



Comparación de emisiones de gases de escape de un vehículo con motor de combustión interna en alta y baja congestión para una ciudad de altura

Comparison of exhaust gas emissions from a vehicle with an internal combustion engine in high and low congestion for a high-altitude city

Comparação das emissões de gases de escape de um veículo com motor de combustão interna em alto e baixo congestionamento para uma cidade de grande altitude

Jorge Luis Lema Loja ^I

jorgel.lema@ute.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1515-4526>

Alex Rodolfo Guzman Antamba ^{II}

alex.guzman@ute.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7842-0302>

Correspondencia: jorgel.lema@ute.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 30 de septiembre de 2023 * **Aceptado:** 25 de octubre de 2023 * **Publicado:** 13 de noviembre de 2023

- I. Ingeniero en Mecánica Automotriz, Magíster en Sistemas Automotrices, Docente investigador, Universidad UTE, Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Quito, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico, Magíster en Sistemas Automotrices. Docente investigador, Universidad UTE, Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Quito, Ecuador.

Resumen

La contaminación generada por el sector automotriz, es uno de los mayores problemas que enfrenta la ciudad de Quito. Esto se debe a que la mayoría de vehículos del parque automotor, utilizan combustibles fósiles como fuente de energía de propulsión. Además, la heterogeneidad de las tecnologías de los sistemas de inyección de combustible, hace que el control de emisiones contaminantes se limite considerablemente. Por otro lado, debido al elevado número de vehículos y a las características topográficas de la ciudad, se genera una elevada congestión vehicular en horas pico, produciendo cambios abruptos de aceleraciones y reducción de las mezclas estequiométricas. Con base a lo expuesto, fue pertinente comparar las emisiones de gases de escape que se producen en alta y baja congestión vehicular para un vehículo con motor de combustión interna, y así mismo, se determinó las correlaciones de los gases para ambos escenarios. Para ello, se midió las emisiones en un vehículo Mazda 3 sobre una ruta importante de la ciudad en horas pico y fines de semana. Se utilizó un analizador de gases Kane Autoplus para la medición de los gases de escape, y el registro de datos se efectuó en la aplicación Kane Live. Los resultados mostraron que en horas pico, el vehículo emite mayores cantidades de CO₂, CO, HC de hasta el 0,77%; 6,66%; 94,69%, respectivamente. Existen moderadas y fuertes correlaciones de O₂-CO₂ y CO-HC en alta y baja congestión vehicular.

Palabras Clave: Contaminación; Gases de escape; Horas pico; Motor de combustión interna; Ruta; Tráfico.

Abstract

Pollution generated by the automotive sector is one of the biggest problems facing the city of Quito. This is because the majority of vehicles in the vehicle fleet use fossil fuels as a source of propulsion energy. Furthermore, the heterogeneity of fuel injection system technologies means that the control of polluting emissions is considerably limited. On the other hand, due to the high number of vehicles and the topographic characteristics of the city, high traffic congestion is generated during peak hours, producing abrupt changes in acceleration and reduction of stoichiometric mixtures. Based on the above, it was pertinent to compare the exhaust gas emissions that occur in high and low vehicle congestion for a vehicle with an internal combustion engine, and likewise, the correlations of the gases for both scenarios were determined. To do this, emissions were measured in a Mazda 3 vehicle on a major city route during peak hours and on weekends. A Kane Autoplus

gas analyzer was used to measure exhaust gases, and data was recorded in the Kane Live application. The results showed that during peak hours, the vehicle emits greater amounts of CO₂, CO, HC of up to 0.77%; 6.66%; 94.69%, respectively. There are moderate and strong correlations of O₂-CO₂ and CO-HC in high and low vehicle congestion.

Keywords: Pollution; Exhaust gases; Rush hours; Internal combustion engine; Route; Traffic.

Resumo

A poluição gerada pelo setor automotivo é um dos maiores problemas que a cidade de Quito enfrenta. Isso ocorre porque a maioria dos veículos da frota utiliza combustíveis fósseis como fonte de energia de propulsão. Além disso, a heterogeneidade das tecnologias dos sistemas de injeção de combustível significa que o controle das emissões poluentes é consideravelmente limitado. Por outro lado, devido ao elevado número de veículos e às características topográficas da cidade, são gerados elevados congestionamentos de tráfego nos horários de pico, produzindo mudanças abruptas na aceleração e redução das misturas estequiométricas. Com base no exposto, foi pertinente comparar as emissões de gases de escape que ocorrem em alto e baixo congestionamento veicular para um veículo com motor de combustão interna e, da mesma forma, foram determinadas as correlações dos gases para ambos os cenários. Para tal, as emissões foram medidas num veículo Mazda 3 numa rota de uma grande cidade durante as horas de ponta e aos fins-de-semana. Um analisador de gases Kane Autoplus foi utilizado para medir os gases de escape e os dados foram registrados no aplicativo Kane Live. Os resultados mostraram que nos horários de pico o veículo emite maiores quantidades de CO₂, CO, HC de até 0,77%; 6,66%; 94,69%, respectivamente. Existem correlações moderadas e fortes de O₂-CO₂ e CO-HC em altos e baixos congestionamentos de veículos.

Palavras-chave: Poluição; Gases de escape; Horas de ponta; Motor de combustão interna; Rota; Tráfego.

Introducción

La contaminación ambiental en el sector urbano es uno de los mayores problemas sociales a nivel mundial, la cual provoca graves daños a la salud humana (Brancato et al., 2018) (Lopez-Arboleda, Sarmiento, & Cardenas, 2020; Esposito et al., 2014; Goldizen, Sly, & Knibbs, 2016). De hecho, algunos estudios han demostrado una fuerte incidencia entre la contaminación urbana con las

afecciones respiratorias (Bai et al., 2018), y ser la causante de millones de muertes prematuras al año. El problema surge por los niveles elevados de carboxihemoglobina en la sangre por motivo a la exposición del monóxido de carbono (CO) (Estrella et al., 2005).

Las fuentes de contaminación más importantes corresponden al sector industrial y del transporte. El sector del transporte produce aproximadamente el 20% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (Santos, 2017), lo que significa que es un emisor importante de gases de efecto invernadero (GEI) (Habich-Sobiegalla, Kostka, & Anzinger, 2018). Por lo tanto, el transporte terrestre, al emitir tantos gases tóxicos como GEI, la convierte en la principal causa de daño ambiental (Faulin, Grasman, Juan, & Hirsch, 2019; Jicha & Pospisil, 2017). El hecho de que el sector del transporte sea la principal fuente de contaminación, se debe a que la mayoría de vehículos terrestres utilizan combustibles fósiles como energía principal de propulsión, generando la emisión de CO₂, CO, hidrocarburos no combustionados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM). La constante industrialización y urbanización de los países (Fu & Chen, 2017), han provocado un incremento en el volumen de vehículos (Seuwou, Banissi, & Ubakanma, 2020; Jia, Yan, & Shen, 2018). Además, la escasa mejoría en los rendimientos de los combustibles y el bajo desarrollo del transporte público, agravan esta realidad. A decir verdad, el sector del transporte es el único sector que se prevé que continúe creciendo en el futuro (Iankov, Taylor, & Scafton, 2017) debido al crecimiento económico y demográfico (Huang et al., 2018). Esta problemática actual, ha conllevado a que la sociedad considere importante el desarrollo e implementación de estrategias para la reducción de emisiones de gases contaminantes (Lee et al., 2018).

