

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Estimación de emisiones vehiculares mediante modelo dinámico
de sistemas en la carretera Central en la ciudad de Lima - Perú
noviembre 2020**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Keren Abigail Prieto Mostacero

Iveth Sheyla Ordoñez Luera

Asesor:

Mag. Joel Hugo Fernandez Rojas

Lima, agosto de 2021

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Mg. Ing. Joel Hugo Fernandez Rojas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“ESTIMACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES MEDIANTE MODELO DINÁMICO DE SISTEMAS EN LA CARRETERA CENTRAL EN LA CIUDAD DE LIMA - PERÚ NOVIEMBRE 2020”** constituye la memoria que presenta el (la) / los Bachiller(es) Keren Abigail Prieto Mostacero e Iveth Sheyla Ordoñez Luera, para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 03 días del mes de setiembre del año 2021.



Joel Hugo Fernandez Rojas

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 13 días día(s) del mes de agosto del año 2021 siendo las 8:30 horas, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga, el secretario: Ing. Nancy Curasi Rafael, y los demás miembros: Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio y el Ing. Orlando Alan Poma Porras y el asesor Mg. Joel Hugo Fernández Rojas, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Diseño de un modelo dinámico de sistemas para la estimación de emisiones vehiculares en base a la metodología EMEP/EEA en la Carretera Central km 19 y km 37 para noviembre del 2020"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **IVETH SHEYLA ORDOÑEZ LUERA**

..... b) **KEREN ABIGAIL PRIETO MOSTACERO**.....

conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**
(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **IVETH SHEYLA ORDOÑEZ LUERA**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
APROBADO	19	A	Excelente	Excelencia

Candidato (b): **KEREN ABIGAIL PRIETO MOSTACERO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
APROBADO	19	A	Excelente	Excelencia

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Mg. Milda Amparo
Cruz Huaranga



Asesor
Mg. Joel Hugo
Fernández Rojas



Candidato/a (a)
Iveth



Secretario
Ing. Nancy Curasi
Rafael

Miembro
Mg. Jackson
Edgardo Pérez
Carpio

Miembro
Ing. Orlando Alan
Poma Porras



Candidato/a (b)
Keren

Estimación de emisiones vehiculares mediante modelo dinámico de sistemas en la carretera Central en la ciudad de Lima - Perú noviembre 2020

Estimation of vehicular emissions by means of a dynamic model of systems in the Central highway in the city of Lima - Peru November 2020

Prieto Mostacero Keren Abigail^a, Ordoñez Luera Iveth Sheyla^a Joel Hugo Fernandez Rojas^a
<https://orcid.org/0000-0003-1084-1551>, <https://orcid.org/0000-0001-5774-9061>, <https://orcid.org/0000-0002-1761-2818>

^a*E.P Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.*

Resumen

El objetivo de la investigación fue analizar y estimar las emisiones vehiculares generadas y liberadas a la atmosfera en la Carretera Central al Este de la ciudad de Lima Metropolitana, durante las horas diurnas de 35 días continuos en noviembre y diciembre del 2020. Para el estudio se desarrolló un modelo dinámico de sistemas en el software VENSIM PLE 8.2.1, en el cual se ingresaron múltiples variables de niveles de actividad como el número de vehículos contabilizados agrupados en categorías y factores de emisión con relación a la velocidad adquiridos de la EMEP/EEA 2019, los agentes contaminantes considerados fueron CO₂, CO y HCT, NO_x PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃. Los resultados muestran que se contabilizaron 853670 vehículos, de los cuales la categoría B correspondiente a vehículos livianos de cuatro pasajeros representan un 59.18% del total. El modelo estimo como principal agente gaseoso que se emite a la atmosfera al CO₂ con un total de 632982 toneladas liberadas, tres agentes presentan emisiones medias CO, HCT y NO_x con 174.14, 66.57 y 41.55 toneladas respectivamente, las emisiones menores corresponden al PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃ los cuales generaron 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 y 0.02 toneladas respectivamente. En cuanto a las categorías vehiculares, la categoría B correspondiente a Vehículos livianos de cuatro pasajeros es la que emite mayor cantidad de emisiones de CO₂, CO y HCT, la categoría G Camiones pesados mayores a 16 toneladas y la categoría A Motocicletas suman también a estas emisiones, aunque en menor medida.

Palabras claves: *Estimación, emisiones, factor de emisión, nivel de actividad, VENSIM PLE.*

Abstract

The objective of the research was to analyze and estimate the vehicular emissions generated and released into the atmosphere in the Central Highway to the East of the city of Metropolitan Lima, during the daytime hours of 35 continuous days in November and December 2020. For the study, developed a dynamic model of systems in the VENSIM PLE 8.2.1 software, in which multiple variables of activity levels were entered, such as the number of counted vehicles grouped in categories and emission factors based on the speed acquired from the EMEP / EEA 2019, the pollutants considered were CO₂, CO and HCT, NO_x PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O and NH₃. The results show that 853 670 vehicles were counted, of which category B corresponding to four-passenger light vehicles represent 59.18% of the total. The model estimated CO₂ as the main gaseous agent that is emitted into the atmosphere with a total of 632982 tons released, three agents present average emissions CO, HCT and NO_x with 174.14, 66.57 and 41.55 tons respectively, the lowest emissions correspond to PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O and NH₃ which generated 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 and 0.02 tons respectively. Regarding the vehicle categories, category B corresponding to four-passenger light vehicles is the one that emits the highest amount of CO₂, CO and HCT emissions, category G Heavy trucks over 16 tons and category A Motorcycles also add to these emissions, although to a lesser extent.

Keywords: *Estimation, emissions, emission factor, activity level, VENSIM PLE.*

1. Introducción

La contaminación del aire constituye uno de los más grandes problemas ambientales actuales a nivel Mundial, como resultado de la presencia de agentes contaminantes de origen natural y antrópico, presentes en un gran número de ciudades del planeta. El aire tiene una interacción directa con el organismo humano y la presencia de estos agentes puede producir efectos graves en la salud humana (Romero., & et al 2006), de acuerdo a la OMS (Organización Mundial de la Salud), cada año 7 millones de personas mueren prematuramente como consecuencia de la contaminación del aire (ONU, 2019). Actualmente, el enfoque principal de la contaminación atmosférica son las emisiones por parte del parque automotor, que contienen un número elevado de contaminantes como gases orgánicos totales (GOT), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), material particulado (PM), gases tóxicos del aire (3-butadieno, benceno, formaldehído, etc.) y especies reductoras de visibilidad (amoníaco, sulfatos, PM_{2.5}, etc.) (Herrera, Rodríguez, & Rojas, 2012). En el Perú, la contaminación del aire inició con el desarrollo de las industrias de harina de pescado por los años sesenta y setenta; las mineras metálicas y no metálicas no se quedaron atrás, y las ciudades más afectadas fueron Lima, Callao, Chimbote, La Oroya y Yuta (Iglesias & Gonzales, 2018). Según el Banco Mundial, la ciudad de Lima encabezaba la lista como la ciudad más contaminada para el año 2007, y las de todas las emisiones atmosféricas, las del parque automotor era la fuente más importante (Rojas, 2017). El PISA (Plan Integral de Saneamiento Atmosférico) indica que los vehiculares automotores son responsables de alrededor del 90% de la contaminación del aire de Lima y el 10% restante es explicado por las fuentes estacionarias (Rojas, 2017). Teniendo como resultado elevados niveles de concentración de sustancias tóxicas en el aire, e incluso en algunas partes de Lima durante horas puntas, superan los niveles permitidos a nivel internacional, lo que provoca notablemente problemas graves en la salud pública y degradación de la calidad de vida (Lira, 1999).

Según el (INEI, 2017) La ciudad de Lima, concentra 8.575 millones de habitantes, lo que corresponde aproximadamente a la cuarta parte de la población total peruana, lo que ha creado una tendencia creciente en los últimos 30 años en las fuentes de contaminación atmosférica (emisiones vehiculares, industriales y comerciales) están asociadas con la transformación de los combustibles fósiles, carbón, etc. (Iglesias, 2000). El distrito de Lima-metropolitana cuenta con grandes cantidades de establecimientos industriales, las que predominan con un 52%, son las industrias de papel, alimentos y bebidas, metálicas y maquinarias, textil, y curtiembre (Grupo de estudio técnico ambiental, 2004). De la misma manera en el distrito de Ate, el 53% de sus establecimientos son industrias, y en el distrito de los Olivos el 95,8% son microempresas productoras, en su gran mayoría, estas industrias no cuentan con dispositivos de control de emisiones contaminantes en sus calderos y/o chimeneas, o se encuentran en desuso por falta de mantenimiento, representando un peligro para la calidad del aire en las zonas, incluso la problemática se agrava dependiendo del tipo de combustible que utilizan y por la limitada capacidad de fiscalización de los LMP's vigentes (GEOPERÚ, 2006). Por otro lado, Lima al ser una ciudad céntrica presenta alta congestión vehicular, y constante combustión de gases de efecto invernadero, por esta razón, la ciudad es considerada como una zona de atención prioritaria (ZAP) en materia de gestión de calidad de aire de acuerdo a la cuarta disposición final del DS N° 003-2017 - MINAM, en base a ello se han realizado estudios de las emisiones atmosféricas a causa de fuentes móviles (Municipalidad de Lima, 2019).

