

Evaluación de la variación de emisiones contaminantes en ciclos de conducción real con diferentes tipos de gasolinas, La Paz–Bolivia

Evaluation of the variation of pollutant emissions in real driving cycles with different types of gasoline, La Paz–Bolivia

Waldo Moya Fernández ^{1,*} 

¹ Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, Correo: wmoya@epg.unap.edu.pe

Resumen

Actualmente se presenta diferentes medios de transporte en las grandes ciudades, y en particular en el departamento de La Paz – Bolivia, los vehículos livianos representan el transporte urbano de mayor utilización debido a su accesibilidad y eficiencia. El objetivo de la investigación fue evaluar la variación de las emisiones de gases contaminantes en ciclos de conducción real de vehículos livianos que se desplazan a diferentes altitudes geográficas y que son dosificados por tipos de gasolina que se comercializan en el departamento de La Paz. La metodología adoptada fue de enfoque cuantitativo experimental, utilizando la técnica de observación sistemática apoyado por un analizador de gases portátil para la recolección de datos sobre las variables dependientes (CO , CO_2 , HC y O_2), la muestra estuvo compuesta por tres automóviles livianos de diferentes generaciones tecnológicas (Cressida – Toyota, Sentra – Nissan y Alto – Suzuki). Se ha desarrollado la prueba dinámica en la autopista La Paz – El Alto y la doble vía La Paz – Oruro. Los resultados obtenidos tuvieron una tendencia variable de (0,73 % a 5,56 %) CO , (11,90 % a 15,28 %) CO_2 , (50 ppm a 780 ppm) HC y (0,25 % a 1,78 %) O_2 , estos cambios significativos en las variables dependientes debido a la influencia de las variables independientes e interviniencias permitieron identificar la cantidad de combustión emitida al medio ambiente por cada muestra. En conclusión, el estudio realizado contribuye a la comprensión de la problemática ambiental orientada a la mitigación.

Palabras clave: Atmósfera, automóvil, combustión, gasolina, medio ambiente, topografía, transporte urbano.

Abstract

Currently, various modes of transportation are available in large cities, and particularly in the department of La Paz, Bolivia, light vehicles represent the most widely used form of urban transport due to their accessibility and efficiency. The objective of this research was to evaluate the variation in pollutant emissions during real-world driving cycles of light vehicles traveling at different geographical altitudes and using different types of gasoline available in the department of La Paz. The methodology adopted was a quantitative experimental approach, using systematic observation supported by a portable gas analyzer for data collection on the dependent variables (CO , CO_2 , HC, and O_2). The sample consisted of three light vehicles of different technological generations (Cressida – Toyota, Sentra – Nissan, and Alto – Suzuki). The dynamic test was conducted on the La Paz – El Alto highway and the La Paz – Oruro dual carriageway. The results obtained showed a variable trend of (0.73% to 5.56%) CO , (11.90% to 15.28%) CO_2 , (50 ppm to 780 ppm) HC, and (0.25% to 1.78%) O_2 . These significant changes in the dependent variables, due to the influence of the independent and intervening variables, allowed for the identification of the amount of combustion emissions released into the environment by each sample. In conclusion, this study contributes to the understanding of the environmental problem and its mitigation.

Keywords: Atmosphere, automobile, combustion, environment, gasoline, topography, urban transport.

Recibido: 18/08/2025

Aceptado: 29/10/2025

Publicado: 30/12/2025

*Autor para correspondencia: wmoya@epg.unap.edu.pe

Cómo citar: Moya Fernandez, W. (2025). Evaluación de la variación de emisiones contaminantes en ciclos de conducción real con diferentes tipos de gasolinas, La Paz – Bolivia. *Revista De Investigaciones*, 14(4), 236–247. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i4.7067>

Introducción

A nivel internacional, diversos estudios han abordado temáticas sobre la operatividad del vehículo y el consumo de combustible, las diferencias significativas entre las pruebas realizadas en dinamómetros de instituciones académicas y las desarrolladas por los fabricantes (Cordero Moreno et al., 2017). Por otro lado, reportes que indican que los vehículos más antiguos son los principales emisores de contaminantes, mientras que aquellos con tecnología avanzada cumplen con los parámetros de regulación y generan menor emisión (Huang et al., 2017). Asimismo, la carga del vehículo y la velocidad de conducción influyen en el proceso de combustión, pero cuando se somete a pruebas de dinamómetro no son afectadas por el clima y tráfico, lo que beneficia las condiciones de operatividad del vehículo (Chen et al., 2018).

Entre tanto la evaluación de la contaminación ambiental que se desarrolló en el Cercado de Lima, Perú, señala una alta emisión de gases contaminantes debido a la gran afluencia de vehículos y un parque automotor antiguo que contribuye a la generación de sulfatos y nitratos (Negrón Martínez et al., 2019). También se presenta evaluaciones con el suministro de etanol que evidencia una mejora en la inflamación, lo que reduce la emisión de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC), favoreciendo una combustión más completa y optimizando la operatividad del vehículo en condiciones reales (Yuan et al., 2019).

La emisión de gases de combustión vehicular es un fenómeno persistente de gran impacto, donde la liberación de contaminantes atmosféricos es notable debido a la composición y volumen que depende del combustible utilizado (Sakthivel et al., 2020). De igual manera la medición y cuantificación de emisiones según la dinámica de los vehículos en condiciones reales de operación consideran factores operativos y tecnológicos (Zamir Andrés, 2020). Además, se evidencia que las emisiones de gases alimentados con etanol de alta concentración, gas comprimido, diésel y gasolina convencional, donde los vehículos con control tecnológico cumplen la norma euro 6 a comparación de vehículos con menor tecnología que superaban los límites de la norma euro 2 (Aakko-Saksa et al., 2020).

Debido a las regulaciones de emisiones emitidas en Europa y Estados Unidos los vehículos de inyección directa de gasolina destacan por sus ventajas frente a los tradicionales, lo que permite la reducción del consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes (Yu et al., 2022). Asimismo, se evidencia que las bajas temperaturas del aire, inferiores a 0 °C, afectan el régimen térmico de los vehículos, influyendo en el consumo de combustible y en la emisión de gases nocivos (Pobedinsky, 2022).

