

## DETERMINACIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN DE CAMIONES Y EMISIONES CONTAMINANTES

Development of a driving cycle based on commercial vehicles and pollutant emissions

Oscar Alejandro SALAZAR SABAS\* y Eduardo BETANZO QUEZADA

Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas s/n, Col. las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

\*Autor para correspondencia: [osalazar806@alumnos.uaq.mx](mailto:osalazar806@alumnos.uaq.mx)

*(Recibido: abril de 2021; aceptado: abril de 2022)*

Palabras clave: fuentes móviles, transporte urbano de carga, características de manejo, MOVES.

### RESUMEN

El transporte de carga urbano es un importante contribuidor de emisiones contaminantes en las ciudades. Una brecha actual en la investigación orientada a la evaluación de emisiones móviles en México es la falta de ciclos de conducción representativos del transporte de carga. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue desarrollar un ciclo de conducción para vehículos ligeros de carga y compararlo con ciclos internacionales de referencia. La técnica de persecución de vehículo fue usada para recolectar datos de velocidad y posicionamiento geográfico a través de 37 recorridos dentro de la zona de monumentos históricos de Querétaro. Una metodología que combina análisis de componentes principales, conglomerados por el método de k-medias y el modelo de la cadena de Markov, fue utilizada para la construcción de los ciclos candidatos. Los resultados muestran que, en comparación con el ciclo obtenido, los ciclos de conducción de referencia internacionales aplicados en México, subestiman contaminantes como NO<sub>x</sub> y CO por más del 22 y 48 %, para el Nuevo Ciclo Europeo de Conducción y el Procedimiento de Ensayo Federal 75, respectivamente. Esto refleja que el proceso de construcción de ciclos de conducción debe considerar las diferentes clases vehiculares y sistemas de transporte, ya que cada uno tiene patrones únicos de manejo, lo cual da como resultado ciclos de conducción significativamente diferentes.

Key words: mobile emissions, urban freight transport, driving behavior, MOVES.

### ABSTRACT

Urban freight transport is a significant contributor to pollutant emissions in cities. A current gap in mobile emissions evaluation in Mexico is the lack of a representative driving cycles for freight vehicles. The aim of this study was to develop a driving cycle for light commercial vehicles and compare it with standard international cycles. The chase-car technique was used to collect real-world driving data along 37 trips within the historic monuments zone of Querétaro. A methodology combining principal components analysis, k-mean clustering and the Markov chain model was applied to the construction of the driving cycles' candidates. Results show that, compared with the obtained cycle, the international reference drive cycles applied in Mexico underestimate

vehicular emissions as NO<sub>x</sub> and CO by about the 22 and 48 %, for the New European Driving Cycle and the Federal Test Procedure 75, respectively. This reflects that the drive cycle construction process must take into consideration the different vehicular classes and transport systems, since all of them have unique driving patterns that make every cycle significantly different from each other.

## INTRODUCCIÓN

Distintas organizaciones internacionales, como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, por su sigla en inglés) o el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), han desarrollado metodologías y reportado modelos para estimar las emisiones contaminantes en una determinada zona y medir la contribución de las fuentes fijas y móviles al deterioro del medio ambiente. En el caso de las fuentes móviles, esas metodologías consideran, entre otras cuestiones, las características del parque vehicular, la estructura de la red vial, las condiciones ambientales prevalcientes en la zona, las propiedades de los combustibles disponibles, las regulaciones ambientales aplicables y los estilos de conducción.

En el análisis de emisiones móviles, los ciclos de conducción son fundamentales. En México, con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMAR-NAT-2017 (SEMARNAT 2018), se han adoptado los ciclos denominados Procedimiento de Ensayo Federal (FTP75) de EUA y el Nuevo Ciclo Europeo de Conducción (NEDC) de la Unión Europea, los cuales son aplicados para la certificación de los límites de emisión de gases contaminantes en vehículos a diésel nuevos, con peso bruto vehicular mayor a 3.8 t. No obstante, autores como Hung et al. (2007) y Seers et al. (2015) coinciden en que la adopción de ciclos internacionales lleva a la falta de representatividad respecto a las condiciones locales de conducción, ya que los patrones de operación de cada zona dependen en gran medida de las características de sus flotas vehiculares, topografía, vialidades y conductas de conducción.