En la actualidad la industria automotriz y la comunidad científica, han fabricado nuevos sistemas tecnológicos de post tratamiento de gases de escape que permiten mitigar el impacto negativo de las emisiones de gases contaminantes, como, por ejemplo: sistemas EGR, catalizadores de tres vías, sistemas SCR, filtro de partículas (Kozina, Radica, & Nižetić, 2020). Con respecto a la inteligencia artificial, se han desarrollado nuevos sistemas de redes de comunicación global como VANET (Mejdoubi, Zytoune, Fouchal, & Ouadou, 2020), la cual permite una conducción más eficiente y reduce la congestión vehicular mediante la comunicación entre vehículos e infraestructura urbana. En VANET, es imprescindible la medición constante de distintos parámetros tales como: atmosféricos, tráfico y posicionamiento espacial del vehículo. Sin embargo, en muchos países y en especial aquellos que se encuentran en vías de desarrollo como es el caso de Ecuador,

lamentablemente la aplicación de VANET es restringida debido a la tecnología deficiente de los vehículos y a la ausencia de sensores e infraestructura de comunicación en las ciudades.

Si bien, un gran número de vehículos del parque automotor de la ciudad si poseen sistemas de post tratamiento de gases, por la propia naturaleza del funcionamiento de los motores de combustión interna, existen etapas que hacen inevitables una mayor emisión de gases contaminantes como es el caso del arranque en frío y los cambios bruscos de aceleración. Incluso, las pruebas en bancos dinamométricos que se efectúan en los vehículos previo a la certificación de los límites de emisiones, no simulan las condiciones reales de movilidad vehicular debido a aspectos topográficos, condiciones climáticas, uso de aire acondicionado, estilo de conducción, altitud y congestión vehicular (Ramos, Muñoz, Andrés, & Armas, 2018). En la investigación efectuada en (Fontaras, Zacharof, & Ciuffo, 2017), se estimó que existe hasta un 40% más de emisiones de CO₂ durante la conducción en el mundo real comparado con los resultados de las pruebas de certificación. Con respecto a la congestión vehicular, existe un mayor número de aceleraciones y desaceleraciones de los vehículos producidas por las frecuentes detenciones y arranques (Choudhary & Gokhale, 2016), durante el tráfico en las zonas urbanas. La alta congestión del transporte terrestre se encuentra en las horas pico, produciendo un alto flujo vehicular. En cambio, la baja congestión se reduce en las primeras horas de los fines de semana y feriados, produciendo un bajo flujo vehicular.

Por otro lado, el nivel de la congestión vehicular tiende a empeorar por las irregulares de la topografía de las ciudades, como, por ejemplo, la ciudad de Quito. La ciudad se encuentra sobre las faldas del volcán Pichincha en la Cordillera de los Andes y está asentada a una altura promedio de 2 850 msnm, lo que la convierte en una ciudad con muchas pendientes y de crecimiento urbano desordenado. Por encontrarse Quito sobre la hoya de Guayllabamba, en la ciudad se presentan inversiones de temperatura lo que se reduce la mezcla de masas de aire de forma vertical. Las inversiones pueden producir un aumento de la contaminación ambiental (Brachtel et al., 2009). Adicionalmente, la extensión de la ciudad desde el norte al sur es de aproximadamente 50 km, mientras que la extensión de este a oeste es de 8 km. Esto provoca que el desplazamiento de las personas de norte a sur y viceversa se vea limitada por un número pequeño de avenidas angostas, lo que implica que estas vías sean imprescindibles y la disminución de la congestión vehicular se vea limitada. Como forma de mitigación de la congestión vehicular, las autoridades municipales han implementado el sistema Pico y Placa lo que significa que dentro del rango de horario de

06h00-09h30 y 16h00-20h00, no pueden circular determinados vehículos. La imposibilidad de la circulación de este conjunto de vehículos, se basa a una calendarización regida en función del último dígito de su placa, permitiendo la reducción del número de vehículos en la ciudad durante esos rangos de tiempo.

En el Ecuador, y por ende en la ciudad de Quito, existe una carencia de políticas que controlen los estándares de emisiones de gases contaminantes, lo que permite aún el uso de sistemas de inyección de combustible antiguos de diésel y gasolina. En este contexto, en el año 2003, la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (Corpaire) informó que solamente el 45% de los vehículos que circulaban por la ciudad de Quito, contaban con convertidores catalíticos. Si bien ha pasado un largo periodo desde ese último dato informativo, es importante reconocer que, para ese tiempo, ya existían a nivel mundial vehículos con ese sistema anticontaminante. Y lo más importante, es que en la actualidad todavía continúan circulando vehículos con estas carencias de sistemas post tratamiento de gases, aunque en menor medida. Este aspecto corrobora con la afirmación de que alrededor del 98% de los países con ingresos bajos y medianos, no cumplen con las recomendaciones para la calidad del aire, propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En cambio, en los países desarrollados, está existiendo una disminución de la contaminación por las estrictas regulaciones ambientales. Además, el Sistema Pico y Placa ha provocado el incremento de la flota de vehículos particulares, con lo cual, el nivel de la congestión vehicular y de emisiones de gases contaminantes, siguen manteniéndose elevados. En conclusiones, el uso de combustibles fósiles como el diésel y la gasolina, la presencia de vehículos con sistemas de inyección de combustibles heterogéneos, el elevado número de vehículos en el parque automotor, la ausencia de sistemas inteligentes para la mitigación de la congestión vehicular, la falta de políticas de regulación ambiental y la presencia de las elevaciones montañosas e irregularidades de la superficie, convierten a Quito en la ciudad más contaminante a nivel nacional. De hecho, la calidad del aire en Quito ha empeorado desde el año 1970 (Brachtl et al., 2009).