Existen diversas normativas internacionales como nacionales que buscan gestionar y frenar la emisión de contaminantes del parque automotor. Según (Sánchez et al., 2019), entre las normas internacionales más conocidas que establecen límites de emisiones para vehículos de carretera están la legislación CARB (California Air Resources Board), EPA (Agencia de Protección Ambiental) y EURO. En el caso de protocolos para el monitoreo de fuentes móviles, en Latinoamérica existen diversas guías, tal es el caso de Chile, que cuenta con una "Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes" (Gobierno de Chile, 2009). A nivel nacional aunque no se cuenta con algún protocolo de monitoreo de fuentes móviles, se tienen normativas que buscan la regulación de este tipo de emisiones, tal es el caso de la norma peruana D.S N° 007-2020-MINAM, que aprueba el Índice de Nocividad de Combustibles (INC) para el periodo 2020-2021, se muestra una lista de combustibles según su índice de nocividad, la cual es utilizado como un criterio del Ministerio de Economía y Finanzas para establecer el impuesto selectivo al consumo (ISC), de esta manera se incentiva que los transportistas disminuyan el consumo de combustibles más contaminantes, mediante un mayor pago de impuestos (Ministerio del Ambiente, 2018). Así mismo, en la norma peruana D.S. N° 010-2017-MINAM, se establecen los Límites Máximos Permisibles de emisiones Atmosféricas para vehículos automotores; lo que incluye vehículos automotores en circulación, vehículos automotores nuevos a ser importados o ensamblados en el país y vehículos automotores usados importados, buscando proteger, asegurar la salud de la pública, y garantizar así el cuidado del ambiente.

Las estaciones de medición pública y privada monitorean las cantidades de contaminantes concurrentes en varios puntos de la ciudad lo cual nos ayudan y permiten formular indicadores de calidad del aire. Las emisiones de fuentes móviles nos dan ciertos criterios metodológicos específicos, aunque, existen escasas estimaciones de lo que efectivamente se expulsa a la atmósfera en términos de cantidad. Estas mediciones directas son de alto costo y requieren personal competente, por eso, generalmente se litiga a estimaciones aplicando diversas metodologías (SENAMHI, 2014). En cuanto a la estimación de emisiones se emplean métodos como; la medición directa, balance de masas o modelos de cálculo de una muestra representativa, donde se emplean factores de emisión que pueden ser locales o de referencia (Gobierno de Colombia, 2017). Estos factores de emisión son obtenidos en modelos computacionales, de los cuales, los más usados son los siguientes; Modelo Mobile, que calcula factores de emisión para vehículos de gasolina y diésel, Modelo IVE sirve para estimar rápidamente del inventario de emisiones de automóviles en circulación – usado en Perú y, la Metodología CORINAIR aliado de EMEP son usados en la prevención y control de contaminación transfronteriza (Giraldo Serna, 2011). El Programa Europeo de Modelización y Evaluación (EMEP) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) cada tres años brindan una guía para la elaboración de inventarios nacionales de emisiones, este documento respalda los informes sobre contaminación atmosférica transfronteriza a largo plazo (EMEP/EEA, 2019).

En el presente artículo se llevó a cabo la estimación de emisiones vehiculares generadas en la Av. Carretera Central ubicada al Este de la ciudad Lima, una de las principales vías nacionales A través de la construcción un modelo dinámico de sistemas el cual consiste en un diagrama que muestran relación entre sus variables, además de conocer los cambios en las variables a través del tiempo utilizando ecuaciones (Franco et al., 2015; Mercado et al., 2014), y cuantificar las emisiones liberadas a la atmosfera de origen vehicular, la estimación contemplo un conteo mecánico de vehículos in situ, así como el uso de las metodologías internacionales EMEP/EEA, metodologías adoptadas en diversos países de la región, debido a la baja dificultad técnica de aplicación y representatividad en cuanto a los resultados de las estimaciones de emisiones.

2. Materiales y Métodos

2.1. Lugar de Estudio

El área de estudio donde se llevó a cabo la estimación de emisiones vehiculares corresponde a la Carretera Central del Perú ruta PE-22,2 autopista administrada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) del Perú, es una vía transversal de penetración de 176.22 Km de longitud, que parte de la ciudad de Lima y se comunica con el departamento de Junín en el centro del país.

Se estableció una sección de 16.5 Km de largo de la Carretera Central (Avenida Nicolás Ayllon), de inicio en el kilómetro 16.5 con coordenadas UTM 300227.00 m Este y 8673135.00 m Sur, finalizando en el kilómetro 33.0 con coordenadas UTM 314704.00 m Este y 8679344.00 m Sur. Se eligió esta sección de vía debido a que es recta y presencia gran flujo vehicular, además está libre de cruces que tengan conexión con otras avenidas principales con el fin de minimizar la variación en el flujo vehicular.

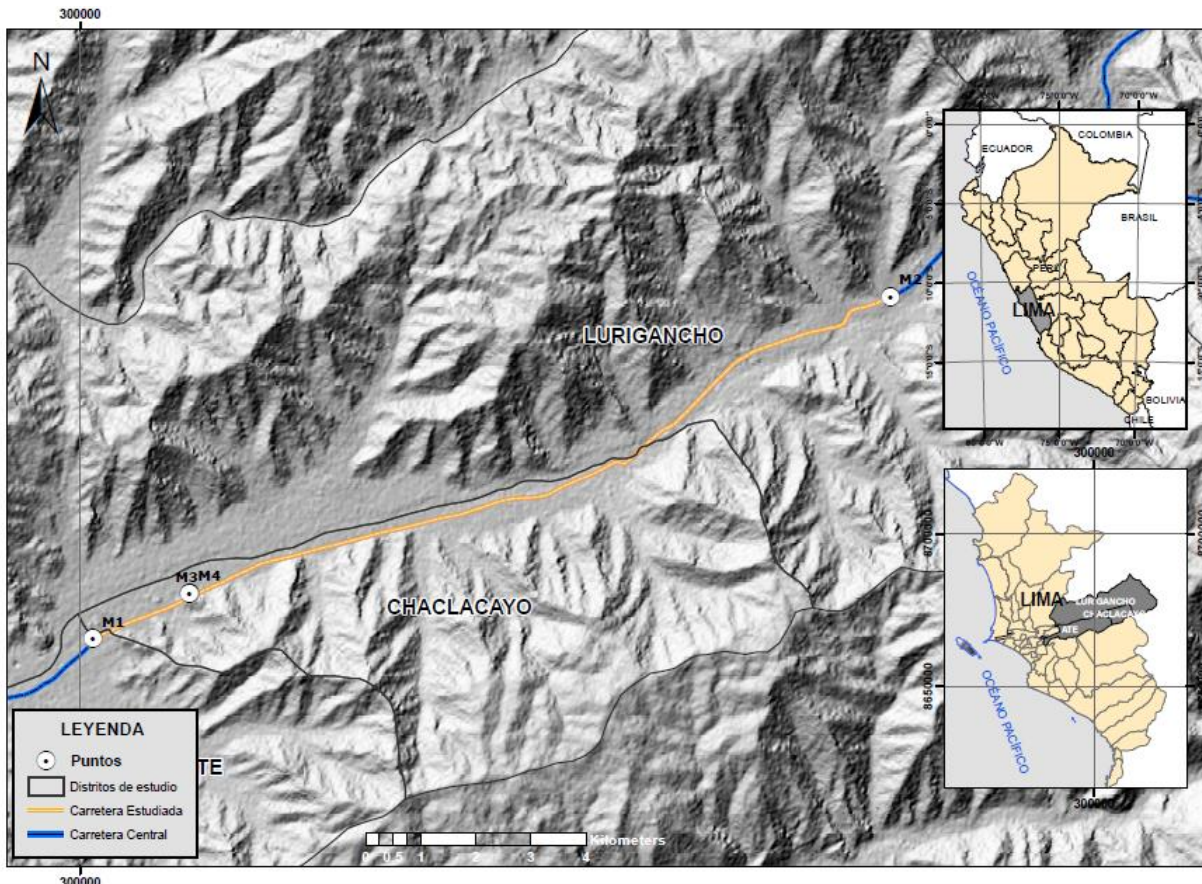


Figura 1 Ubicación del área de estudio

En la figura 1 se observa el mapa Lima metropolitana y la sección de vía de la Carretera Central que se estableció para la estimación de emisiones vehiculares, el punto M1 corresponde a la salida de la Comunidad Autogestionaria de Huaycán, el punto M2 corresponde al cruce de la Carretera Central con la Avenida 7 de junio en Lurigancho-Chosica, y los punto de control M3,M4 corresponden los lugares donde se realizó el conteo del flujo vehicular, en la tabla 1 se puede observar los datos de ubicación geográfica.

Tabla 1

Ubicación geográfica de los puntos de control en coordenadas UTM.

PUNTOS	UBICACIÓN – DESCRIPCION	LONGITUD	LATITUD	ALTURA*
M1	Comunidad Autogestionaria de Huaycán	300227.00 E	8673135.00 S	511 m
M2	Cruce con la Avenida 7 de Junio	314704.00 E	8679344.00 S	846 m
M3	Cruce con la entrada de Ñaña dirección Este a Oeste	302003.09 E	8673959.94 S	548 m
M4	Cruce con la entrada de Ñaña dirección Oeste a Este	301979.56 E	8673951.48 S	550 m

*: Altura en metros sobre el nivel del mar. La longitud y latitud UTM se encuentran en la zona 18 L.

Fuente: Elaborado por el autor de la investigación

2.2. Metodología para Cálculo de Emisiones Vehiculares

Las emisiones vehiculares contemplan cinco tipos de emisiones, emisiones en caliente, por partidas en frío, evaporativas, polvo y desgaste, siendo las emisiones en caliente aquellas que se generan cuando el vehículo se encuentra en operatividad las que representa el mayor porcentaje del total de emisiones liberadas a la atmosfera. La estimación de emisiones vehiculares en caliente se realizó a partir de metodologías internacionales proporcionadas en la Guía de Inventario de emisiones vehiculares del EMEP del año 2019, en la sección para fuentes móviles, se partió de la siguiente ecuación 1:

$$E_i = \sum_k \text{Nivel de actividad}_k \times FE_{ik} \quad (1)$$

Donde:

E_i : Emisiones (masa) del contaminante i .

Nivel de actividad $_k$: Nivel de actividad de la categoría vehicular k .

FE_{ik} : Factor de emisión del contaminante i para la categoría k (g/Km).