Ciertamente los vehículos impactan significativamente el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida útil, la producción utiliza recursos no renovables y emite gases nocivos de esta manera al final de su vida se convierte en residuo contaminante (Williams & Blyth, 2023). Por esta razón las políticas de cambio de matriz energética implican la transición hacia vehículos con tecnología avanzada, proyectando un aumento progresivo del 64 % en el flujo vehicular hasta 2030 (Meng & Zhongfeng, 2023). Además, al momento de establecer las regulaciones de mejora de la calidad de aire se evidencia factores esenciales de operatividad que deben ser tratados con mejoramiento tecnológico (Ying et al., 2024).

No obstante, se puede mencionar estudios sobre los efectos de la temperatura y el combustible, donde se evidenció que la temperatura influye en la gasolina con etanol, generando emisiones de gases orgánicos (Ying et al., 2024). De igual manera otra investigación sobre etanol evaluó mezclas de 0 %, 2,5 %, 5 % y 10 % con gasolina, evidenciando que al utilizar entre un 5 % y 10 % de etanol se optimiza la reducción de emisiones de gases al medio ambiente (Minh et al., 2024). Además, la incorporación de una cantidad adecuada de etanol en la gasolina tiene un impacto significativo en la reducción de emisiones contaminantes, se ha identificado que su adición mejora la combustión del motor, lo que conlleva a una disminución en la emisión de compuestos orgánicos volátiles (Ruikang et al., 2024).

En Bolivia, la comercialización de gasolinas se clasifica según el número de octanos, siendo la gasolina de 85 octanos la de mayor distribución y consumo a nivel nacional. Este tipo de combustible es utilizado debido a su precio accesible (YPFB,

2018). De manera similar, en la gestión 2018, se incorporó un nuevo tipo de gasolina con un aditivo de origen vegetal, específicamente etanol al 12 % (Decreto Supremo N° 3672 2018). La mezcla de gasolina con un porcentaje controlado de etanol busca reducir la dependencia de combustibles fósiles, disminuir las emisiones contaminantes (ANH, 2018). La Norma Boliviana NB 62002 establece los parámetros de calidad del aire y regula las emisiones de fuentes móviles, definiendo los límites restrictivos para la emanación de gases contaminantes. (IBNORCA, 2006).

En La Ley No. 1333 de 1992, también conocida como la Ley del Medio Ambiente de Bolivia, establece normativas para la protección y conservación del medio ambiente, incluyendo regulaciones sobre la emisión de contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, el CO₂ se genera cuando la operatividad de vehículo se somete a diferentes cargas en carretera, la alta velocidad implica un aumento de energía lo que involucra un importante consumo de combustible (Wang et al., 2020).

La investigación tiene como objetivo evaluar la variación de las emisiones de gases contaminantes provenientes de los vehículos livianos bajo condiciones de conducción real, examinando el impacto de la heterogeneidad topográfica y diversos regímenes cinemáticos, considerando como variables independientes mediante la dosificación de gasolinas con distintos índices de octanajes (85, 92, 95), los ensayos serán ejecutados bajo protocolos controlados estandarizado de la norma boliviana NB 62003, en La Paz, Bolivia.

Metodología

Ámbito o lugar de estudio

El estudio se desarrolló en el departamento de La Paz (Bolivia). La fase experimental se dividió en dos tramos: el primero se ejecutó en la autopista de conexión interurbana La Paz (3 685 m.s.n.m.) – El Alto (4 100 m.s.n.m.); el segundo tramo se realizó en la doble vía La Paz – Oruro, a una altitud de 3 930 m.s.n.m.

Población

El parque automotor de la ciudad de La Paz se

clasifica en función del tipo de servicio (particular, público y oficial) y subordinadamente, por la clase de vehículo. El análisis de esta categorización evidencia que los automóviles constituyen el 18 % del servicio particular, el 16 % del servicio público y el 3 % del servicio oficial (INE, 2022). En consecuencia, este tipo de vehículo liviano fue seleccionado para el estudio, considerando su accesibilidad operacional y funcionalidad en el contexto urbano. Asimismo, la elección se fundamentó en que los automóviles representan los principales consumidores de gasolina en comparación con otras categorías vehiculares, un factor determinante para su inclusión en la presente investigación.

Muestra

La muestra se configuró mediante un muestreo discrecional, clasificando el parque automotor en tres automóviles de prueba: (a) vehículo con sistema de carburación mecánica (Toyota Cressida, 1987), y (b) vehículos con inyección electrónica y controles de emisiones contemporáneos (Suzuki Alto, 2018; Nissan Sentra B19, 2019). Esta elección permite contrastar el impacto progresivo de las tecnologías de combustión en las emisiones contaminantes.

Diseño de investigación

El diseño siguió un enfoque cuantitativo - experimental, basado en observaciones sistemáticas con un analizador portátil de gases *Snap-on*. Las variables dependientes incluyeron gases de combustión con impacto ambiental (CO, CO₂, HC y O₂), mientras que las independientes correspondieron a tres combustibles: gasolina especial (85 octanos), etanol (92 octanos) y premium (95 octanos). Cada prueba dinámica se realizó por separado en cada automóvil, controlando altitud, temperatura y humedad relativa como variables intervinientes.

Se implementó un diseño experimental de tres tratamientos correspondientes a los combustibles evaluados: gasolina de (85, 92, 95) octanos. Cada tratamiento fue aplicado de manera independiente a cada vehículo durante las pruebas dinámicas, con diez repeticiones por variable dependiente (CO, CO₂, HC, O₂), siguiendo el protocolo estandarizado de la norma boliviana NB 62003. Para controlar la

variabilidad geográfica, el experimento se replicó en dos tramos altitudinalmente diferenciados: la autopista La Paz – El Alto y la doble vía La Paz – Oruro, lo que permitió analizar el efecto del desnivel en los resultados de emisiones.

Programa software de tratamientos de datos

La medición de las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos (HC) y oxígeno (O₂) se realizó mediante el *analizador de gases Snap-on*, articulado al software *Verus/Verdict HHGA5V2*. Esta interfaz permite la adquisición, visualización en tiempo real y almacenamiento estructurado de los datos durante los ciclos de prueba, garantizando trazabilidad y precisión en el registro.

Los datos de temperatura ambiente y humedad relativa se obtuvieron mediante aplicaciones digitales del Servicio Nacional de Metrología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI), y fueron validados mediante comparación con los registros oficiales emitidos por la institución.