Con base a lo mencionado es indispensable la cuantificación de las emisiones, y para ello, se pueden utilizar tanto métodos indirectos como métodos directos. Los métodos indirectos consisten en modelos computacionales y estadísticos, y utilizan información acerca de los parámetros de movimiento y tecnología del vehículo, sin embargo, no se considera la información referente a las condiciones de conducción. Entre estos tipos de modelos se pueden nombrar a IVE, MOBILE,

COPERT (Kan, Tang, Kwan, & Zhang, 2018). Los métodos directos pueden clasificarse en pruebas en laboratorio y pruebas en rutas. Las pruebas en laboratorio se caracterizan por utilizar analizadores de gases para la recolección constante de datos de emisiones de gases de escape, mientras que un banco dinamométrico simula ciclos de conducción estables o transitorios sobre el vehículo. Estos últimos, se ajustan más a un ciclo real debido a la simulación del peso inercial del vehículo. Entre los ciclos transitorios se tienen: FTP 45, IM240, ARTEMIS. Los ciclos estables, por su parte, mantienen segmentos más prolongados de velocidad constante durante la prueba, por lo que no es necesario la simulación del peso inercial. Aunque estos métodos directos podrían proporcionar una aproximación más exacta de las emisiones de gases contaminantes por la variación continua de velocidad durante el ciclo, no siempre representarán en su totalidad las condiciones reales de una ciudad, debido a la variación de los factores antes mencionados como los ambientales, topográficos, tráfico y estilo de conducción.

Las pruebas en rutas (on board), es un método directo que permite obtener los datos de emisiones y consumo de combustible durante la circulación del vehículo por las rutas de una ciudad, es decir, se considera los factores antes mencionados garantizando una buena confiabilidad de los resultados obtenidos. Sin embargo, es necesario la incorporación de equipos portátiles para la medición de emisiones de gases de escape en el vehículo, pero conllevaría a costos más elevados. A pesar de ello, este tipo de investigaciones pueden ser utilizados por la agencia nacional de tránsito e institutos de investigación, para evaluar los beneficios probables en la reducción de emisiones (Hallmark, Wang, & Sperry, 2013). En la actualidad existen pocos estudios enfocados en el análisis de emisiones de gases de escape en condiciones de alta y baja congestión vehicular. Los estudios que se relacionan con la presente investigación se describen a continuación.

En la investigación efectuada en (Zhang, Batterman, & Dion, 2011), se estimó las emisiones de gases contaminantes para vehículos livianos y pesados tanto en la congestión vehicular de las zonas de trabajo como en el flujo libre de tráfico. Los resultados mostraron que existe una mayor emisión de HC y NOx de alrededor del 1% a 7% y del 23% para CO, durante los periodos de transición de congestión vehicular a flujo libre de tráfico, comparado solamente con respecto al flujo libre de tráfico. En cambio, para el CO₂, existió mayores emisiones de este gas en la congestión vehicular de las zonas de trabajo de alrededor del 18% con respecto al flujo libre de tráfico, pero hubo una disminución de emisiones de HC, CO y NOx de alrededor del 48%; 68% y 37%, respectivamente. Para el caso de los vehículos pesados, se estimó un aumento de las emisiones de HC, CO, NOx y

CO₂ en el escenario de congestión vehicular de las zonas de trabajo con respecto al flujo libre de tráfico, en valores de alrededor del 158%; 90%; 28% y 65%, respectivamente. Sin embargo, en esta investigación se utilizaron datos de velocidad y aceleración que se generan durante el recorrido sobre una ruta en la ciudad de Ann Arbor, para la determinación de emisiones de gases contaminantes mediante la aplicación del Modelo Integral de Emisiones Modales (CMEM). La altura media de la ciudad estadounidense se encuentra alrededor de los 256 msnm. En la investigación efectuada en (Bharadwaj, Ballare, Rohit, & Chandel, 2017), se aplicaron métodos de consumo de combustible y kilometraje recorrido para concluir que la congestión vehicular puede generar un aumento del 53% de CO₂. En el estudio realizado en (Li et al., 2018), se tomaron muestras de PM en un túnel de la ciudad de Shanghai ubicada a 4 msnm durante un día laborable, y cuyos resultados determinaron que la mayor exposición de este material se genera en las horas pico con dos picos de concentración correspondientes al 14,6% y 20,3% de las concentraciones totales.

Existen pocas investigaciones que consideran a las emisiones de gases de escape en la ciudad de Quito y las cuales se resaltan a continuación. El estudio efectuado en (Milla et al., 2020) se determinó que las emisiones de CO y NO_x aumentan en condiciones normales de conducción con respecto al ecodriving en valores de 44,60% y 25,56% respectivamente, a excepción del HC cuyo valor excedió en 13,52%. En este estudio se aplicó el uso de un equipo analizador de gases portátil Global Axion R/S TM, durante el recorrido de un vehículo sobre una ruta de la ciudad. En la investigación efectuada en (Cedeño, Rocha-Hoyos, Zurita, & Milla, 2018), se determinó las emisiones de gases contaminantes generadas por un vehículo con motor de combustión interna sobre una ruta de la ciudad, aplicando tres tipos de combustibles: Súper (RON92), Extra (RON87) y Ecopaís (RON85). Los resultados mostraron que los combustibles Súper y Ecopaís emiten mayores emisiones de gases contaminantes con respecto al combustible Extra. Para el combustible RON92, las emisiones de CO, HC y NO_x, fueron superiores en valores de 49,3%; 65%; y 97,88%, respectivamente. En cambio, para el combustible Ecopaís, las emisiones de los gases contaminantes fueron superiores en valores de 85,9%; 36,6% y 96,4%, respectivamente. Para este estudio, se utilizó un equipo on board Axion OEM-2100AX. En el estudio realizado en (Tipanluisa, Remache, Ayabaca, & Reina, 2017), determina que las emisiones de gases contaminantes en ralentí y en altas revoluciones de un vehículo con motor de combustión interna, son superiores en Quito a diferencia de las que se producen en la comunidad de Tonsupa ubicada sobre el nivel del mar. Los

valores de CO, CO₂ y HC para ralentí en la ciudad de Quito, son superiores en 600%; 0,54% y 1600%, respectivamente. Mientras que los valores de las emisiones de estos gases para altas revoluciones son superiores en 150%; 1,13% y 1500%, respectivamente. Con respecto al O₂, la emisión de este gas es superior en la comunidad de Tonsupa a régimen de ralentí en 26,88%, pero es ligeramente inferior a altas revoluciones en 4%. Este estudio se realizó de manera estacionaria, es decir, no hubo desplazamiento del vehículo sobre una ruta determinada. Aunque todas estas investigaciones nacionales, no contemplan específicamente una comparación de emisiones de gases de escape en distintos niveles de tráfico, se podrán considerar para la discusión de este trabajo y sugerir futuras investigaciones, con base a las teorías consolidadas acerca del funcionamiento del motor.