Para los niveles de actividad se determinó el flujo vehicular durante 35 días continuos del 16 de noviembre al 20 de diciembre del 2020 mediante conteo mecánico en la sección de vía de estudio de 16.5 Km de largo en las horas diurnas de 6:00 horas a 18:00 horas de cada día, se determinó la velocidad promedio de los vehículos en 55 Km/h, y se clasifico a las categorías vehiculares en ruta como se muestra en la tabla 2. A partir de establecer los niveles de actividad se obtuvo la siguiente ecuación 2, los factores de emisión en función de la velocidad para cada categoría vehicular se muestran en la tablas 3 y 4.

$$E_{ijk} = F_{jk} \times L_j \times FE_{ik} \quad (2)$$

Donde:

E_{ijk} : Emisiones (Tn) del contaminante considerado i en una sección de vía j para la categoría vehicular k en una hora determinada.

F_{jk} : Flujo vehicular (veh/h) total de la sección de vía j a la hora determinada.

L_j : Largo de la sección de vía (Km).

FE_{ik} : Factor de emisión en función de la velocidad (g/Km) del contaminante i para la categoría k (g/Km).

Tabla 2

Categorías Vehiculares

CATEGORIAS	VEHICULOS CONSIDERADOS
A	Motocicletas, motos lineales, moto taxis, moto cars.
B	Vehículos livianos de pasajeros, taxis, colectivos, autos (4 pasajeros), Station Wagon, mini van (menor a 10 pasajeros).
C	Vehículos livianos comerciales, camionetas 4x4, camionetas, combis, furgones, mini van (15 pasajeros).
D	Buses interurbanos, buses interprovinciales, buses urbanos.
E	Camiones livianos ≤ 7.5 Tn, Coaster.
F	Camiones medianos 7.5 a 16 Tn.
G	Camiones pesados ≥ 16 Tn.

Fuente: Elaborado por el autor de la investigación

La tabla 2 muestra las categorías vehiculares asignadas, donde se agruparon diferentes tipos de vehículos según las similitudes técnicas que compartían estos, como la capacidad del motor de combustión interna, peso del vehículo, tipo de combustible usado, entre otras similares, donde se establecieron siete categorías como resultado.

Para determinar la velocidad promedio y el tipo de combustible, se elaboró una encuesta que constaba de tres preguntas, la cual se llevó a cabo a los choferes de las unidades durante la parada de los vehículos en el semáforo, como se muestra en la figura 2. En la figura 3 se visualiza el formato donde se registró el conteo mecánico de los vehículos, siendo este reproducido varias veces tomando en cuenta la cantidad de personas en el conteo y los 35 días de estudio. Este formato se entregó diariamente a cada persona para llevar a cabo el conteo, al finalizar el día se entregaba nuevamente este formato para transcribir la información recopilada de manera más clara.

ENCUESTA

1. ¿A qué velocidad máxima transita por esta sección de carretera?

2. ¿A qué velocidad mínima transita por esta sección de carretera?

3. ¿Qué tipo de combustible usa su vehículo?

- a) Gasolina
- b) Petróleo
- c) Gas
- d) Otro

Figura 2 Encuesta de velocidad y tipo de combustible

FECHA: _____				VEHÍCULOS CHOSICA - HUAYCAN						
HORA	DURACIÓN DE TIEMPO			CATEGORÍAS VEHICULARES						
				CATEGORÍA A Vehículos menores	CATEGORÍA B Vehículos de transporte particular (pasajeros y taxis)	CATEGORÍA C Camionetas, 4X4 y Combis	CATEGORÍA D Buses Interprovinciales y buses Lorito	CATEGORÍA E Camiones livianos y Coaster	CATEGORÍA F Camiones medianos	CATEGORÍA G Camiones pesados
1	06:00	06:59	A.M.							
2	07:00	07:59	A.M.							
3	08:00	08:59	A.M.							
4	09:00	09:59	A.M.							
5	10:00	10:59	A.M.							
6	11:00	11:59	A.M.							
7	12:00	12:59	P.M.							
8	13:00	13:59	P.M.							
9	14:00	14:59	P.M.							
10	15:00	15:59	P.M.							
11	16:00	16:59	P.M.							
12	17:00	17:59	P.M.							

Figura 3 Formato de conteo mecánico de vehículos

Tabla 3

Factores de Emisión en g/Km, en función de la velocidad para las Categorías Vehiculares A, B, C.

AGENTE	CATEGORIA A	CATEGORIA B	CATEGORIA C
PM ₁₀	-	0.019	0.000045×V ² -0.004885×V+0.1932
CO	0.0139×V ^{2-1.42} ×V+55.0	0.0203×V ² -2.2662×V+77.661	0.000223×V ² - 0.026×V+1.076
HCT	0.0015×V ^{2-0.164} +V+5.51	11.589×V ^{-0.5595}	0.0000175×V ² -0.00284×V+0.2162
NO _x	0.00005×V ^{2-0.0009} ×V+0.092	9.5×10 ⁻⁶ ×V ³ ×0.0016×V ² +0.0738×V+1.2586	0.000241×V ² -0.03181×V+2.0247
CO ₂	*	*	*
SO ₂	**	**	**
CH ₄	0.2	3.31×10 ⁻⁵ ×V ² -0.00573×V+0.268	0.005
N ₂ O	0.002	0.005	0.017
NH ₃	0.002	0.002	0.001
CC	0.02730×V ^{2-2.8490} ×V+98.90	595.76×V ^{-0.534}	0.0198×V ² -2.506×V+137.42

*, **: Los agentes CO₂ y SO₂ no presentan factores de emisión ya que son derivados del consumo de combustible CC y otras emisiones como se muestra en las ecuaciones 3 y 4.

Fuente: (Pacsi Valdivia, 2016)

Tabla 4

Factores de Emisión en g/Km, en función de la velocidad para las Categorías Vehiculares D, E, F y G.

AGENTE	CATEGORIA D	CATEGORIA E	CATEGORIA F	CATEGORIA G
PM ₁₀	9.2934×V ^{-0.7373}	4.5563×V ^{-0.707}	9.6037×V ^{-0.7259}	10.933×V ^{-0.7054}
CO	63.791×V ^{-0.8393}	37.280×V ^{-0.6945}	37.28×V ^{-0.6945}	37.280×V ^{-0.6945}
HCT	44.217×V ^{-0.8870}	40.120×V ^{-0.8774}	40.12×V ^{-0.8774}	40.12×V ^{-0.8774}
NO _x	125.87×V ^{-0.6562}	50.305×V ^{-0.7708}	92.584×V ^{-0.7393}	116.16×V ^{-0.5859}
CO ₂	*	*	*	*
SO ₂	**	**	**	**
CH ₄	0.175	0.085	0.085	0.175
N ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.03
NH ₃	0.003	0.003	0.003	0.003
CC	1708×V ^{-0.5396}	1425.2×V ^{-0.7593}	1068.4×V ^{-0.4905}	1678.7×V ^{-0.58593}

*, **: Los agentes CO₂ y SO₂ no presentan factores de emisión ya que son derivados del consumo de combustible CC y otras emisiones como se muestra en las ecuaciones 3 y 4.

Fuente: (Pacsi Valdivia, 2016)

Las tablas 3 y 4 muestran los factores de emisión en función de la velocidad para las siete categorías vehiculares establecidas en ruta, los factores de emisión son para condiciones de vehículos sin normas y tecnología de control de emisiones, y presentan una incertidumbre de +- 2% (EMEP/EEA, 2019), ya que en el Perú las políticas de control no son exigentes en su cumplimiento, y el acceso a la tecnología del control de emisiones vehiculares es más costosa que el propio vehículo en muchos casos. Los agentes contaminantes considerados para la estimación de emisiones en caliente fueron, Material Particulado Respirable (MP₁₀), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (HCT), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O) y Amoníaco (NH₃).

Para la estimación de las emisiones de CO₂ se utilizó la metodología presentada en la EMEP/EEA, que establece y menciona que el carbono contenido en el combustible es oxidado a CO₂, teniendo en consideración que el carbono también es emitido como CO, hidrocarburos totales y material particulado. La ecuación 3 indica la estimación para el CO₂.

$$EE_{CO_2j} = 44.011 \times \frac{CC_{jm}}{12.0011+1.008 \times r_{H:C_m}} - \frac{E_{jm}^{CO}}{28.011} - \frac{E_{jm}^{HCT}}{13.85} - \frac{E_{jm}^{MP}}{12.011} \quad (3)$$

*Correspondencia de autor: Km 19 Carretera Central, Ñaña, Lurigancho, Lima 15, Perú E-mail: kerenpriet@upeu.edu.pe, ivethordonez@upeu.edu.pe, Teléfono: 000 000 000

Donde:

EE_{CO_2j} : Emisiones de CO₂ emitidas por el vehículo de la categoría j (Tn/día).

CC_{jm} : Consumo de combustible del vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).

E_{jm}^{CO} : Emisiones de CO emitidas por el vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).

E_{jm}^{HCT} : Emisiones de HCT emitidas por el vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).

E_{jm}^{MP} : Emisiones de MP emitidas por el vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).

$r_{H:C_m}$: Relación entre el hidrogeno y carbono existente en el combustible (1.8 para gasolina y 2.0 para diésel).

Para la estimación de emisiones de SO₂ se utilizó la metodología presentada en la EMEP/EEA, donde se asume que todo el contenido de azufre (S) en el combustible se transforma completamente en SO₂. Teniendo en cuenta que el peso atómico del azufre es 32 y el del oxígeno 16, el peso final será entonces el doble que el del azufre, siendo la ecuación 4 la forma de estimación, se asume que el contenido de azufre es de 60 ppm.

$$EE_{SO_2j} = 44.011 \times CC_{jm} \times Scont_m \quad (4)$$

Donde:

EE_{SO_2j} : Emisiones de SO₂ emitidas por el vehículo de la categoría j (Tn/día).

CC_{jm} : Consumo de combustible del vehículo de la categoría j que utiliza combustible m (Tn/día).

Sct_m : Contenido de azufre del combustible tipo m (en peso m/m).