Para contrastar las hipótesis planteadas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), previa verificación de los supuestos de normalidad en la distribución de los residuos y homocedasticidad, con un nivel de significancia establecido en $\alpha = 0,05$. Los análisis fueron ejecutados en el entorno estadístico R (versión 4.3.1), utilizando el paquete *stats* para el ANOVA y el paquete *car* para la evaluación de supuestos.

Resultados

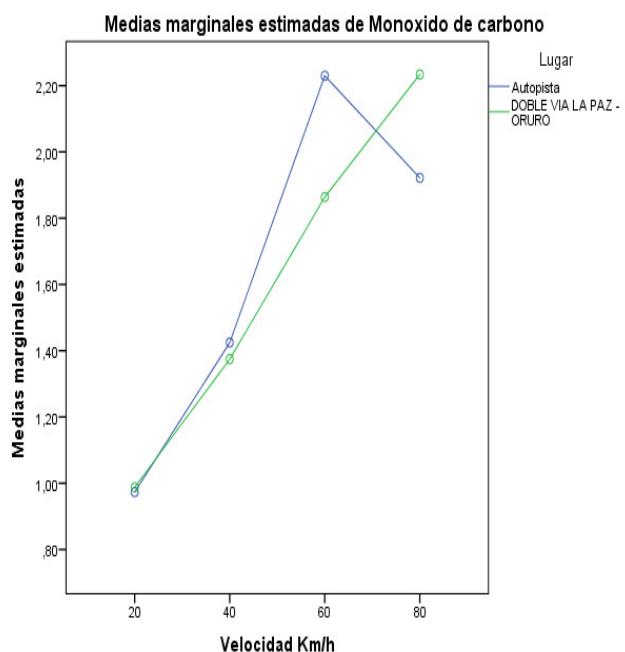
Se cuantificaron los resultados obtenidos de la prueba dinámica vehicular diseñada para medir las concentraciones de gases de emisión, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos (HC) y oxígeno (O₂). El diseño experimental contempló dos entornos de prueba con variaciones altitudinales significativas: la ruta Autopista La Paz – El Alto y la Doble Vía La Paz – Oruro.

Se aprecia la media marginal que revela una interacción significativa entre la emisión de CO, velocidad que fueron sometidos los automóviles y el lugar de prueba (Autopista y Doble Vía).

Si bien ambas localizaciones presentan medias marginales similares y bajas a velocidades de 20 km/h y 40 km/h, sus comportamientos divergen notablemente a partir de los 60 km/h. La línea de la Autopista muestra un ascenso que alcanza su pico máximo alrededor de 60 km/h (valor de emisión de 2,20 % de CO), seguido de un descenso significativo a 80 km/h (cayendo a 1,90 % de CO). En contraste, la doble vía exhibe una relación monótona creciente casi lineal, a diferencia en la autopista a una velocidad de 80 km/h, donde también alcanza su máximo valor de emisión (2,20 % de CO). Por lo tanto, el efecto de la velocidad sobre la variable dependiente medida es dependiente del tipo de vía (Figura 1).

Figura 1

Medias marginales de CO% en función a la velocidad y lugares de prueba.

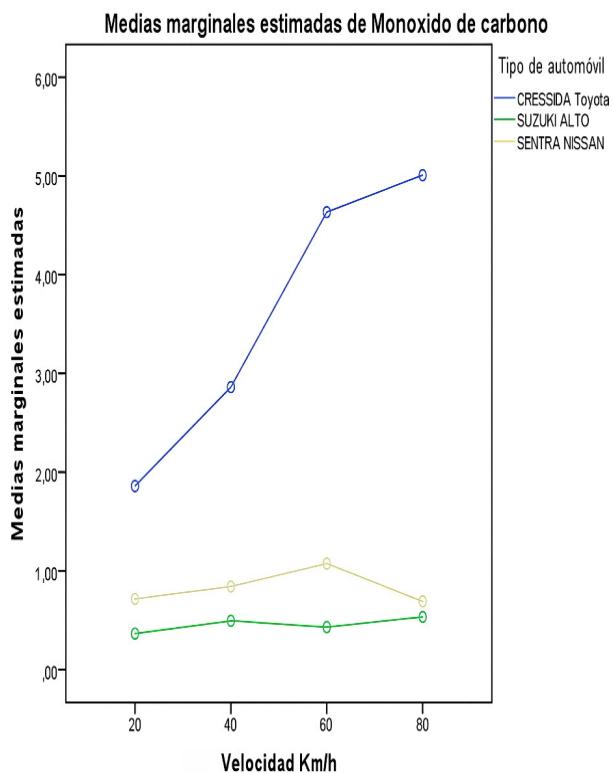


Nota. Las medias marginales del porcentaje de monóxido de carbono (CO %) emitido por vehículos en relación con la velocidad registrada durante las pruebas.

El comportamiento creciente en la línea azul que representa al Cressida - Toyota, donde se evidencia que a medida que aumenta la velocidad de prueba la emisión de CO se incrementa alcanzando un valor superior al 5 % de CO. Contrariamente el Sentra - Nissan se mantiene un nivel relativamente bajo con emisiones que no supera el 1,5 % de CO, mostrando un leve aumento a los 60 km/h, asimismo el Suzuki -Alto no muestra un aumento considerable en la emisión de CO (Figura 2).

Figura 2

Medias marginales de CO % en función de la velocidad de prueba y tipo de automóvil.



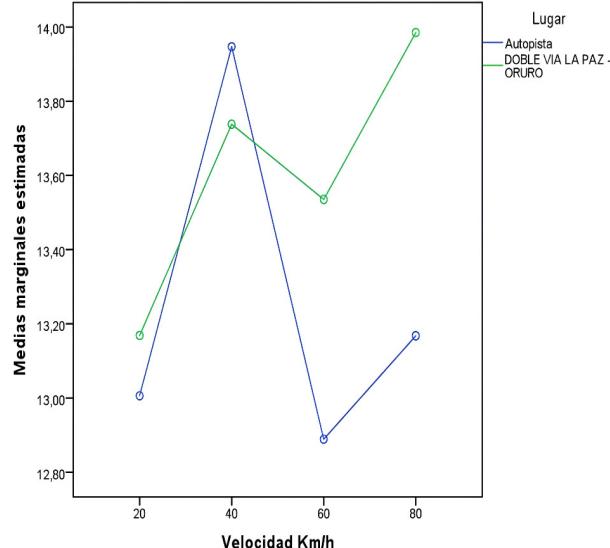
Nota. Esta visualización permite identificar el impacto del tipo de vehículo y la velocidad sobre las emisiones contaminantes.