Por lo tanto, debido a la carencia de estudios inherentes al tema de la presente investigación, es imprescindible la comparación de las emisiones de gases de escape entre las dos condiciones de congestión vehicular. Así mismo, no existe información referente a las correlaciones entre las emisiones de los gases de escape durante la circulación del vehículo por una ruta de la ciudad, con lo cual permitiría conocer el conjunto de gases de escape que guardan mayor relación entre sí. En el presente trabajo, se efectuó la medición de O₂, CO₂, CO y HC en un vehículo con motor de combustión interna durante el recorrido por una de las principales rutas de la ciudad de Quito. Las pruebas se llevaron a cabo tanto en el alto flujo vehicular de las horas pico de los días laborables, como en el bajo flujo vehicular de los fines de semana. Se utilizó un equipo portátil de medición de emisiones de gases de escape, de esta manera, se prioriza la aplicación de los métodos directos para la cuantificación de emisiones de escape, debido a las deficiencias de los métodos indirectos antes mencionados. Posteriormente se efectuó el análisis de la correlación de Pearson entre pares de gases de escape.

En el resto de documento está organizado de la siguiente manera. En la sección dos se detalla las características del vehículo de pruebas y equipo analizador de gases, y así mismo se describe el protocolo de recolección y registro de datos. En la sección tres se detallan los resultados obtenidos de las comparaciones y correlaciones, incluyendo las respectivas discusiones con respecto a las investigaciones anteriormente publicadas. Finalmente se desarrollan las conclusiones del presente trabajo y se proponen futuras investigaciones en la sección cuatro.

Materiales y métodos

Vehículo de pruebas y equipo de medición

Se utilizó un vehículo liviano con motor de combustión interna y sistema de inyección de combustible multipunto, para el recorrido en una ruta de la ciudad de Quito. Las características del vehículo se muestran a continuación (Tabla I).

Tabla I. *Características del vehículo de pruebas.*

Marca	Mazda
Modelo	Mazda 3
Versión	Sport AT
Combustible	Gasolina RON92
Cilindrada	2 000 cm ³
Potencia	111,8 kW a 6500 rpm
Par	187 Nm a 4000 rpm
Consumo medio	7900 cm ³ /100 km

Para la toma de datos de las emisiones de escape durante los recorridos en la ruta, se utilizó un analizador de gases portátil Kane Autoplus 4-2 el cual cumple con los estándares EN61000-6-3:2011 y EN61000-6-1:2007. Los datos fueron enviados vía Bluetooth desde el analizador de gases hasta una computadora portátil y fueron registrados cada tres segundos en la aplicación Kane Live del equipo. Una vez culminada la prueba, los datos son exportados a un archivo en Excel para poder ser descargados posteriormente.

Ruta y toma de datos de emisiones de gases de escape

La ruta seleccionada para la ejecución de las pruebas inicia desde el Centro Comercial El Recreo al sur de la ciudad y concluye en sector de El Trébol, centro de la ciudad. De esta manera, el vehículo recorre las calles: Pedro Vicente Maldonado, Napo, Pedro Pinto y Velasco Ibarra. Esta ruta es una de las más importantes debido a que comunica al sur con los valles, el centro y norte de la ciudad. En la imagen se muestra la ruta desde Google Earth (Figura 1).

Fig. 1. *Ruta de prueba: Centro Comercial El Recreo-El Trébol.*



Se realizaron 10 recorridos durante las horas pico de los días laborables y fines de semana por la mañana. Para garantizar las mismas condiciones en todas las pruebas, las tomas de datos se realizaron a las 7h30. De esta manera, se mantuvo constante las condiciones ambientales, y con ello se evitó que las variaciones de la temperatura ambiental y humedad que se puedan generar en el transcurso de las horas del día, puedan incidir en la inyección de combustible y en los niveles de emisiones de gases de escape.

El estilo de conducción es otra variable que puede afectar a los valores de las emisiones de gases de escape, debido a que cada conductor puede diferir en el número de aceleraciones y desaceleraciones durante el manejo del vehículo en una misma ruta. Por lo tanto, una sola persona fue la encargada de conducir el vehículo en cada una de las pruebas. La persona encargada en la conducción del vehículo, tiene una amplia experiencia en manejo de vehículos livianos y no presenta sanciones de tránsito. Con esto, se garantizó que el manejo del vehículo haya sido efectuado de la manera más pertinente. Durante el recorrido en la ruta, se circuló permanentemente por el carril izquierdo, obedeciendo a las normas de conducción para vehículos livianos particulares.

Previo al inicio de cada recorrido, fue indispensable purgar con aire limpio el equipo analizador de gases. A partir de ese momento, se pudo efectuar una toma de datos durante un tiempo de 30 minutos. Para realizar otra medición, se debe realizar nuevamente el proceso de purgado del equipo. Otra persona, se ubicó en el asiento posterior para que pueda manejar el equipo analizador de gases, y al mismo tiempo, pueda verificar el registro de los datos en la computadora portátil mediante la aplicación Kane Live. En la imagen se muestra la disposición del equipo analizador de

gases y la computadora portátil con la aplicación Kane Live en la parte posterior de la cabina del vehículo, para la recolección de datos en ruta (Figura 2).

Fig. 2. Equipos de toma y registro de datos de emisiones de gases de escape.



Una vez concluidos los recorridos, se descartaron aquellas pruebas cuyas condiciones de tráfico fueron anormales, y por lo tanto, no representan la congestión real diaria. Entre las condiciones anormales presentes se tuvieron: incidentes de tránsito, operativos policiales y cierre temporal de carril por mantenimiento vial. Por último, se extrajeron los datos de los diversos archivos de Excel de la aplicación Kane Live a un solo documento consolidado, con una totalidad de seis muestras. Posteriormente se procedió al análisis comparativo y estadístico entre los escenarios de flujo de tráfico en horas pico y bajo flujo vehicular.

Resultados y discusión

A continuación, se muestran los valores promedios de las emisiones de gases de escape y el tiempo de las pruebas efectuadas en la ruta (Tabla II).

Parámetros	Unidad	Hora pico			Fin de semana		
		Prueba uno	Prueba dos	Prueba tres	Prueba uno	Prueba dos	Prueba tres
Tiempo	min	22,5	22,3	19,35	13,55	18,8	14,2
Promedio O	%	0,48	0,62	0,37	1,74	0,74	0,75

Promedio							
CO ₂	%	12,57	12,41	13	12,2	12,9	12,61
Promedio							
CO	%	0,8	0,48	0,74	0,35	0,53	0,75
Promedio							
HC	ppm	83,6	74,8	89,95	11,9	45,29	46,2

En función de los valores máximos mostrados, la emisión de O₂ en flujo bajo vehicular de los fines de semana es de 180,64% superior con respecto al tráfico en horas pico. Sin embargo, las emisiones de gases de CO₂, CO y HC para flujo vehicular en horas pico, es superior al escenario de flujo bajo vehicular en valores de 0,77%; 6,66%; 94,69%, respectivamente. La existencia de mayores emisiones de O₂ y menores emisiones de CO₂, CO, HC para bajo flujo vehicular, se debe a que el motor no está siendo sometido a un elevado número de aceleraciones y desaceleraciones, lo que conlleva a un mayor tiempo de trabajo en mezclas estequiométricas y ligeramente pobres. Por lo tanto, se disminuyen los excesos de consumo de combustible y de mezclas ricas, generando menores emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero. Este aspecto se corrobora con un menor tiempo de duración de la ruta en flujo bajo vehicular de los fines de semana de hasta 8,95 min, lo que implica menores detenciones del vehículo. La Prueba número uno de flujo bajo vehicular fue la que obtuvo menor tiempo de duración, mientras que la Prueba número uno de flujo vehicular en horas pico fue la que obtuvo mayor tiempo de duración.