2.3. Construcción de Modelo Dinámico de Sistemas

Para la construcción del modelo dinámico se utilizó el software VENSIM PLE 8.2.1, se tomó como variables el tiempo de evaluación de la estimación de emisiones de 35 días, el número de vehículos contabilizados por categoría, los factores de emisión para cada agente contaminante, la velocidad promedio en la sección de la vía de estudio y el largo de la vía. En la figura 2 se muestra el diagrama dinámico de sistemas construido para estimar las emisiones en caliente generadas por la Categoría Vehicular A, se observa la variable “Time” que corresponde a los 35 días de evaluación de la estimación, la cual ejerce un efecto directo en la variable “Numero de Vehículos Categoría A” correspondiente al flujo vehicular registrado cada día durante las horas diurnas del periodo de evaluación, de esta última variable se generan ocho nuevas variables “Emisiones PM10 A”, “Emisiones CO A”, “Emisiones HCT A”, “Emisiones CC A”, “Emisiones CH4 A”, “Emisiones NOX A”, “Emisiones NH3 A” y “Emisiones N2O A”, las cuales son producto de la relación de las variables “Velocidad Promedio A” y “Longitud de Vía A” con cada factor de emisión correspondiente a cada agente contaminante emitido representados en las variables “F.E. PM 10 A”, “F.E. CO A”, “F.E. HCT A”, “F.E. CC A”, “F.E. CH4 A”, “F.E. NOX A”, “F.E. NH3 A” y “F.E. N2O A”. Como proceso final de la estimación se generan las emisiones de CO₂ y SO₂ representadas en las variables “Emisiones CO2 A” y “Emisiones SO2 A”, producto de la relación de las variables “Emisiones PM10 A”, “Emisiones CO A”, “Emisiones HCT A” y “Emisiones CC A” respectivamente como se indica en el diagrama.

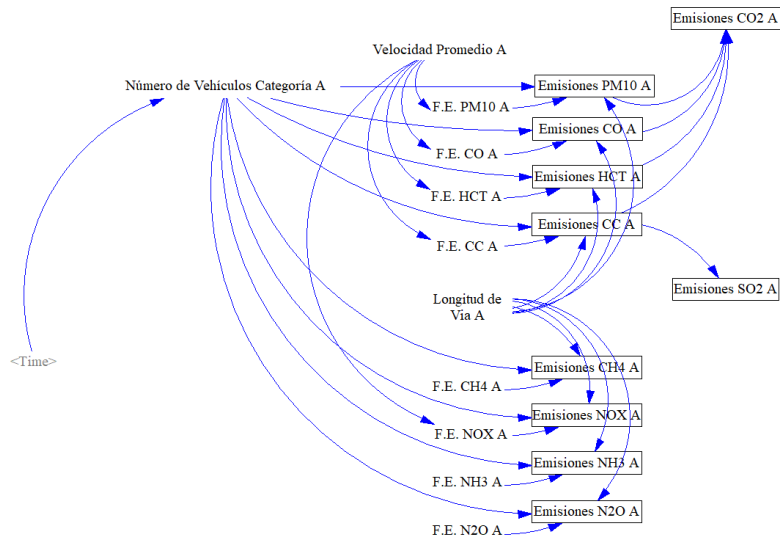


Figura 4 Diagrama dinámico de sistemas para estimar las emisiones en caliente de la Categoría A.

En la figura 2 se muestra el diagrama dinámico de sistemas construido para estimar las emisiones generadas por la categoría vehicular A establecida. Para las categorías B, C, D, E, F y G la estructura del diagrama se mantiene, las variables que se mantienen constantes son “Time”, “Velocidad Promedio” y “Longitud de Vía”, las variables que adoptan valores diferentes para cada categoría son “Numero de Vehículos Categoría”, “F.E. PM 10”, “F.E. CO”, “F.E. HCT”, “F.E. CC”, “F.E. CH4”, “F.E. NOX”, “F.E. NH3” y “F.E. N2O”, obteniéndose emisiones diferentes en cada una de estas categorías asignadas para cada agente contaminante considerado como se observa en la figura 3 donde se muestra el diagrama dinámico de sistemas completo observándose una compleja relación entre variables de cada categoría, las emisiones generadas en cada categoría son sumadas obteniéndose las variables finales “Emisiones Totales CO2”, “Emisiones Totales PM10”, “Emisiones Totales CO”, “Emisiones Totales HCT”, “Emisiones Totales SO2”, “Emisiones Totales CH4”, “Emisiones Totales NOX”, “Emisiones Totales NH3” y “Emisiones Totales N2O” como se observa en la figura 4.

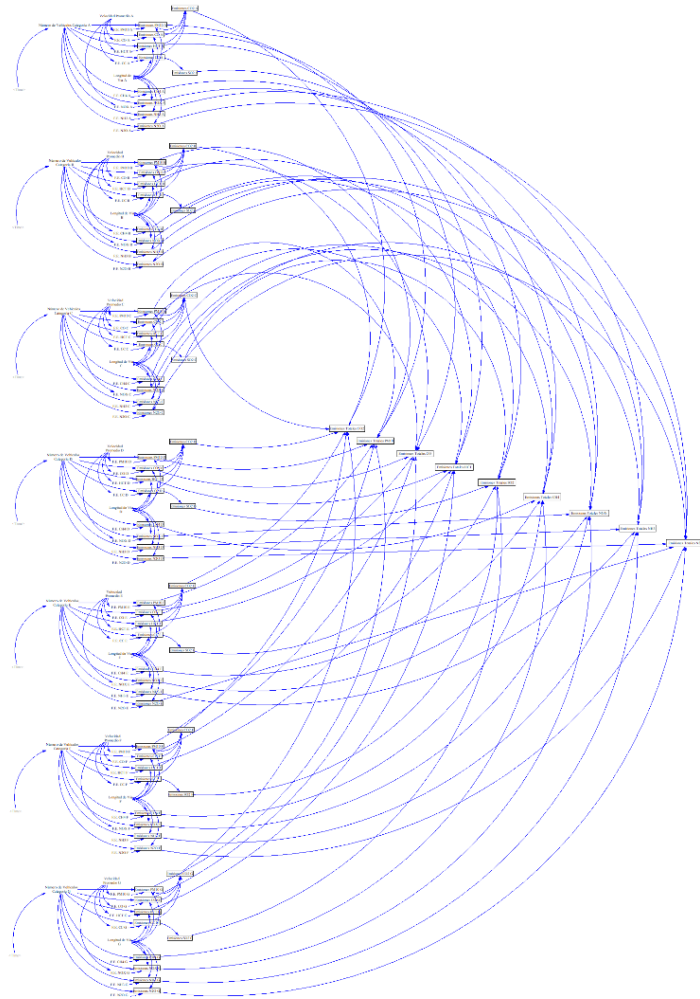


Figura 5 Diagrama dinámico de sistemas para estimar las emisiones en caliente de la Categoría A, B, C, D, E, F y G.

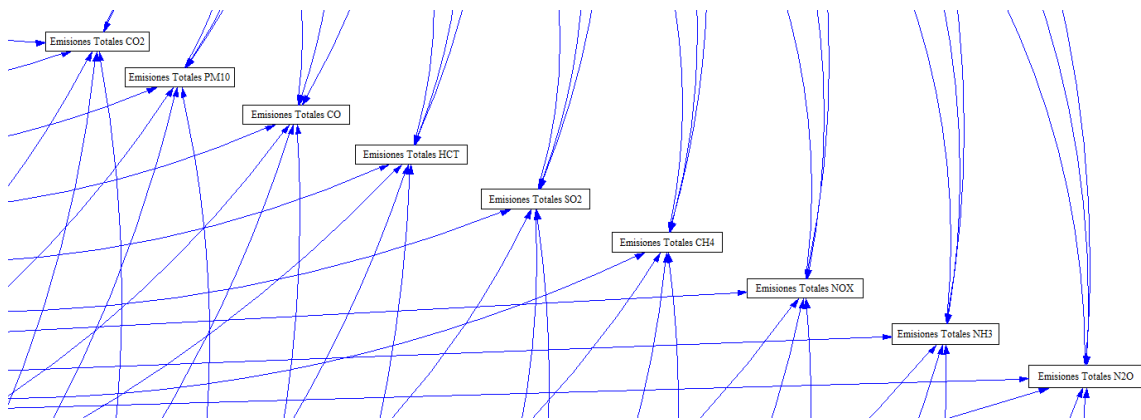


Figura 6 Acercamiento del diagrama dinámico de sistemas final mostrando las Emisiones Totales para cada agente contaminante.

3. Resultados

3.1. Conteo de Unidades Vehiculares

Luego de realizar el conteo mecánico en la sección de vía de la carretera Central, se obtuvo el número de vehículos totales que circulan según las categorías establecidas como se muestra en tabla 5, donde se observa la sumatoria de vehículos registrados por semana para cada categoría, así como el total de vehículos de cada categoría durante los 35 días de conteo mecánico y el total de vehículos contabilizados durante cada semana.

Tabla 5

Resultados del Conteo Vehicular para cada Categoría en Vehículos/Semana.

CATEGORIAS	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	TOTAL
A	10304	9926	11200	11102	10472	53 004
B	101353	112746	93492	100548	97132	505 271
C	24688	16051	25760	25732	24556	116 787
D	1940	1280	1652	1680	1848	8 400
E	16430	14598	17808	18466	18564	85 866
F	4824	6192	6328	7168	5992	30 504
G	9910	8172	12936	11984	10836	53 838
TOTAL	169449	168965	169176	176680	169400	853 670

Nota: Los números indican la sumatoria total de vehículos contabilizados de forma mecánica durante cada semana del periodo de análisis según la categoría.

Fuente: Elaborado por el autor de la investigación

Como se observa en la tabla 5, se contabilizaron 853 670 unidades vehiculares durante los 35 días de análisis, la categoría con mayor de número de vehículos contabilizados corresponde a la B Vehículos livianos de pasajeros, taxis, colectivos y autos (4 pasajeros), con un total de 505 271 vehículos lo que equivale a un 59.18 % del total de unidades vehiculares, y la categoría con menor número de vehículos corresponde a la D Buses interurbanos, buses interprovinciales y buses urbanos, con un total de 8400 vehículos equivalentes al 1.66% del total del unidades contabilizadas.