Se verifica en las medias marginales estimadas que representan las emisiones de CO₂, revela una fuerte interacción entre la velocidad que fueron sometidos los automóviles y el lugar de prueba, lo cual indica que la velocidad óptima para la eficiencia de emisiones es casual al entorno de conducción. El patrón de emisión en la Autopista es marcadamente no lineal: comienza con una emisión moderada (13 % de CO₂) a 20 km/h, pero alcanza su máximo nivel de 14 % de CO₂ a 40 km/h, para luego descender drásticamente hasta el mínimo absoluto de todo el estudio a 60 km/h (con una emisión de 12 % de CO₂). En contraste, la doble vía exhibe un patrón más irregular: comienza con una emisión mayor a 20 km/h que la Autopista, y aunque desciende levemente a 60 km/h (13 % de CO₂), continúa su tendencia hasta registrar el nivel máximo de CO₂, mientras que la Autopista es la más eficiente a 60 km/h para minimizar las emisiones de CO₂ la doble vía representa el punto de mayor emisión global a 80 km/h, invirtiendo la tendencia observada en las velocidades intermedias (Figura 3).

Figura 3

Medias marginales de CO % en función a la velocidad v lugares de prueba.

Medias marginales estimadas de Dioxido de carbono



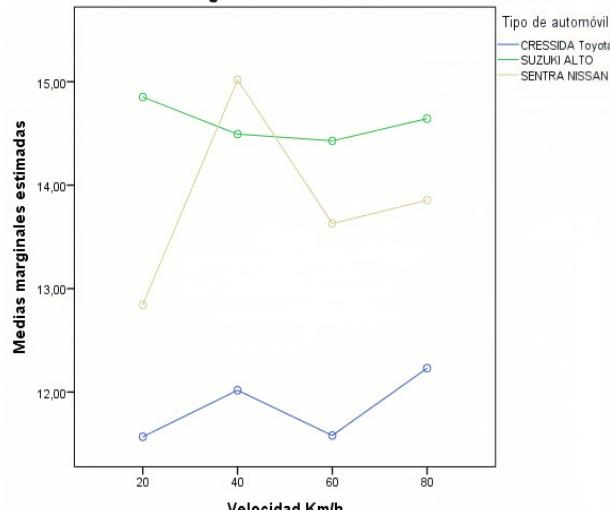
Nota. El incremento en la velocidad influye en los niveles de emisión, y cómo esta relación varía según el entorno de evaluación (urbano, rural, etc.).

Toyota que muestra valores relativamente bajos y estables de CO₂ con un ligero aumento a medida que la velocidad aumenta, en comparación del Suzuki - Alto la emisión de CO₂ tiene ligeras variaciones, no obstante, el Sentra - Nissan presenta un pico significante de 15 % de CO₂ a los 40 km/h, por consiguiente, se observa que el incremento de la velocidad altera las emisiones de CO₂ (Figura 4).

Figura 4

Medias marginales de CO₂ % en función de la velocidad y tipo de automóvil

Medias marginales estimadas de Dioxido de carbono



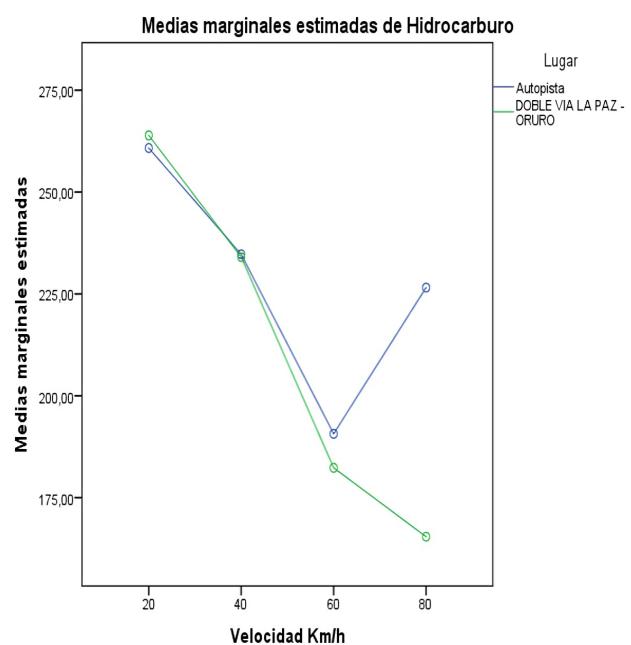
Nota. Algunos modelos presentan un incremento más pronunciado en las emisiones a medida que aumenta la velocidad, lo que sugiere diferencias en eficiencia energética y desempeño ambiental

Se aprecia las medias marginales de la emisión de Hidrocarburos (HC), que revela un patrón general de reducción de emisiones al aumentar la velocidad de 20 a 60 km/h para ambas localizaciones. En la doble vía se presenta una tendencia consistentemente decreciente en las emisiones, alcanzando su mínimo de emisión (168 ppm de HC) a 80 km/h. En marcado contraste, en

la Autopista presenta una tendencia no lineal, ya que después de alcanzar su mínima emisión de 192 ppm de HC a 60 km/h, experimenta una creciente de 225 ppm de HC a 80 km/h, indicando una pérdida significativa de eficiencia de combustión y un aumento de emisiones a la velocidad máxima en el entorno de la autopista (Figura 5).

Figura 5

Medias marginales de HC (ppm) en función a la velocidad y lugares de prueba.

