J. F., Daza, C., Archilla, H. F., Echeverry Fernández, J. S., & Trujillo, D. (2018). Industrial or Traditional Bamboo Construction ? Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Bamboo-Based Buildings. *Sustainability*, 10(3096), 14. <https://doi.org/10.3390/su10093096>

Zhenghua, W., & Zhihui, T. (2017). Prediction of Air Quality Index Based on Improved Neural Network. *2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC)*, (6), 200–204.



7. Anexos

Anexo 1: Ejemplos de factores de emisión para carros con pasajeros según tecnología y contaminante

Type	Technology	CO	NMVOC	Nox	N2O	NH3	Pb	CO2 lube
Units		g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km
Notes			Given as THC-CH4	Given as NO2 equivalent				due to lube oil
Petrol Mini	Euro 4 - 98/69/EC II	0.67	0.048	0.056	0.002	0.0339	1.82E-05	0.398
	Euro 5 - EC 715/2007	0.67	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 up to 2016	0.67	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2017-2019	0.67	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2020+	0.67	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
Petrol Small	PRE ECE	37.3	2.77	1.91	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/00-01	29.6	2.19	1.91	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/02	21.7	2.06	2.12	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/03	21.1	2.06	2.3	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/04	13.1	1.68	2.07	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	Open Loop	11.3	0.96	1.53	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	Euro 1 - 91/441/EEC	4.88	0.467	0.426	0.01	0.0922	1.82E-05	0.596
	Euro 2 - 94/12/EEC	2.42	0.206	0.229	0.006	0.1043	1.82E-05	0.53
	Euro 3 - 98/69/EC I	2.07	0.089	0.09	0.002	0.0342	1.82E-05	0.464
	Euro 4 - 98/69/EC II	0.69	0.048	0.056	0.002	0.0341	1.82E-05	0.398
	Euro 5 - EC 715/2007	0.69	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 up to 2016	0.69	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2017-2019	0.69	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2020+	0.69	0.048	0.056	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
Petrol Medium	PRE ECE	37.3	2.8	2.53	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/00-01	29.6	2.19	2.53	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/02	21.7	2.06	2.4	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/03	21.1	2.06	2.51	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/04	13.4	1.68	2.66	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	Open Loop	6.49	0.29	1.29	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	Euro 1 - 91/441/EEC	3.92	0.53	0.485	0.01	0.0922	1.82E-05	0.596

	Euro 2 - 94/12/EEC	2.04	0.251	0.255	0.006	0.1043	1.82E-05	0.53
	Euro 3 - 98/69/EC I	1.82	0.119	0.097	0.002	0.0342	1.82E-05	0.464
	Euro 4 - 98/69/EC II	0.62	0.065	0.061	0.002	0.0342	1.82E-05	0.398
	Euro 5 - EC 715/2007	0.62	0.065	0.061	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 up to 2016	0.62	0.065	0.061	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2017-2019	0.62	0.065	0.061	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2020+	0.62	0.065	0.061	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
Petrol Medium	PRE ECE	37.3	2.77	3.9	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/00-01	29.6	2.19	3.9	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/02	21.7	2.1	2.7	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/03	21.1	2.1	3.52	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	ECE 15/04	13.4	1.679	2.9	0.01	0.002	1.82E-05	0.663
	Euro 1 - 91/441/EEC	3.41	0.43	0.467	0.011	0.0922	1.82E-05	0.596
	Euro 2 - 94/12/EEC	1.67	0.196	0.242	0.003	0.1043	1.82E-05	0.53
	Euro 3 - 98/69/EC I	1.5	0.088	0.091	0.002	0.0342	1.82E-05	0.464
	Euro 4 - 98/69/EC II	0.53	0.048	0.059	0.002	0.0343	1.82E-05	0.398
	Euro 5 - EC 715/2007	0.53	0.048	0.059	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 up to 2016	0.53	0.048	0.059	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2017-2019	0.53	0.048	0.059	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398
	Euro 6 2020+	0.53	0.048	0.059	0.0013	0.0123	1.82E-05	0.398

Fuente: EMEP/EEA Guidebook (2019)