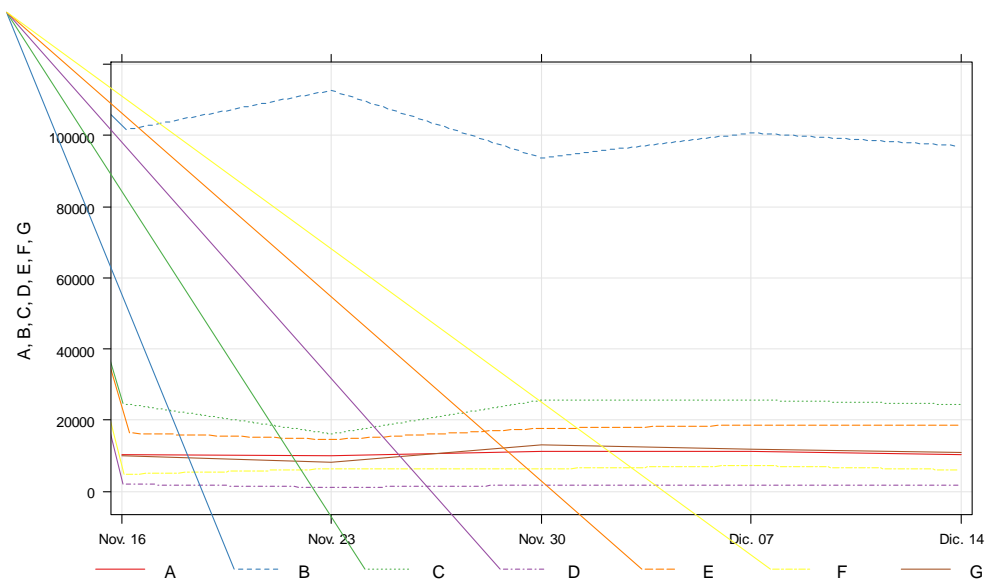


Figura 7 Distribución del flujo vehicular registrado.

La figura 5 muestra la distribución del flujo vehicular por categorías contabilizado durante los 35 días del estudio, se observa un notable número de vehículos pertenecientes a la categoría B la cual registro una media 101054 y una mediana de 100548, la categoría A una media de 10601 vehículos y una mediana de 10472, la categoría C una media de 23357 y una mediana de 24688, la categoría D una media y mediana de 1680, la categoría E una media de 17173 y mediana de 17808, la categoría F una media de 6101 y mediana de 6192, y por último la categoría G registro una media de 10768 y mediana de 10836 vehículos.

3.2. Emisiones Vehiculares en Caliente

Se cargaron los datos de niveles de actividad y factores de emisión en el modelo dinámico presentado en las figuras 2, 3 y 4 mediante el software VENSIM PLE 8.2.1, donde se obtuvieron las estimaciones de emisiones en caliente para los agentes contaminantes Material Particulado Respirable (MP₁₀), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (HCT), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O) y Amoníaco (NH₃), generados por los vehículos contabilizados en la sección de vía de la carretera Central, obteniéndose los siguientes resultados gráficos.

Emisiones de CO₂

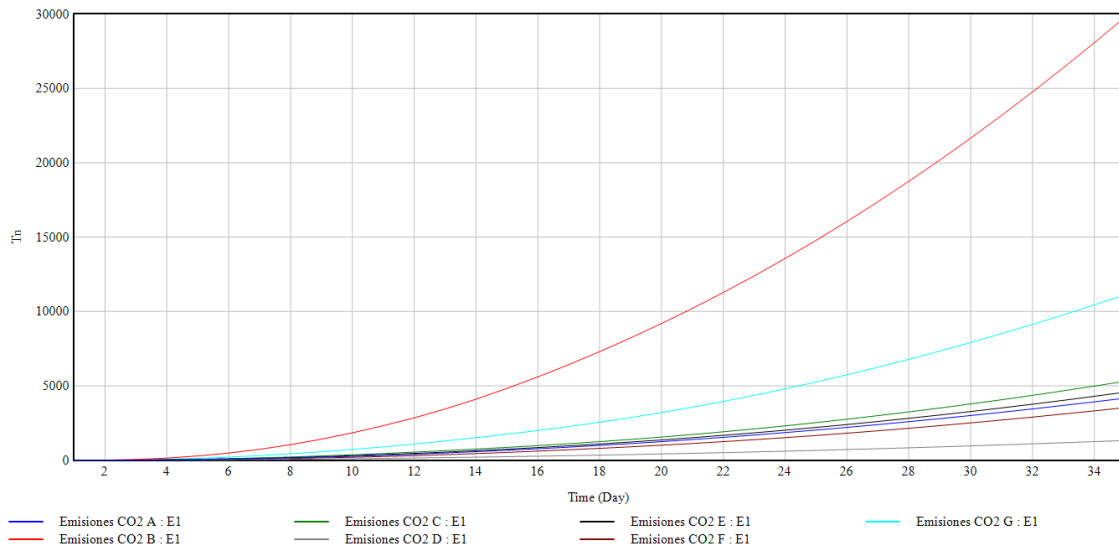


Figura 8 Emisiones de CO₂ por categorías vehiculares.

La figura 6 muestra gráficamente las emisiones generadas de CO₂ acumuladas para los 35 días de análisis, se observa que la categoría B es la que genera mayor cantidad de emisiones de forma considerable con un total de 29802.60 toneladas, en segundo lugar, tenemos a la categoría G con un total de 11125 toneladas, seguidas de las categorías C, E, A, F con emisiones de 5307.45, 4573.29, 4170.27 y 3532.48 toneladas respectivamente en ese orden, por último tenemos a la categoría D con 1324.72 toneladas de CO₂.

Emisiones de CO

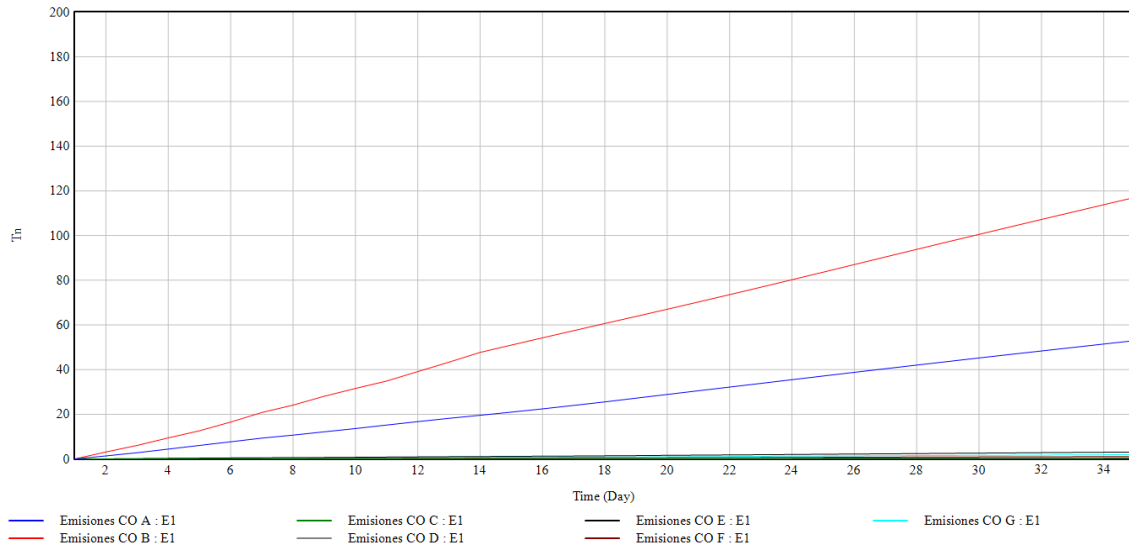


Figura 9 Emisiones de CO por categorías vehiculares.

La figura 7 muestra gráficamente las emisiones generadas de CO acumuladas para los 35 días de análisis, se observa que la categoría B es la que genera mayor cantidad de emisiones con un total de 117.1 toneladas y la categoría A ocupa el segundo lugar con 53 toneladas, en cuanto a las C, D, E, F y G estas 5 categorías generan emisiones menores entre 3 a 0.5 toneladas.

Emisiones de HCT

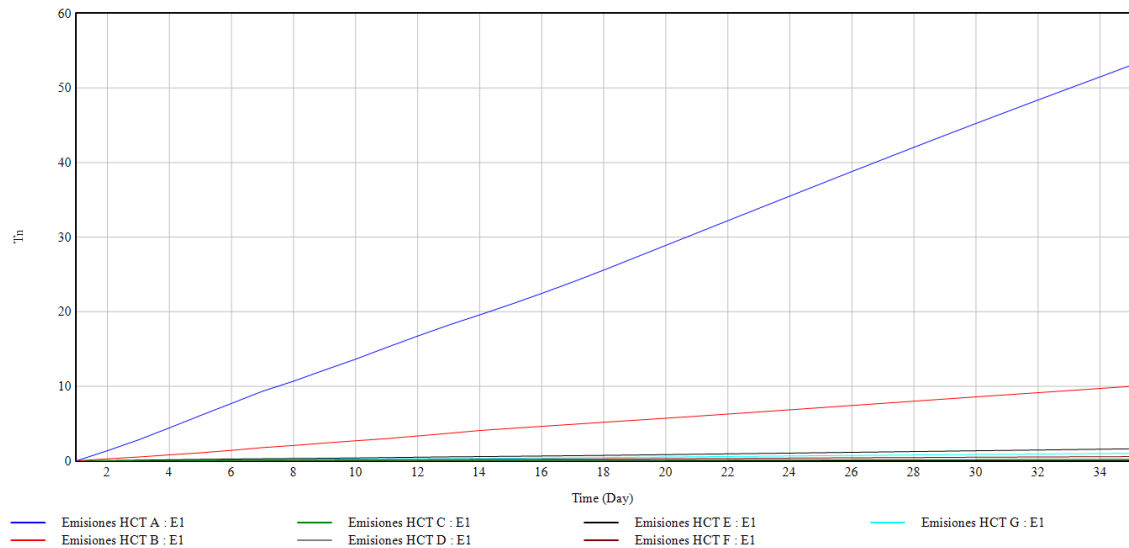


Figura 10 Emisiones de HCT por categorías vehiculares.