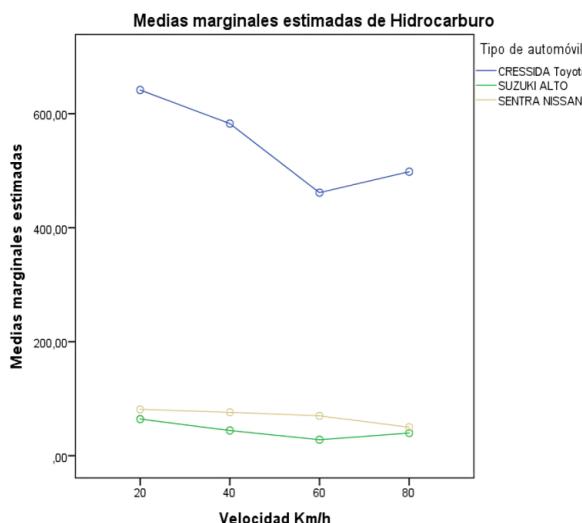


Nota. Las medias marginales controlan el efecto de una variable mientras se examina el impacto de otra, facilitando así la comparación entre lugares bajo condiciones similares de velocidad.

Se muestra que a 20 km/h el Cressida - Toyota presenta las más altas emisiones de HC (cerca de 780 ppm de HC) que disminuye gradualmente a medida que la velocidad aumenta con un leve incremento a 80 km/h, por otro lado, el Suzuki - Alto y el Sentra - Nissan mantiene niveles de estables a través de las velocidades evaluadas sin altas oscilaciones (Figura 6).

Figura 6

Medias marginales de HC (ppm) en función de la velocidad y tipo de automóvil

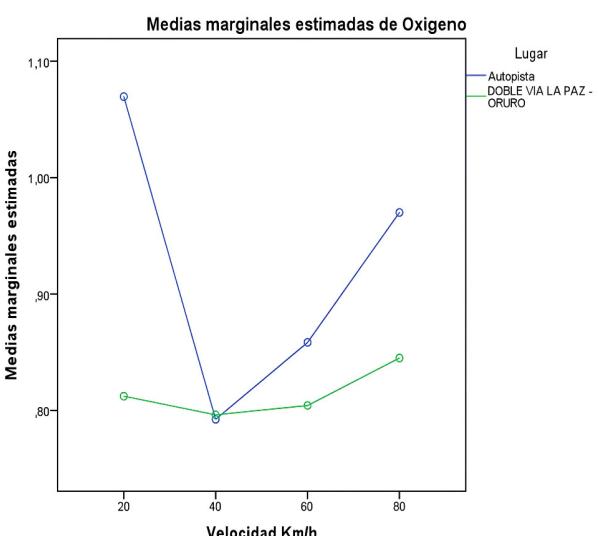


Nota. Una mayor presencia de O₂ puede indicar una combustión incompleta o una mezcla aire-combustible pobre.

Se aprecia que en la Doble Vía exhibe una notable estabilidad en sus emisiones de O₂, manteniéndose en un rango consistentemente bajo (entre 0,80 % y 0,84 %) O₂ a todas las velocidades, alcanzando su mínimo alrededor de 40 km/h. En marcado contraste en la Autopista comienza con la emisión más alta del estudio a 20 km/h (1,07 % de O₂). Posteriormente, las emisiones de O₂ en la Autopista aumentan hasta alcanzar 0,97 % de O₂ a los 80 km/h (Figura 7).

Figura 7

Medias marginales de O₂ % en función a la velocidad y lugares de prueba.

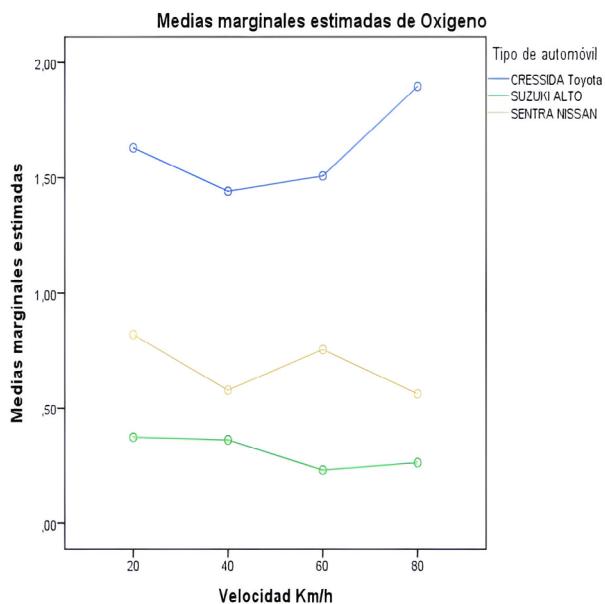


Nota. Las variaciones entre lugares de prueba pueden reflejar diferencias en altitud, condiciones ambientales o características del tráfico.

Se visualiza las medias marginales donde la tendencia en el comportamiento de las emisiones de O_2 en el Cressida - Toyota son mayores a altas velocidades, a diferencia del Sentra - Nissan tiene un comportamiento más equilibrado similar al Suzuki - Alto pero con una emisión menor de O_2 (Figura 8).

Figura 8

Medias marginales de O_2 % en función de la velocidad de prueba y tipo de automóvil.



Nota. Permite analizar cómo varían las emisiones de HC según el modelo de vehículo y su comportamiento a diferentes velocidades.

Se evidencia que al utilizar gasolina de 85 octanos se incrementó significativamente la emisión de monóxido de carbono (4,5 % de CO) a medida que aumentó la velocidad, en comparación con el uso de gasolina de 92 octanos la emisión de 2 % de CO tiene una tendencia más moderada, del mismo modo con la gasolina de 95 octanos tiende a generarse una menor emisión de 1,5 % de CO, siendo efectiva la reducción de emisión a mayor velocidad. En cambio, se presenta una ligera fluctuación de emisión de dióxido de carbono (15 % - 12,8 % de CO_2) cuando se suministra con gasolina de 85 octanos, de la misma manera al utilizar gasolina de 92 octanos muestra un patrón más variable con picos a 40 km/h de 14,2 % de CO_2 y descensos pronunciados en 60 km/h y 80 km/h hasta un 13,7 % de CO_2 , asimismo con la gasolina de 95 octanos el comportamiento es de 12,5 % a 13,8 % de emisión de CO_2 .

Cuando se suministra gasolina de 85 octanos disminuye la emisión de hidrocarburos hasta 240 ppm de HC, de igual manera cuando se utiliza la gasolina de 92 octanos disminuye hasta 160 ppm de HC, pero con la gasolina de 95 octanos se presenta un patrón de disminución a un nivel más bajo de 50 ppm. Por otra parte, la gasolina de 85 octanos tiene una mayor emisión de O_2 a altas velocidades, en cambio la gasolina de 92 y 95 octanos presenta índices bajos de emisión de oxígeno a las mismas condiciones de operación.