El comportamiento creciente de CO₂ en condiciones de alta congestión durante las horas pico, coincide con el estudio descrito en (Zhang et al., 2011) para vehículos livianos y pesados durante la circulación por una zona de trabajo. Esto puede deberse a que, en ambas condiciones de tráfico, la velocidad de desplazamiento de los vehículos es bajos y tienden a generar mayor número de detenciones y arranques. La tendencia de una mayor emisión de CO₂ en congestión vehicular también se demuestra en (Bharadwaj et al., 2017). Sin embargo, para el mismo escenario, la afirmación de mayores emisiones de HC, CO en el vehículo liviano del presente trabajo, difiere a lo expuesto en (Zhang et al., 2011), a excepción del caso de los vehículos pesados. La divergencia de estos resultados se puede deber a que la metodología aplicada en la investigación publicada, no consistió en un método directo de determinación de emisiones de gases contaminantes, y por lo tanto, no se consideró los aspectos externos a las cuales los vehículos están expuestos durante su

recorrido en una ruta real. Además, el comportamiento de HC y CO para el caso de vehículos pesados, si es acorde a lo señalado con respecto a bajas velocidades en alta congestión, por lo que el vehículo liviano debería tener un comportamiento similar. Finalmente, en (Zhang et al., 2011) también indica que las mayores emisiones de gases contaminantes se produjeron en las etapas de transición del cambio de flujo vehicular, es decir, durante las variaciones de las aceleraciones. Esto es un escenario comparable durante las altas congestiones, donde los cambios de aceleración son muy recurrentes. A pesar que en (Li et al., 2018), el material obtenido para análisis fue PM y no gases de escape, estas partículas también son residuos que emanan los vehículos con motor de combustión interna. Por lo tanto, pueden ser considerados como elementos contaminantes para la discusión de este trabajo. En este contexto, la mayor cantidad de emisiones de PM coincide con las mayores emisiones de gases contaminantes de escape durante la congestión en horas pico.

El ecodriving es una conducción en el cual se disminuyen los cambios bruscos de aceleración, análogos a los escenarios de bajo flujo vehicular. Por lo tanto, con respecto al estudio mostrado en (Milla et al., 2020), se demuestra que existe una disminución de CO al igual que el escenario de baja congestión. Considerando a los combustibles con distintos RON, en (Cedeño et al., 2018) se determinó que el combustible de mayor número de octano emite mayores gases contaminantes, por ende, se espera que la aplicación de un combustible con menor RON para un estudio de las mismas características, permita generar menores emisiones contaminantes, debido a que en el presente estudio, el combustible utilizado fue RON92.

El estudio de (Tipanluisa et al., 2017) indica que las mayores emisiones de gases contaminantes se generan en la ciudad de Quito. Por consiguiente, se espera que un mismo estudio comparativo en los dos tipos de congestión vehicular efectuado en una ciudad ubicada a nivel del mar, genere menores emisiones contaminantes con respecto a la ciudad de Quito. En cambio, las emisiones de O₂, deberían ser mayores a nivel del mar por tener una mejora en la combustión.

El siguiente objetivo del presente trabajo, consistió en la determinación de las correlaciones entre los gases de escape. A continuación, se muestra las Correlaciones de Pearson (Tabla III).

Tabla III. *Correlaciones de Pearson entre pares de gases de escape.*

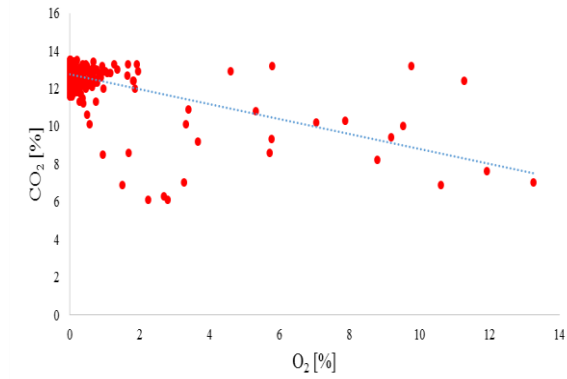
		O ₂ -CO ₂	O ₂ -CO	O ₂ -HC	CO ₂ -CO	CO ₂ -HC	CO-HC
Hora pico	Prueba uno	-0,5959	-0,133	-0,04	-0,14613	-0,14307	0,7331
	Prueba dos	-0,7669	-0,106	-0,23	0,05711	0,32478	0,5824
	Prueba tres	-0,5214	-0,248	-0,12	0,27148	0,10891	0,6393

	Prueba uno	-0,9027	-0,289	-0,28	0,25309	0,2578	0,6215
Fin de semana	Prueba dos	-0,7532	-0,194	-0,29	0,00988	0,18702	0,7778
	Prueba tres	-0,6889	-0,135	-0,01	0,03051	0,08463	0,8152

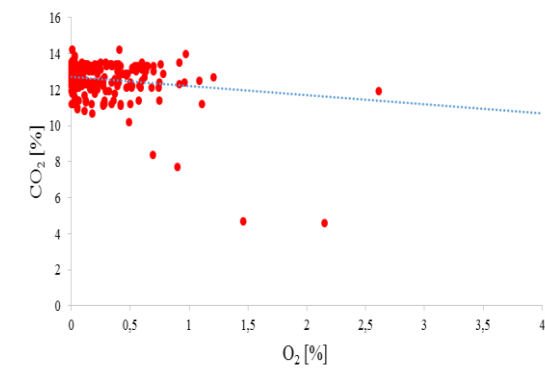
Se observa que, en todas las pruebas, las correlaciones entre O-CO₂ y CO-HC, muestran correlaciones moderadas y fuertes, con la diferencia que las correlaciones O-CO₂ son negativas, mientras que las correlaciones CO-HC, son positivas. La correlación negativa entre el O₂ y el CO₂ implica un comportamiento tipo “espejo” entre estos dos gases, es decir, mientras el CO₂ disminuye, el O₂ aumenta y viceversa.