La figura 8 muestra gráficamente las emisiones generadas de HCT acumuladas para los 35 días de análisis, se observa que la categoría A es la que genera mayor cantidad de emisiones con un total de 53.04 toneladas y la categoría B ocupa el segundo lugar con 9.99 toneladas, en cuanto a las C, D, E, F y G estas 5 categorías generan emisiones por debajo de las 1.6 toneladas.

Emisiones de NO_x

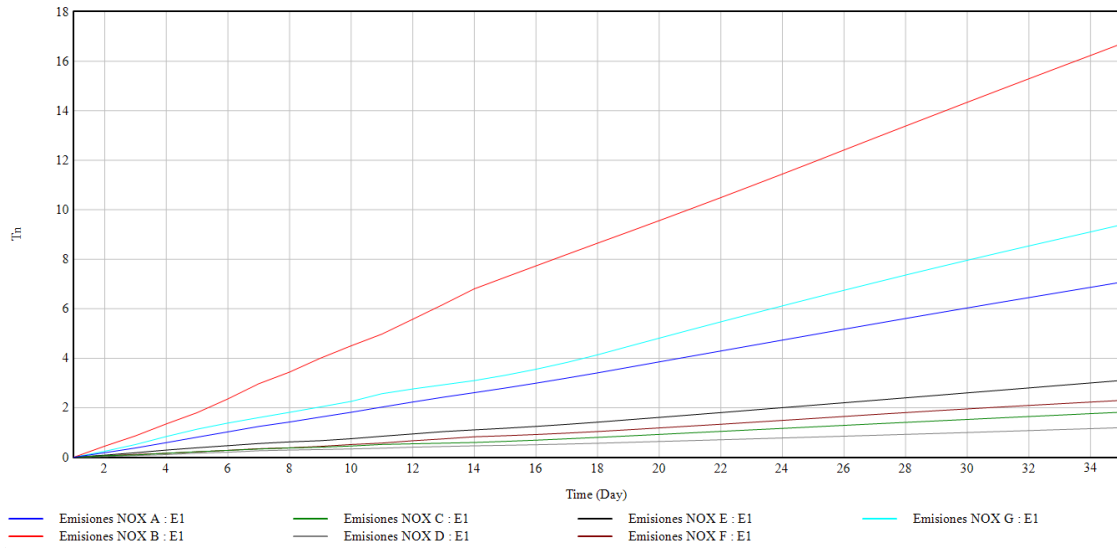


Figura 11 Emisiones de NO_x por categorías vehiculares.

La figura 9 muestra gráficamente las emisiones generadas de NO_x acumuladas para los 35 días de análisis, se observa que la categoría A es la que genera mayor cantidad de emisiones con un total de 16.7 toneladas, en segundo lugar, tenemos a la categoría G con un total de 9.38 toneladas, en tercer lugar, a la categoría A con un total de 7.07 toneladas, seguidas de las categorías E, F, C y D con emisiones de 3.10, 2.29, 1.82 y 1.19 toneladas NO_x respectivamente.

Emisiones de PM₁₀

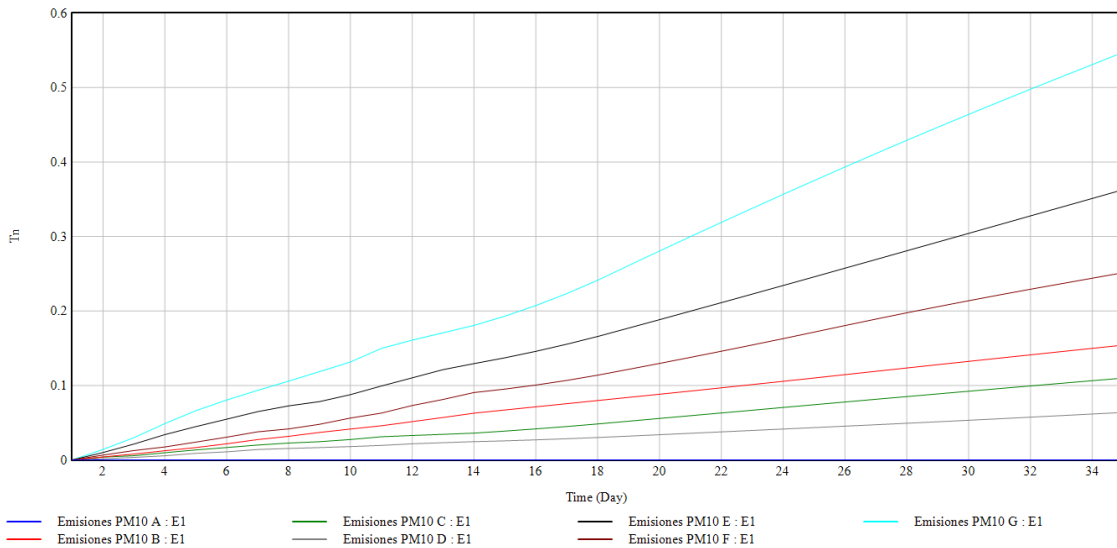


Figura 12 Emisiones de PM₁₀ por categorías vehiculares.

La figura 10 muestra gráficamente las emisiones generadas de PM₁₀ acumuladas para los 35 días de análisis, se observa para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO₂ y CO principalmente, la categoría G es la que genera mayor cantidad de PM₁₀ con un total de 0.54 toneladas seguido de las categorías E, F, B, C, D con valores menores a 0.36, 0.25, 0.15, 0.10 y 0.06 toneladas respectivamente,

la categoría A no tiene emisiones generadas, ya que para el cálculo de la estimación el factor de emisión correspondiente a esta categoría asume que no genera material particulado en el proceso de combustión.

Emisiones de CH₄

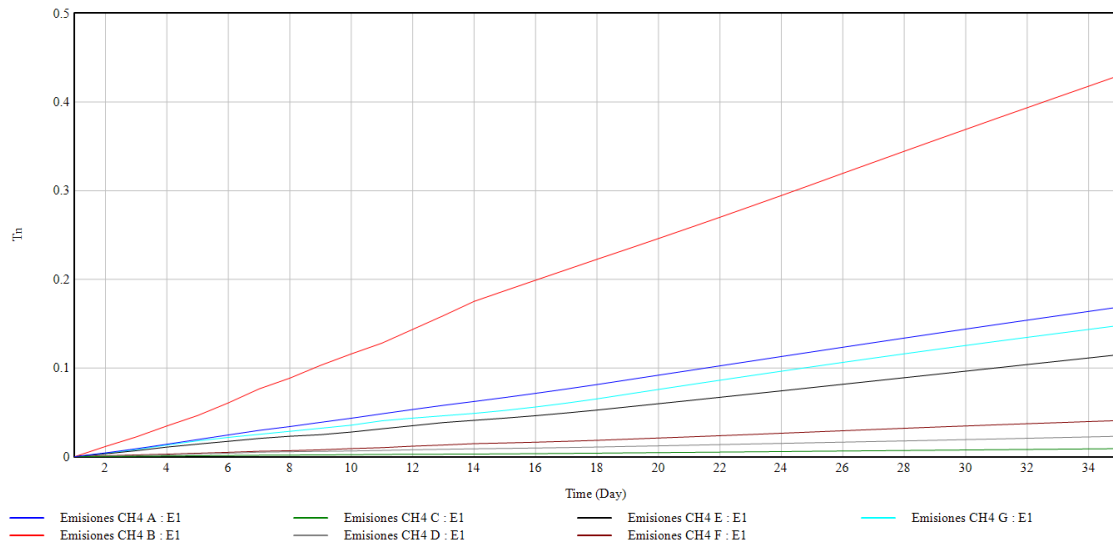


Figura 13 Emisiones de CH₄ por categorías vehiculares.

La figura 11 muestra gráficamente las emisiones generadas de CH₄ acumuladas para los 35 días de análisis, se observa al igual que las emisiones de PM₁₀, para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO₂ y CO principalmente, la categoría B es la que genera mayor cantidad de CH₄ con un total de 0.42 toneladas seguido de las categorías A, G y E con valores de 0.16, 0.14 y 0.11 toneladas respectivamente, siguiendo a estas tenemos por ultimo a las categorías F, D y C con valores de 0.04, 0.02 y 0.01 toneladas.

Emisiones de SO₂

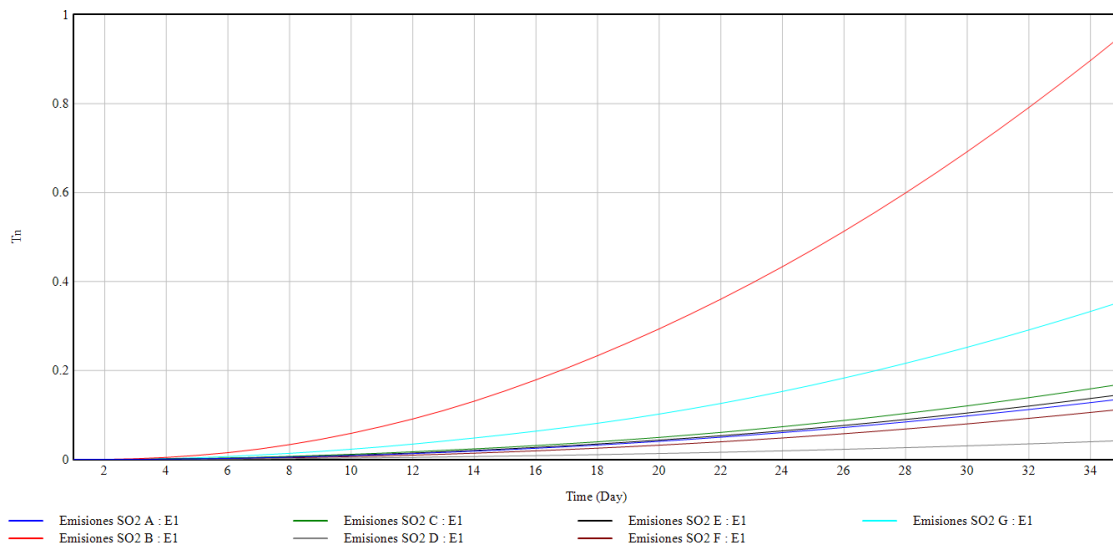


Figura 14 Emisiones de SO₂ por categorías vehiculares.