El análisis de los gráficos de emisiones, al considerarse bajo el enfoque de impacto negativo, subraya la vulnerabilidad de las concentraciones de gases ante la variación de la velocidad y el entorno geográfico. Las concentraciones de contaminantes clave como el dióxido de carbono CO_2 e hidrocarburos HC, que son gases de efecto invernadero (G.E.I.) y precursores de la contaminación atmosférica, siendo un incremento directamente proporcional al riesgo ambiental. El análisis de CO_2 (G.E.I. primario) reveló que la doble vía La Paz – Oruro se presenta el punto de mayor emisión. Paralelamente, los HC mostraron que la autopista (La Paz – El Alto) sufre un fuerte deterioro en la eficiencia de combustión, demostrando que el mayor impacto negativo para cada contaminante no ocurre en la misma velocidad ni entorno. Esta interacción compleja evidencia que no existe una velocidad universalmente óptima, y la eficiencia es contingente a las condiciones del lugar.

Discusión

Las emisiones de gases nocivos principalmente provenientes de la combustión de los vehículos afectan significativamente en la calidad del aire, donde se hace énfasis al dióxido de nitrógeno que intensifica la concentración de efecto invernadero afectando la salud pública (Breuer et al., 2021). Se debe considerar que la composición total de elementos contaminantes que emite la combustión vehicular es nociva para la salud y provocan una mayor mortalidad cardiovascular e inflamación en las vías respiratorias (Lim et al., 2021).

Es consecuente afirmar que el cambio brusco que se genera en la temperatura ambiental en lugares de mayor altitud está relacionado con la morbilidad y la mortalidad en enfermedades

respiratorias tan comunes como el asma lo que es parte del grado de impacto ambiental (Cabrera López et al., 2021). Por esta razón es importante emitir elementos regulatorios como la restricción de la compra de vehículos que no se encuentren dentro las normas ambientales establecidas por los entes que controlan la fabricación de vehículos (Xie et al., 2021).

Contrariamente la contaminación generada por los vehículos radica en el mantenimiento inadecuado, debido a la falta de conocimiento que compromete con la eficiencia del motor, carencia de información técnica, falta de reparación oportuna y falta de conciencia ambiental, incrementando considerablemente la liberación de agente nocivos (Hepsiba et al., 2021). Por este motivo se ha detectado que la población ingiere diversas sustancias que ingresan al organismo siendo la composición de dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono elementos que causan efectos dañinos que están relacionados con enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Muñoz Pérez et al., 2021).

Por esta razón se debe incorporar elementos mitigadores como el sembrado de plantas que absorben el dióxido de carbono y liberan oxígeno, siendo el cedro y el pino que han demostrado ser efectivos en la absorción de contaminantes atmosféricos y tienen la capacidad de filtrar partículas suspendidas, asimismo pueden crecer en diversas condiciones ambientales (Popova et al., 2021).

Aunque la emanación de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), y óxido de nitrógeno (NO_x) generado por los vehículos a gasolina se relaciona con el desgaste de los motores y sistemas de escape a medida que los vehículos aumentan su desgaste, la eficiencia de combustión disminuye lo que implica en mayores emisiones de elementos contaminantes (Aosaf et al., 2022). Por otro lado, se evidenció que la edad promedio de los vehículos en circulación es de 15,3 años, siendo prolongado este tiempo de funcionamiento lo que implica un aumento en el consumo de combustible, lo que a su vez contribuye de manera significativa a la emisión de dióxido de carbono (CO_2) en el medio ambiente (Carrera et al., 2022).

En cambio, el clima desempeña un papel fundamental en la dinámica de los contaminantes atmosféricos afectando su persistencia y distribución, siendo los factores meteorológicos como el viento, temperatura y radiación solar determinantes para la dispersión de elementos nocivos, la topografía de una región puede modificar significativamente el movimiento de la masa de aire (Rodriguez Garzon et al., 2022). Lo que evidencia la importancia de implementar políticas orientadas a la reducción de vehículos de combustión interna, con el objeto de disminuir las emisiones de contaminantes, por ello la transición hacia vehículos equipados con tecnologías avanzadas contribuirá a la mitigación de la contaminación que implicará un futuro más limpio y saludable (Meng & Zhongfeng, 2023).

Asimismo, la transición a nuevas formas de energías renovables en el transporte permitirá generar el desarrollo sostenible, incorporación de programas de reducción de gases nocivos como parte esencial de las políticas estatales donde incorporen regulaciones de mitigación (Mikalai et al., 2024).

Conclusiones

Se determinó la variación de la combustión de los vehículos livianos donde se evidenció que los vehículos presentan perfiles de emisiones notablemente distintos. El Toyota - Cressida muestra un comportamiento inconstante, con sus emisiones de monóxido de carbono (CO) aumentando significativamente con la velocidad, lo que sugiere una combustión ineficiente. Sus altas emisiones de hidrocarburos (HC) a bajas velocidades también indican una combustión incompleta. En contraste, el Suzuki - Alto y el Nissan - Sentra exhiben una eficiencia de combustión superior, manteniendo sus emisiones de CO y HC en niveles bajos y estables a lo largo del rango de velocidades evaluado, lo que los posiciona como vehículos con un mejor rendimiento ambiental en estas condiciones.

Al evaluar el comportamiento de la combustión cuando se desplazan a diferentes desniveles topográficos se evidencia que las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2) refuerza estas observaciones. Aunque el Nissan - Sentra

presenta un pico significativo de CO₂ a 40 km/h, lo que podría indicar una calibración óptima del motor para ese punto de operación, las tendencias generales en todos los vehículos demuestran que la velocidad es un factor determinante en la composición de los gases de escape. La inusual alta presencia de O₂ en el Toyota - Cressida a altas velocidades, junto con sus crecientes emisiones de CO, sugiere una mezcla de combustible no ideal, mientras que el comportamiento más equilibrado del Suzuki - Alto y el Nissan - Sentra refleja una gestión más consistente de la combustión.