La presencia de valores de CO₂ de alrededor del 12% implica una relativa buena combustión, y es corroborado con valores relativamente bajos de O₂ (valores inferiores al 2%). Las emisiones de CO y HC tienen un comportamiento creciente, es decir, mientras uno de estos gases aumenta, el otro tiende también a aumentar, y viceversa. Estos gases son nocivos para la salud y su presencia se debe a mezclas ricas cuyos valores son más altos en horas pico debido a las detenciones y arranques existentes en la alta congestión vehicular. Sin embargo, para ambos escenarios de alta y baja congestión, los valores de estos gases se encuentran dentro de los límites permitidos, menos del 2% para el caso del CO y menos de 100 ppm para el caso de los HC. Estos resultados confirman las buenas condiciones mecánicas del motor y del sistema de inyección de combustible.

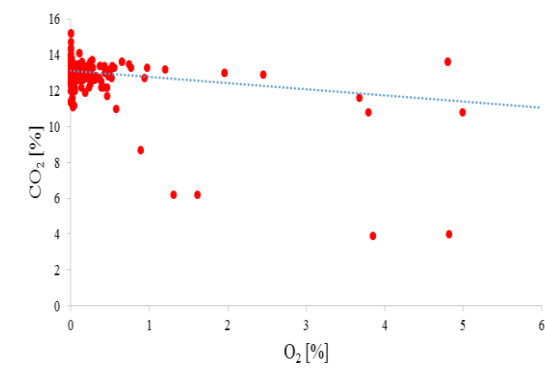
Con respecto a las otras correlaciones mostradas en la tabla anterior, los valores de correlaciones son básicamente bajas y nulas, lo que implicaría que no existe una relación entre esos pares de gases de escape. Por lo tanto, para las correlaciones moderadas y fuertes, en las siguientes imágenes (Figura 3) se muestran los diagramas de dispersión de O-CO₂ de las tres pruebas para el flujo en horas pico. Posteriormente se exponen las imágenes para los casos de bajo flujo vehicular (Figura 4). En todos los diagramas de dispersión se grafica la recta de tendencia.



(a)

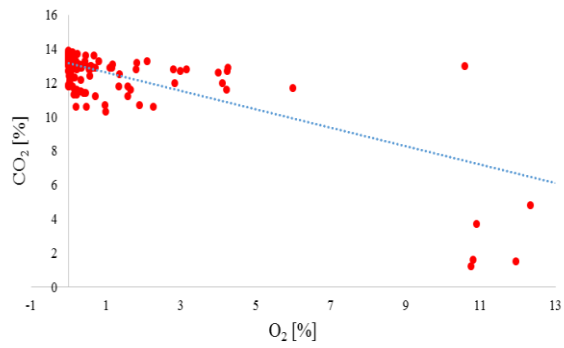


(b)

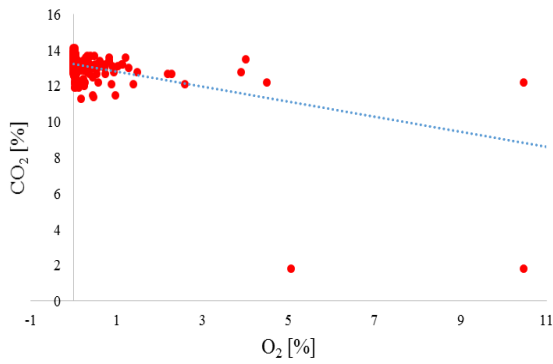


(c)

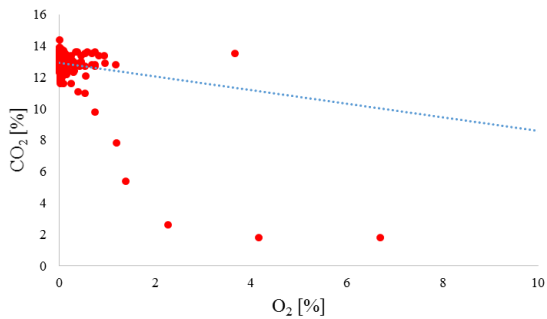
Fig. 3. Diagramas de dispersión de O-CO₂ en horas pico. (a) Prueba uno. (b) Prueba dos. (c) Prueba tres.



(a)



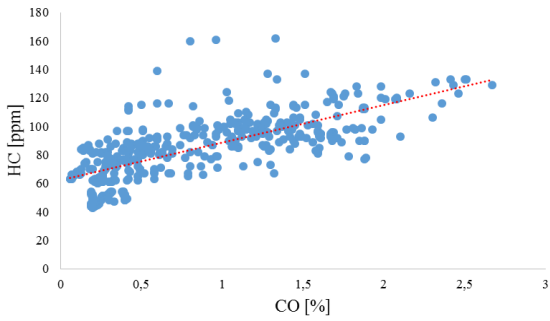
(b)



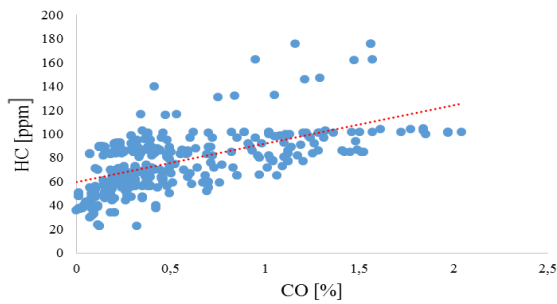
(c)

Fig. 4. Diagramas de dispersión de O-CO₂ en fin de semana. (a) Prueba uno. (b) Prueba dos. (c) Prueba tres.

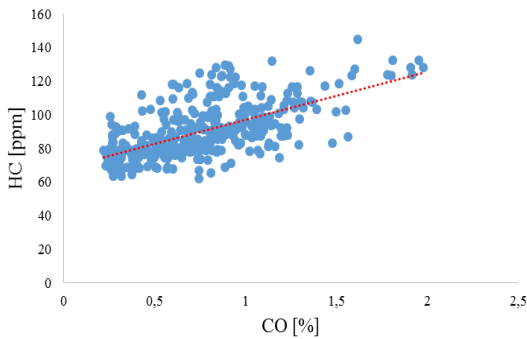
En las siguientes imágenes (Figura 5), se muestran los diagramas de dispersión para las correlaciones CO-HC para el flujo en horas pico. Posteriormente se exponen las imágenes de los diagramas de dispersión para el caso de bajo flujo vehicular (Figura 6). De la misma manera que para las imágenes de las correlaciones anteriores, se muestran las rectas de tendencia en los diagramas de dispersión.