La figura 12 muestra gráficamente las emisiones generadas de SO₂ acumuladas para los 35 días de análisis, se observa al igual que las emisiones de PM₁₀ y CH₄, para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO₂ y CO principalmente, la categoría B es la que genera mayor cantidad de SO₂ con un total de 0.95, en segundo lugar tenemos a la categoría G con un total de 0.35 toneladas, seguido de las categorías C, E, A y F con valores de 0.16, 0.14, 0.13 y 0.11 toneladas respectivamente, y por último la categoría D con un total de 0.04 toneladas.

Emisiones de N₂O

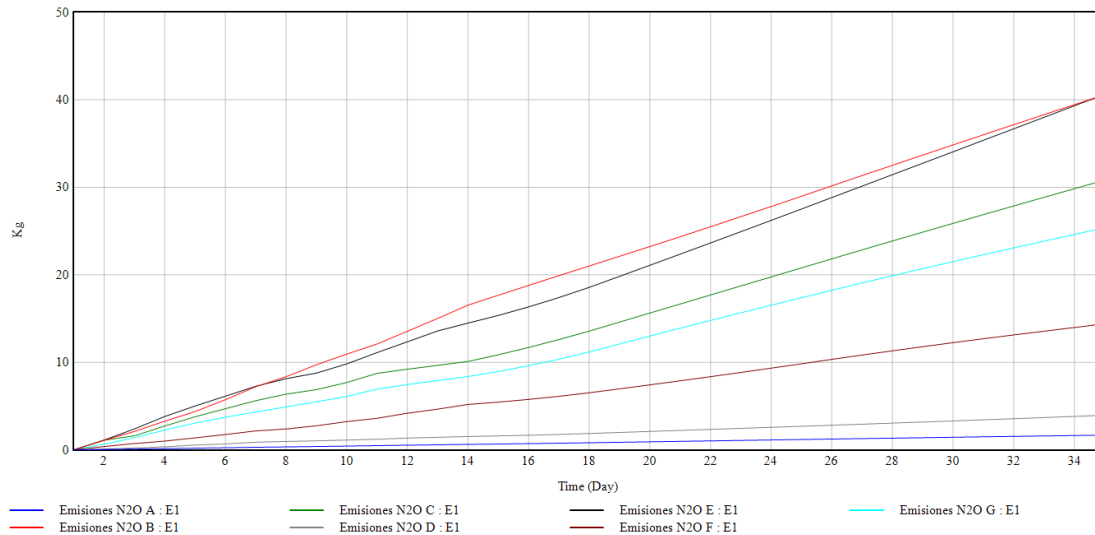


Figura 15 Emisiones de N₂O por categorías vehiculares.

La figura 13 muestra gráficamente las emisiones generadas de N₂O acumuladas para los 35 días de análisis, se observa al igual que las emisiones de PM₁₀, CH₄ y SO₂ para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO₂ y CO principalmente, las categorías E y B generan emisiones acumuladas muy similares con 40.6 y 40.5 kilogramos respectivamente, seguidas de las categorías C, G y F con valores de 30.8, 25.3 y 14.4 kilogramos respectivamente, por ultimo retomamos a las categorías D y A con 3.9 y 1.6 kilogramos respectivamente.

Emisiones de NH₃

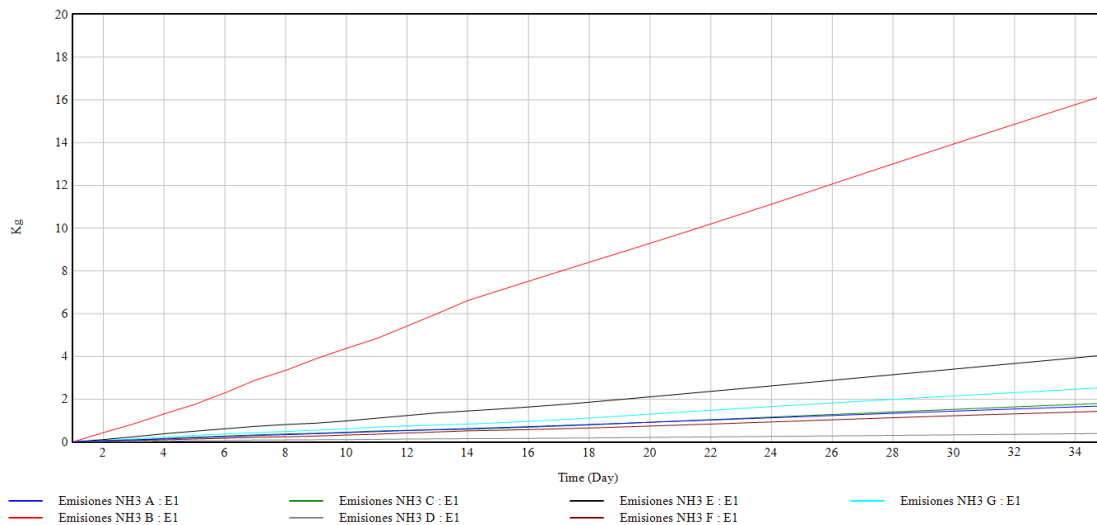


Figura 16 Emisiones de NH₃ por categorías vehiculares.

La figura 14 muestra gráficamente las emisiones generadas de NH₃ acumuladas para los 35 días de análisis, se observa al igual que las emisiones de PM₁₀, CH₄, SO₂ y N₂O para todas las categorías vehiculares que las masas de emisiones generadas son mínimas en comparación del CO₂ y CO principalmente, la categoría B es la que genera mayor cantidad de NH₃ con un total de 16.2 kilogramos, en segundo lugar tenemos a la categoría E con un total de 4.0 kilogramos, seguido de las categorías G, C, A y F con valores de 2.5, 1.8, 1.6 y 1.4 kilogramos respectivamente, por último tenemos a la categoría D con 0.3 kilogramos.

Como se observa en las figuras generadas por el modelo las emisiones en caliente tienden a tener un comportamiento creciente y acumulativo debido a que los vehículos no cuentan con tecnologías de control de emisiones y no existe planes de gestión eficiente en la reducción de estas a mediano o largo plazo, la emisión con mayor masa emitida a la atmosfera por los vehículos contabilizados es el CO₂ donde las categorías B y G generaron los mayores valores con 29802.6 y 11125 toneladas, para el CO la categoría que emitió mayor cantidad fue la B y A con un total de 117.1 y 53 toneladas, para los HCT las categorías A y B con 53.04 y 9.99 toneladas, estos tres grupos de emisiones son las que representan las mayores emisiones, en cuantos a los siguientes contaminantes son emisiones menores, para el NO_x las emisiones mayores fueron generadas por las categorías A y G con 16.7 y 9.38 toneladas, para el PM₁₀ las mayor emisión la genero la categoría G con 0.54 toneladas, para el CH₄ la categoría B con 0.42 toneladas, para el SO₂ la categoría B con 0.95 toneladas, para el N₂O las categorías E y B con 40.6 y 40.5 kilogramos respectivamente, y por último para el NH₃ la categoría B con un total de 16.2 kilogramos.

Tabla 6

Emisiones Vehiculares Totales según el tipo de Agente Contaminante en Toneladas.

CATEGORIAS	CO ₂	CO	HCT	NO _x	PM ₁₀	CH ₄	SO ₂	N ₂ O	NH ₃
A	4170.27	53.00	53.04	7.07	-	0.16	0.13	0.0016	0.0016
B	29802.60	117.10	9.99	16.70	0.15	0.42	0.95	0.0405	0.0162
C	5307.45	0.58	0.20	1.82	0.10	0.01	0.16	0.0308	0.0018
D	1324.72	0.29	0.16	1.19	0.06	0.02	0.04	0.0039	0.0003
E	4573.29	3.12	1.61	3.10	0.36	0.11	0.14	0.0406	0.0040
F	3532.48	1.10	0.57	2.29	0.25	0.04	0.11	0.0144	0.0014
G	11125.00	1.95	1.00	9.38	0.54	0.14	0.35	0.0253	0.0025
TOTAL	632982.00	177.14	66.57	41.55	1.46	0.90	1.88	0.1571	0.0278

Fuente: Elaborado por el autor de la investigación

La tabla 6 muestra el resumen de las emisiones totales de cada agente contaminante generadas por cada categoría vehicular, se observa diferentes masas de emisiones con respecto a los diferentes contaminantes, podemos agruparlos en tres tipos, emisiones mayores, medias y mínimas, con respecto al CO₂ es el agente contaminante con mayor emisión considerable con un total de 632982 toneladas, las emisiones medias las conforman el CO, HCT y NO_x con 174.14, 66.57 y 41.55 toneladas respectivamente, las emisiones menores corresponden al PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃ los cuales generaron 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 y 0.02 toneladas respectivamente.

4. Discusión

Hilario (2017), en su estudio de investigación estimó también la cantidad de emisiones vehiculares en el distrito de Huancayo para el año 2016, con esta investigación determinó que el dióxido de carbono (CO₂), es el contaminante que se emite en mayor cantidad, con un resultado de 255 047,4 Tm/año, el segundo contaminante que se emite en mayor cantidad es el monóxido de carbono (CO) con una cantidad de 36 348,4 Tm/año, seguido del metano CH₄ con 770.2 Tm/año y por último y en menor cantidad se obtuvo de los óxidos nitrosos (N₂O) con 7.3 Tm/año, los resultados mencionados corresponden a la categoría de autos particulares; en la presente investigación realizada, se obtuvo que el agente contaminante se emite en mayor cantidad es el CO₂ con un total de 11125 Tn/día, el CO es el contaminante con mayor cantidad emitido con un total de 117.1 Tn/día, el CH₄ es el sexto contaminante mayor emitido con una cantidad de 0.42 Tn/día, y el N₂O se emite con un total de 40.6 kg/día, en su mayoría los contaminante son emitidos por la categoría B, que corresponde a los vehículos livianos que corresponde a los taxis autos de 4 pasajeros y menores de 10 pasajeros. Ambas investigaciones muestran a la categoría B que corresponde a los autos particulares (menores de 10 pasajeros), son lo que tienen una mayor cantidad de emisiones, siendo el CO₂ es el agente contaminante con mayor presencia en el ambiente.