Se identificó que la emisión de gases contaminantes está determinada por el tipo de gasolina, la topografía y las condiciones mecánicas de cada vehículo, factores que inciden directamente en la contaminación ambiental. Estas diferencias resaltan la importancia de utilizar combustibles de mayor octanaje y realizar un riguroso mantenimiento a los automóviles para mitigar su impacto negativo en el medio ambiente, especialmente en condiciones de desnivel geográfico como la autopista de La Paz y El Alto.

En el marco de la comprensión de la problemática ambiental, se determinó que la interacción entre la altitud y topografía del lugar de estudio y la velocidad de operación es un factor determinante. Se evidenció que las condiciones geográficas multiplican o mitigan el efecto de la velocidad, resultando en patrones de emisión no lineales y complejos. Este análisis permitió identificar los focos de mayor riesgo ambiental: el pico de dióxido de carbono CO₂ principal gas de efecto invernadero (G.E.I.) ocurre en la Doble Vía (La Paz – Oruro), mientras que el repunte de hidrocarburos HC un contaminante tóxico, se manifiesta en la Autopista (La Paz – El Alto). Por lo tanto, si bien la alta velocidad es un factor de riesgo en ciertos tramos, la problemática ambiental es distinta para cada vía, lo que exige el diseño y la aplicación de estrategias de mitigación diferenciadas que aborden la complejidad de cada entorno de conducción.

Agradecimiento

Primeramente, agradezco a mi padre Simón Waldo Moya Vargas quien fue el principal operador de los diferentes automóviles que fueron parte de la investigación. Agradezco al Dr. Vladimiro Ibáñez

Quispe por sus consideraciones realizadas en el presente estudio, asimismo agradezco a Irma Moya Vargas por las conexiones necesarias para obtener el equipo analizador de gases, siendo este instrumento esencial para el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

- Aakko-Saksa, P., Koponen, P., Roslund, P., Laurikko, J., Nylund, N. O., Karjalainen, P., Rönkkö, T., & Timonen, H. (2020). Comprehensive emission characterisation of exhaust from alternative fuelled cars. *Atmospheric Environment*, 236(x). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117643>
- ANH. (2018). Resolución Administrativa RAR-ANH-DJ N° 0352/2018. En *Agencia Nacional de Hidrocarburos*. https://www.anh.gob.bo/InsideFiles/Documentos/Documentos_Id-1240-250421-0740-0.pdf
- Aosaf, M. R., Wang, Y., & Du, K. (2022). Comparison of the emission factors of air pollutants from gasoline, CNG, LPG and diesel fueled vehicles at idle speed. *Environmental Pollution*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119296>
- Breuer, J. L., Samsun, R. C., Stolten, D., & Peters, R. (2021). How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. *Environment International*, 152(October 2020), 106474. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106474>
- Cabrera López, C., Urrutia Landa, I., & Jiménez-Ruiz, C. A. (2021). SEPAR's Year: Air Quality. SEPAR Statement on Climate Change. *Archivos de Bronconeumología*, 57(5), 313–314. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2021.03.003>
- Carrera, M., Rodríguez, Villegas-Alcaraz, J. F., Salazar-Hernández, C., Mendoza-Miranda, J. M., Jiménez-, H., Islas, Hernández, J. G. S., Ortiz-Alvarado, J. de D., & Juarez-Rios, H. (2022). Monitoring of oil lubrication limits, fuel consumption, and excess CO₂ production on civilian vehicles in Mexico. *Energy*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124765>

- Chen, L., Wang, Z., Liu, S., & Qu, L. (2018). Using a chassis dynamometer to determine the influencing factors for the emissions of Euro VI vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.022>
- Cordero Moreno, D. G., Vidal Cordero, W. R., & Yascaribay Ramos, C. P. (2017). *Determinación del consumo de combustible de vehículos en base a los ciclos de conducción EPA FTP 75 y EPA HWFET, en dinamómetro de chasis. Casos de estudio: vehículos Chevrolet Aveo Activo 1,6L, 2011 y Hyundai Accent 1,6L, 2011. 1–9.* <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7374>
- Decreto Supremo N° 3672. (2018). *DECRETO SUPREMO N° 3672 25 DE SEPTIEMBRE DE 2018* . - El presente Decreto Supremo tiene por objeto determinar el porcentaje de mezcla del Aditivo de Origen Vegetal Etanol Anhídrico con gasolinas base, para su comercialización como combustible. 3, 1–2. <http://gacetaoficialdebolivia.gob.bo/normas/buscar/3672>
- Earth, G. (2023). *Localización de la Autopista (La Paz - El Alto), Departamento de La Paz - Bolivia.* <https://earth.google.com/web/@16.49545025,-68.14509185,3706.47449717a,8496.85526579d,35y,33.52954559h,0t,0r>
- Hepsiba, D., Varalakshmi, L. M., Suresh Kumar, M., Subburaj, J., Vijayakumar, P., & Rani, S. S. (2021). Automatic pollution sensing and control for vehicles using IoT technology. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3019–3021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.007>
- Huang, C., Tao, S., Lou, S., Hu, Q., Wang, H., Wang, Q., Li, L., Wang, H., Liu, J., Quan, Y., & Zhou, L. (2017). Evaluation of emission factors for light-duty gasoline vehicles based on chassis dynamometer and tunnel studies in Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, 169, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.020>
- IBNORCA. (2006a). *NB 62002 Calidad del aire - Emisiones de fuentes móviles - Generalidades, clasificación y límites máximos permisibles* (p. 24).
- <https://www.ibnorca.org/tienda/catalogo/detalle-norma/nb-62002:2020-nid=3610-6>
- IBNORCA. (2006b). *NB 62003 Calidad del aire - Evaluación de gases de escape de fuentes móviles con sistema de encendido por chispa - Método de ensayo en marcha mínima (Ralenti) y velocidad crucero y especificaciones para los equipos empleados en esta evaluación* (p. 29). <https://www.ibnorca.org/tienda/catalogo/detalle-norma/nb-62003:2021-nid=3661-6>
- INE, I. N. de E.-B. (2022). *Parque Automotor de La Paz, según tipo de servicio y clase de vehículo, 2003 - 2022. 3.* <https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-economicas/transportes/parque-automotor-cuadros-estadisticos/>
- Lim, S., Barratt, B., Holliday, L., Griffiths, C. J., & Mudway, I. S. (2021). Characterising professional drivers' exposure to traffic-related air pollution: Evidence for reduction strategies from in-vehicle personal exposure monitoring. *Environment International*, 153(March), 106532. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106532>
- Martyr, A. J., & Rogers, D. R. (2021). Chapter 10 - Chassis dynamometers, rolling roads and hub dynamometers. *Engine Testing (Fifth Edition)*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821226-4.00010-3>
- Meng, X., & Zhongfeng, Q. (2023). *How does vehicle emission control policy affect air pollution emissions? Evidence from Hainan Province, China.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161244>
- Mikalai, F., P., P. M., Yan, H., Gusev, A., Zhang, L., He, Y., & Yang, S. (2024). Greenhouse gas emissions and reduction strategies for the world's largest greenhouse gas emitters. *Science of the Total Environment*, 944. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173895>
- Minh, D. L., Quang, T., & Nguyen. (2024). Effects of exhaust gas recirculation and ethanol-gasoline blends on combustion and emission characteristics of spark ignition engine. *International Journal of Ambient*