(a)

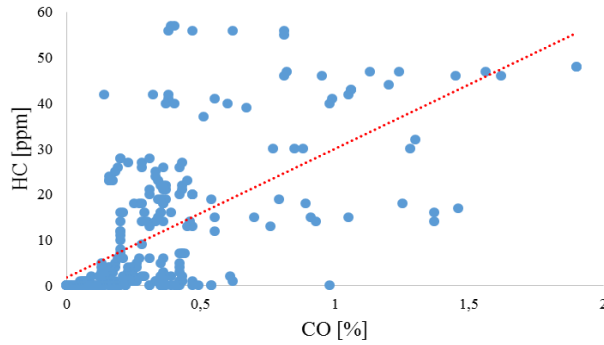


(b)

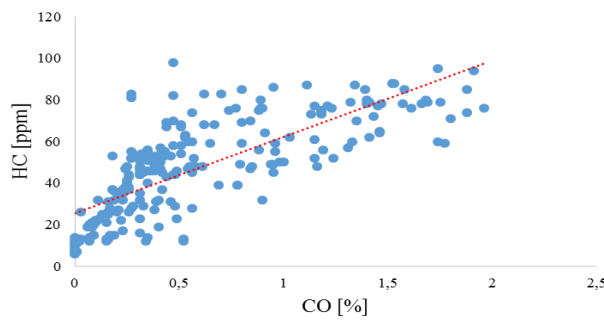


(c)

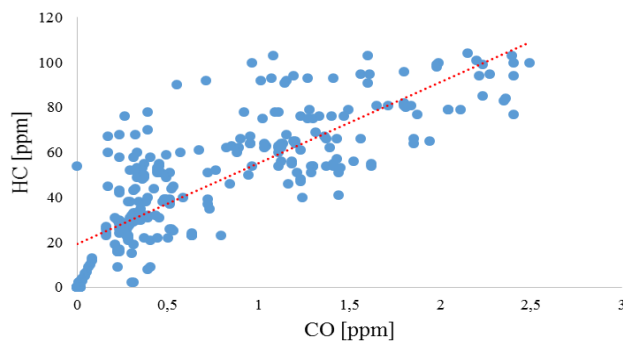
Fig. 5. Diagramas de Dispersión de CO-HC en horas pico. (a) Prueba uno. (b) Prueba dos. (c) Prueba tres.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Diagramas de dispersión de CO-HC en fin de semana. (a) Prueba uno. (b) Prueba dos. (c) Prueba tres.

Como las correlaciones mostradas anteriormente son las más relevantes, es importante determinar las ecuaciones de las rectas de tendencia de los diagramas de dispersión. De esta manera se tienen las ecuaciones lineales de la correlación de O-CO₂ de la Prueba número uno (1), Prueba número dos (2), Prueba número tres (3) para el flujo vehicular en horas pico; y las ecuaciones de la Prueba número uno (4), Prueba número dos (5) y Prueba número tres (6), para bajo flujo vehicular. Así mismo, se determinaron las ecuaciones para las correlaciones de CO-HC de la Prueba número uno (7), Prueba número dos (8), Prueba número tres (9), en flujo vehicular en horas pico; y las ecuaciones de la Prueba número uno (10), Prueba número dos (11) y Prueba número tres (12), para bajo flujo vehicular.

$$y = -0,3974x + 12,762 \quad (1)$$

$$y = -0,5068x + 12,728 \quad (2)$$

$$y = -0,3442x + 13,126 \quad (3)$$

$$y = -0,5404x + 13,139 \quad (4)$$

$$y = -0,4209x + 13,237 \quad (5)$$

$$y = -0,4343x + 12,940 \quad (6)$$

$$y = 26,401x + 62,423 \quad (7)$$

$$y = 32,273x + 59,370 \quad (8)$$

$$y = 28,569x + 68,617 \quad (9)$$

$$y = 28,282x + 1,750 \quad (10)$$

$$y = 36,626x + 25,541 \quad (11)$$

$$y = 36,069x + 19,095 \quad (12)$$

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos, se confirma que existen mayores emisiones de gases nocivos y de efecto invernadero durante la circulación en horas pico en la ciudad de Quito, llegando incluso hasta casi duplicar los valores de HC con respecto a los valores generados en horas de bajo flujo vehicular en los fines de semana. Las elevadas emisiones se producen por las condiciones propias del motor del vehículo cuando se encuentra en horas pico, esto es, aceleraciones y desaceleraciones

debido a detenciones constantes por semaforización y generación de colas extensas de vehículos en las vías angostas de la ciudad.

Durante las aceleraciones, el sistema de control de inyección de combustible entra en un estado de lazo abierto, lo que implica la nula consideración del monitoreo del sensor de oxígeno por parte de la computadora del vehículo. Esto permite la producción de una mayor cantidad de mezcla rica en la cámara de combustión, y con ello, el motor entrega el par necesario a las ruedas para que pueda vencer la inercia del vehículo cuando se encuentre detenido. Esto obviamente es un aspecto inevitable en los vehículos con motor de combustión interna, y lamentablemente la problemática en el daño ambiental se multiplica cuando existe un gran número de vehículos en el parque automotor de la ciudad. Se adiciona el hecho de que incluso existe un gran número de vehículos con sistemas de alimentación de combustible a carburador, por lo que las mezclas estequiométricas de aire y combustible en el motor, serán reducidas. Por el contrario, cuando el vehículo recorre en horas de bajo flujo vehicular, las variaciones de las aceleraciones se disminuyen, manteniendo al motor en un régimen de giro casi constante. Esto permite que el sistema de control de inyección de combustible permanezca un mayor lapso de tiempo en lazo cerrado, con lo cual la computadora del vehículo monitorea constantemente la señal del sensor de oxígeno y logra que la mezcla de aire y combustible sea cercana a la estequiométrica. Por lo tanto, se logra una disminución de las emisiones de gases contaminantes.

Con respecto a las correlaciones, se pudo afirmar que los gases nocivos de CO y HC están muy relacionados entre sí, y se encuentran presentes en mezclas ricas o en combustiones deficientes. El comportamiento entre O₂ y CO₂ es de manera inversa y representan la eficiencia de la combustión. Si bien existe un ligero aumento de emisión de CO₂ en horas pico, el vehículo demostró excelentes condiciones mecánicas, electrónicas, y por lo tanto, de combustión durante la ejecución de las pruebas.

Finalmente, se recomienda que en próximas investigaciones se efectúen comparaciones de emisiones de gases de escape en distintos niveles de congestión vehicular, considerando rutas a nivel del mar y variando los tipos de combustible en función del número de octano. Esto permitirá generar una base teórica más consolidada en función de la presión atmosférica, RON, temperatura, humedad ambiental y la propia congestión vehicular.

Agradecimiento

El autor expresa su agradecimiento al Sr. Téc. Luis Aníbal Lema, por su apoyo incondicional para la obtención de datos de emisiones de gases de escape. Durante la realización de las pruebas, se pudo evidenciar su profesionalismo durante la conducción del vehículo, considerando las diversas dificultades presentes en el tráfico vehicular de la ciudad.

Conflicto de intereses

El autor declara que no existe conflicto de interés alguno.