En Honduras, Fletes (2016), estimó las emisiones vehiculares, donde el Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), Material Particulado (PM₁₀) y Dióxido de Carbono (CO₂), en la ciudad de Tegucigalpa, el año 2015, demostraron que el contaminante con mayor cantidad es el CO₂ y el de menos cantidad es el SO_x, utilizando la gasolina y el diésel como combustibles principales, los resultados podían variar de acuerdo al tramo de estudio por donde transiten los vehículos y el año de antigüedad de los vehículos, a comparación del estudio realizado, se tiene en común al agente que se emite en mayor cantidad al CO₂, y el agente que se emite en menor cantidad es el NH₃ es de 16.2 kg/día.

Dawidowski, Sánchez, & Alarcón (2014), realizaron una investigación acerca de la estimación de emisiones vehiculares en ciudad de Lima Metropolitana, tomando como referencia a los inventarios de emisiones, estimaron los agentes provenientes del parque automotor, dividiéndolos en categorías vehiculares como autos, taxis, buses, camiones y mototaxis, asimismo las emisiones correspondían al consumo según el tipo de combustible. Los agentes contaminantes estimados fueron CO₂, CO, NO_x, SO₂, NO_x, encontrando al CO₂ en mayor cantidad, seguidos por los demás agentes contaminados mencionados en ese mismo orden. Esta investigación tiene mucha semejanza al trabajo realizado, ya que ambas investigaciones demuestran que el CO₂ es el agente que se encuentra en mayor cantidad, seguido del CO, NO_x, SO₂ y PM₁₀, cabe señalar que los resultados obtenidos por los autores anteriormente mencionados, son por año y la investigación presente fue por un periodo de 35 días, sin embargo, sea que el flujo vehicular aumente o disminuya, los agentes contaminantes lo harán de la misma forma.

(Giraldo Cerna, 2011), en su proyecto de investigación llegó a caracterizar emisiones atmosféricas provenientes del parque automotor que transitaban cerca de la Universidad Autónoma de Occidente de Cali, tomando como parámetros 4 principales agentes contaminantes, donde se obtuvo como resultados para el Óxido de Nitrógeno (NO_x) un total de 139543.74 gr/día, para el Monóxido de Carbono (CO) una cantidad de 577230.67 gr/día, para los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) 136655.23 gr/día, y para Material Particulado (PM₁₀), en menor cantidad con un total de 8510.15 gr/día.

5. Conclusiones

Se desarrolló un modelo dinámico de sistemas con el software VENSIM PLE 8.2.1, que explica la realidad estudiada y estimó las emisiones liberadas a la atmosfera generadas por el flujo vehicular que circula en la Carretera Central en horas diurnas de 6:00 a 18:00 horas durante un periodo de 35 días continuos, en una sección de 16.5 Km de extensión, en el cual se ingresaron datos de entrada relacionados al nivel de actividad vehicular, como el número de vehículos que circulan en ruta los cuales se clasificaron en siete categorías, se estableció la velocidad promedio de los vehículos en 55 Km/h, los factores de emisión en función de la velocidad fueron tomados de la guía de inventario de emisiones EMEP/EEA 2019 para fuentes móviles tomando en cuenta los agentes contaminantes CO₂, CO, HCT, NO_x, PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃.

Se contabilizaron en total 853670 unidades vehiculares distribuidas en siete categorías A, B, C, D, E, F y G, siendo la categoría B correspondiente a vehículos livianos de cuatro pasajeros la categoría con mayor número de vehículos registrados en ruta, representando un 59.18 % del total de unidades. El modelo estimo como principal agente gaseoso que se emite a la atmosfera al CO₂ con un total de 632982 toneladas liberadas, tres agentes presentan emisiones medias CO, HCT y NO_x con 174.14, 66.57 y 41.55 toneladas respectivamente, las emisiones menores corresponden al PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃ los cuales generaron 1.46, 0.9, 1.88, 0.15 y 0.02 toneladas respectivamente.

En cuanto a las categorías vehiculares, la categoría B correspondiente a Vehículos livianos de cuatro pasajeros es la que emite mayor cantidad de emisiones de CO₂, CO y HCT, la categoría G Camiones pesados mayores a 16 toneladas y la categoría A Motocicletas suman también a estas emisiones, aunque en menor medida, en cuanto a las emisiones NO_x las categorías A Motocicletas y G Camiones pesados mayores a 16 toneladas, son las que generan las mayores emisiones de este agente contaminante, las categorías B Vehículos livianos de cuatro pasajeros, la categoría E Camiones livianos menores 7.5 toneladas y Coaster, y la categoría G Camiones pesados mayores a 16 toneladas son las categorías que generan mayor cantidad de emisiones de PM₁₀, CH₄, SO₂, N₂O y NH₃.

6. Recomendaciones

Luego del desarrollo del modelo dinámico, observar los resultados y obtener las conclusiones, los autores recomiendan realizar más estudios respecto a las emisiones generadas por fuentes móviles, debido a que son muy dinámicas, considerar nuevas variables en los modelos, como variaciones en la velocidad según sea el tipo de vehículo, nuevas clasificaciones vehiculares, políticas de control de emisiones en vehículos a largo y mediano plazo, planes de gestión y renovación vehicular, dispositivos de control de emisiones, entre otros, con la finalidad de generar modelos que representen mejor la dinámica de las emisiones generadas por los motores de combustión interna de los vehículos, no solo en esta importante vía de conexión con el interior del Perú, sino en otras vías importantes del país.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen en primer lugar a Dios, a nuestro Padres, a los estudiantes de la Universidad Peruana Unión por la participación en la etapa del conteo de vehículos en la Carretera Central, así como también a los Ingenieros Dario Ccaccya Ccaccya por su orientación durante el desarrollo del modelo y Hugo Fernández por el asesoramiento en el proceso de titulación, así como a las autoridades administrativas y profesores de la casa de estudios mencionada.

8. Referencias

- Dawidowski, L., Sánchez, O., & Alarcón, N. (2014). Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana. *Magazine Article*, 1–46. Recuperado a partir de <http://www.senamhi.gob.pe>
- EMEP/EEA. (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Retrieved April 25, 2021, from European Environment Agency website: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Fletes, W. M. (2016). ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES VEHICULARES EN LA CIUDAD DE TEGUCIGALPA, HONDURAS.
- Franco, C., Méndez, G., & Espitia, J. (2015). Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá D.C. mediante Dinámica de Sistemas. *Ingeniería*, 20(2), 209–231. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2015000200004&lang=pt
- GEOPERÚ. (2016). Estado de la situación y gestión ambiental en Perú. SINIA. Recuperado 26 de abril de 2021, de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/geo-peru-2002-2004-informe-nacional-estado-ambiente>
- Giraldo Serna, K. J. (2011). Caracterización y estimación de emisiones vehiculares en la universidad autónoma de occidente (Universidad Autónoma De Occidente). Recuperado de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/5372/TID00974.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gobierno de Colombia. (2017). Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas (M. Gaitán Varón & P. A. Cárdenas Ruiz, Eds.). https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf
- Gobierno de Chile. (2009). Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
- Grupo de estudio técnico ambiental. (2004). Plan Integral de Saneamiento Atmosférico Lima– Callao. L-C, 16.
- Herrera, J., Rodríguez, S., & Rojas, J. (2012). Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 25(1), 54–63. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i1.176>

- Hilario, N. (2017). Emisiones Contaminantes De Vehículos Del Distrito De Huancayo. *Universidad Nacional del Centro de Perú*, 165.
- Iglesias, S., & Gonzales, M. (2018). Situación de la contaminación atmosférica en Lima metropolitana y Callao (Trabajo de grado). Repositorio Institucional UNFV, pp. 1–11. Retrieved from <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2629>
- INEI. (2020). La población de Lima supera los nueve millones y medio de habitantes. Lima. Retrieved from <http://m.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/noticias/notadeprensa006.pdf>
- INEI. (octubre de 2017). Instituto Nacional de Estadística e Informática. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística e Informática: <http://censo2017.inei.gov.pe/>
- Lira, G. (1999). Impacto Ambiental del Parque Automotor. *Hidráulica y termofluidos*, 1(1), 3-4.
- Mercado, D., Sepúlveda, J., Pedraza, L., & Hernández, H. (2014). MODELO DE IMPLEMENTACIÓN DE TIC EN EL SECTOR TRANSPORTE DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA UTILIZANDO DINÁMICA DE SISTEMAS, 36–45.
- Ministerio del Ambiente. (10 de mayo del 2018). Gobierno publica índices de nocividad de combustibles y elabora ranking de los más dañinos para la salud y el ambiente. <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/gobiernopublica-indices-de-nocividad-de-combustibles-y-elabora-ranking-de-los-mas-daninos-para-la-salud-y-el-ambiente/>
- Municipalidad de Lima. (2019). Diagnóstico de la gestión de la calidad ambiental del aire de Lima y Callao. Lima. <http://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/665a5c2ecf45d262.pdf>
- Pasci Valdivia, S. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado pm10 y pm 2.5 en Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, 77(2), 273–283. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21704/ac.v77i2.699>
- Rojas, F. (2017). Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana. (Trabajo de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina). <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3809/rojas-chavez-freddy-jesus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Romero, M., Olite, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 1–15.
- Sánchez Vela, L. G., Fabela Gallegos, M. de J., Flores Centeno, O., Hernández Jiménez, J. R., Vázquez Vega, D., & Cruz Acevedo, M. E. (2019). Revisión de la Normativa Internacional sobre Límites de Emisiones Contaminantes de Vehículos de Carretera. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt562.pdf>
- SENAMHI. (2014). Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana. In Magazine Article. <http://www.senamhi.gob.pe>