- Energy*, 45(1). <https://doi.org/10.1080/01430750.2024.2366539>
- Muñoz Pérez, S., Salcedo Reátegui, J., & Sotomayor Mendoza, A. (2021). Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: revisión de literatura. *Inventum*, 16(30), 20–30. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.20-30>
- Negrón Martínez, C., Herrera Martínez, M., & Inga Domínguez, L. (2019). *Evaluación de la contaminación ambiental para mejorar la calidad de vida de la población de la zona del Cercado de Lima 2019 (Bachelor Thesis)*. 1–71. http://repositorio.ulasamericas.edu.pe/bitstream/handle/upa/821/Consuelo_Negrón_Martínez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Nissan, S. (2019). *Listado de especificaciones*. 8, 1–2. <https://www.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/pe/vehicles/sentra-18/ficha-tecnica/Sentra.pdf>
- Pobedinsky, A. (2022). Assessment of the influence of air temperature and cargo weight on fuel consumption and emissions of harmful substances with vehicle exhaust gases. *Transportation Research Procedia*, 63, 2687–2694. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.310>
- Popova, I., Leonteva, L., Danilov, I., Marusin, A., Marusin, A., & Makarova, I. (2021). Impact of vehicular pollution on the Arctic. *Transportation Research Procedia*, 57, 479–488. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.075>
- Rodriguez Garzon, S., Reppenhagen, M., & Müller, M. (2022). What if Air Quality Dictates Road Pricing? Simulation of an Air Pollution-based Road Charging Scheme. *Journal of Urban Mobility*, 2(August 2021), 100018. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100018>
- Ruikang, L., Chongzhi, Z., Yang, N., Yan, L., Pengfei, S., & Ruiguang, X. (2024). *Exhaust and evaporative volatile organic compounds emissions from vehicles fueled with ethanol-blended-gasoline*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124163>
- Sakthivel, P., Subramanian, K. A., & Mathai, R. (2020). Experimental study on unregulated emission characteristics of a two-wheeler with ethanol-gasoline blends (E0 to E50). *Fuel*, 262(October 2019), 116504. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116504>
- Sánchez, Hernández, Á. (2014). Nuevo reglamento Euro 5 y Euro 6. *CESVIMAP 72. Electromecánica*, 2, 48–51. <https://www.vagindauto.com/archivos/featured/Nuevo reglamento EuroV y Euro VI.pdf>
- Snap-on. (2016). *Snap - on “Analizador Portátil de 5 gases HHGA5C”*. 1–39. <https://www.snap-on.tw/data/download/files/1712286437996210120.pdf>
- Suzuki. (2018). Ficha Técnica. *IMCRUZ*. <https://www.suzuki.com.bo/vehiculo/alto/>
- Toyota. (2011). *Ficha Técnica - Toyota Cressida*. <https://tecnoautos.com/automoviles/fichas-tecnicas/ficha-tecnica-del-toyota-cressida-2-4-gle-sedan-saloon-ensamblado-en-1987/>
- Wang, Y., Hao, C., Ge, Y., Hao, L., Tan, J., Wang, X., Zhang, P., Wang, Y., Tian, W., Lin, Z., & Li, J. (2020). Fuel consumption and emission performance from light-duty conventional / hybrid-electric vehicles over different cycles and real driving tests. *Fuel*, 278(June), 118340. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118340>
- Williams, I. D., & Blyth, M. (2023). Autogeddon or autoheaven: Environmental and social effects of the automotive industry from launch to present. *Science of the Total Environment*, 858(November 2022), 159987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159987>
- Xie, Y., Wu, D., & Zhu, S. (2021). Can new energy vehicles subsidy curb the urban air pollution? Empirical evidence from pilot cities in China. *Science of the Total Environment*, 754, 142232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142232>

- Yadav, G. P. K., Muvvala, P., & Reddy, R. M. (2024). Study of performance, emission characteristics, and parametric optimization of compression ignition engine using biofuels: A review. *Biofuels*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2340178>
- Yan, G., Wang, M., Qin, P., Yan, T., Li, K., Wang, X., & Changling. (2021). Field measurements of vehicle pollutant emissions in road tunnels at different altitudes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104187>
- Yañez Aguilar, S. L. (2021). *Imaginarios sociales de las vulnerabilidades climáticas de la ciudad de La Paz, Bolivia*. 4, 1–18. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8426226>
- Ying, Z., Xinping, Y., Yunjing, W., Zhegjum, Y., & Haiguang, Z. (2024). Light-duty vehicle organic gas emissions from tailpipe and evaporation: A review of influencing factors. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174523>
- YPFB. (2018). *Abriendo el abanico de oportunidades*. 2. <https://www.ypfb.gob.bo/es/mas-hidrocarburos>
- Yu, F., Zhong, Z., Wang, Q., Liao, S., Zhu, M., Sha, Q., Liu, J., & Zheng, J. (2022). Characterizing the particle number emissions of light-duty gasoline vehicles under different engine technologies and driving conditions. *Environmental Research*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113648>
- Yuan, W., Frey, H. C., Wei, T., Rastogi, N., Vandergiend, S., Miller, D., & Mattison, L. (2019). Comparison of real-world vehicle fuel use and tailpipe emissions for gasoline-ethanol fuel blends. *Fuel*, 249(March), 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.115>
- Zamir Andrés, M. R. (2020). *NOx emissions from passenger cars under real driving conditions* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.65135>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>