Referencias

- Bai, L., Su, X., Zhao, D., Zhang, Y., Cheng, Q., Zhang, H., ... Su, H. (2018). Exposure to traffic-related air pollution and acute bronchitis in children: season and age as modifiers. *J Epidemiol Community Health*, 72(5), 426–433. <https://doi.org/10.1136/JECH-2017-209948>
- Bharadwaj, S., Ballare, S., Rohit, & Chandel, M. K. (2017). Impact of congestion on greenhouse gas emissions for road transport in Mumbai metropolitan region. *Transportation Research Procedia*, 25, 3538–3551. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2017.05.282>
- Brachtl, M. V., Durant, J. L., Perez, C. P., Oviedo, J., Sempertegui, F., Naumova, E. N., & Griffiths, J. K. (2009). Spatial and temporal variations and mobile source emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons in Quito, Ecuador. *Environmental Pollution*, 157(2), 528–536. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2008.09.041>
- Brancato, V., Gioiella, F., Imparato, G., Guarnieri, D., Urciuolo, F., & Netti, P. A. (2018). 3D breast cancer microtissue reveals the role of tumor microenvironment on the transport and efficacy of free-doxorubicin in vitro. *Acta Biomaterialia*, 75, 200–212. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2018.05.055>
- Cedeño, E. A. L., Rocha-Hoyos, J. C., Zurita, D. B. P., & Milla, J. C. L. (2018). Evaluation of gas emissions in light gasoline vehicles in height conditions. Case study Quito, Ecuador. *Enfoque UTE*, 9(2), 149–158. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V9N2.201>
- Choudhary, A., & Gokhale, S. (2016). Urban real-world driving traffic emissions during interruption and congestion. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 59–70. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2015.12.006>

- Esposito, S., Galeone, C., Lelii, M., Longhi, B., Ascolese, B., Senatore, L., ... Principi, N. (2014). Impact of air pollution on respiratory diseases in children with recurrent wheezing or asthma. *BMC Pulmonary Medicine*, 14(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/1471-2466-14-130/TABLES/4>
- Estrella, B., Estrella, R., Oviedo, J., Narváez, X., Reyes, M. T., Gutiérrez, M., & Naumova, E. N. (2005). Acute respiratory diseases and carboxyhemoglobin status in school children of Quito, Ecuador. *Environmental Health Perspectives*, 113(5), 607–611. <https://doi.org/10.1289/EHP.7494>
- Faulin, J., Grasman, S. E., Juan, A. A., & Hirsch, P. (2019). Sustainable Transportation: Concepts and Current Practices. *Sustainable Transportation and Smart Logistics: Decision-Making Models and Solutions*, 3–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814242-4.00001-6>
- Fontaras, G., Zacharof, N. G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 97–131. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2016.12.004>
- Fu, H., & Chen, J. (2017). Formation, features and controlling strategies of severe haze-fog pollutions in China. *Science of The Total Environment*, 578, 121–138. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.10.201>
- Goldizen, F. C., Sly, P. D., & Knibbs, L. D. (2016). Respiratory effects of air pollution on children. *Pediatric Pulmonology*, 51(1), 94–108. <https://doi.org/10.1002/PPUL.23262>
- Habich-Sobiegalla, S., Kostka, G., & Anzinger, N. (2018). Electric vehicle purchase intentions of Chinese, Russian and Brazilian citizens: An international comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 205, 188–200. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.318>
- Hallmark, S. L., Wang, B., & Sperry, R. (2013). Comparison of on-road emissions for hybrid and regular transit buses. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 63(10), 1212–1220. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.813874>
- Huang, Y., Ng, E. C. Y., Zhou, J. L., Surawski, N. C., Chan, E. F. C., & Hong, G. (2018). Eco-driving technology for sustainable road transport: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 596–609. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.05.030>
- Iankov, I., Taylor, M. A. P., & Scrafton, D. (2017). Forecasting greenhouse gas emissions performance of the future Australian light vehicle traffic fleet. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 99, 125–146. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2017.03.011>

- Jia, S., Yan, G., & Shen, A. (2018). Traffic and emissions impact of the combination scenarios of air pollution charging fee and subsidy. *Journal of Cleaner Production*, 197, 678–689. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.117>
- Jicha, M., & Pospisil, J. (2017). Influence of vehicle-induced turbulence on pollutant dispersion in street canyon and adjacent urban area. *International Journal of Environment and Pollution*, 62(2/3/4), 89. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2017.10010368>
- Kan, Z., Tang, L., Kwan, M. P., & Zhang, X. (2018). Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Using GPS Big Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/IJERPH15040566>
- Kozina, A., Radica, G., & Nižetić, S. (2020). Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121105. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121105>
- Lee, C. T., Lim, J. S., Fan, Y. Van, Liu, X., Fujiwara, T., & Klemeš, J. J. (2018). Enabling low-carbon emissions for sustainable development in Asia and beyond. *Journal of Cleaner Production*, 176, 726–735. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.110>
- Li, R., Meng, Y., Fu, H., Zhang, L., Ye, X., & Chen, J. (2018). Characteristics of the pollutant emissions in a tunnel of Shanghai on a weekday. *Journal of Environmental Sciences*, 71, 136–149. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2017.11.015>
- Lopez-Arboleda, E., Sarmiento, A. T., & Cardenas, L. M. (2020). Systemic approach for integration of sustainability in evaluation of public policies for adoption of electric vehicles. *Systemic Practice and Action Research* 2020 34:4, 34(4), 399–417. <https://doi.org/10.1007/S11213-020-09540-X>
- Mejdoubi, A., Zytoune, O., Fouchal, H., & Ouadou, M. (2020). A Learning Approach for Road Traffic Optimization in Urban Environments. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12081 LNCS, 355–366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45778-5_24/COVER
- Milla, J. L., Cedeño, E. L., Hoyos, J. R., Milla, J. L., Cedeño, E. L., & Hoyos, J. R. (2020). Impacto del Ecodriving sobre las emisiones y consumo de combustible en una ruta de Quito. *Enfoque UTE*, 11(1), 68–83. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUE.V11N1.500>

- Ramos, A., Muñoz, J., Andrés, F., & Armas, O. (2018). NOx emissions from diesel light duty vehicle tested under NEDC and real-world driving conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 37–48. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.04.018>
- Santos, G. (2017). Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? *Transport Policy*, 59, 71–74. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2017.06.007>
- Seuwou, P., Banissi, E., & Ubakanma, G. (2020). The Future of Mobility with Connected and Autonomous Vehicles in Smart Cities. *Internet of Things*, 37–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3_3/COVER
- Tipanluisa, L. E., Remache, A. P., Ayabaca, C. R., & Reina, S. W. (2017). Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades. *Información Tecnológica*, 28(1), 03–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002>
- Zhang, K., Batterman, S., & Dion, F. (2011). Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions. *Atmospheric Environment*, 45(11), 1929–1939. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2011.01.030>

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).