Los ciclos de conducción representan perfiles de velocidad-tiempo que reflejan los patrones promedio de conducción de vehículos en áreas específicas, donde un vehículo puede encontrarse en estado de ralentí, acelerando, decelerando o bajo un régimen de velocidad constante. El desarrollo de éstos involucra cuatro etapas:

1. Selección de la ruta o zona de interés: se establecen las vialidades o zona a evaluar, siendo éste un proceso subjetivo que queda al criterio del investigador

2. Recolección de actividad vehicular: se consiguen registros de tiempo-velocidad de vehículos dentro de la zona de interés, desde los cuales se construirá el ciclo de conducción.
3. Procesamiento de datos: la actividad vehicular obtenida es dividida en microviajes, los cuales, según Yuhui et al. (2019), son segmentos de un recorrido delimitados por dos velocidades cero; luego, se eligen criterios de evaluación con los cuales se describirá cada uno de los viajes y se evaluará la representatividad del ciclo de conducción final.
4. Construcción del ciclo de conducción: por último, una serie de microviajes es concatenada de manera aleatoria o por medio de una matriz de probabilidades, para formar un patrón de conducción

Los estudios enfocados a desarrollar ciclos de manejo centrados en el transporte urbano de carga son escasos. En esta línea de trabajo, Amirjamshidi y Roorda (2015) y Chindamo y Gadola (2018) coinciden en que no existen ciclos de manejo específicos que representen sus patrones de operación, sino que se utilizan ciclos estandarizados para simular sus emisiones, por lo que su contribución a la degradación de la calidad del aire es incierta.

Considerando lo mencionado, el objetivo de esta investigación es determinar los ciclos de conducción de camiones de carga ligeros y compararlo con ciclos internacionales adoptados en México, y a partir de ellos modelar las emisiones contaminantes producidas, tomando como caso de estudio la zona de monumentos históricos de la ciudad de Querétaro.

La contribución de esta investigación radica en considerar la sustitución de los parámetros internacionales que hasta hoy se han usado en México, por los obtenidos aquí en condiciones de operación reales, para obtener inventarios de emisiones contaminantes más cercanos a la realidad de las ciudades mexicanas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Caso de estudio

La zona de monumentos históricos de Querétaro (ZMHQ) está reconocida como patrimonio histórico

de la humanidad. Además, de acuerdo con Betanzo (2011), requiere de estrategias para mejorar el tránsito y el estado de los pavimentos, así como la infraestructura destinada a las maniobras de carga y descarga (Ochoa et al. 2021). También es importante mencionar que la zona de estudio tiene relevancia ambiental, dado que el Instituto Municipal de Planeación de Querétaro (IMPLAN) ha desarrollado un plan de manejo y conservación de la ZMHQ que incluye la reducción de emisiones contaminantes (IMPLAN 2011).

La ZMHQ cuenta con una red vial de aproximadamente 49.40 km de longitud. La red está conformada en su mayoría por calles locales; no obstante, contiene también arterias colectoras y vías secundarias. La zona tiene una extensión de 260.76 ha y abarca aproximadamente 850 establecimientos comerciales de bienes de consumo no duradero, los cuales demandan diariamente una alta cantidad de transporte de carga (IMPLAN 2011, INEGI 2020).

Dentro de la zona de interés, los vehículos con mayor presencia son los de clase 2. En segundo lugar, se encuentran la clase 1, como camionetas de caja abierta (*pick-up*) y furgonetas (Fig. 1). Por último, se observaron de manera esporádica vehículos clase 3 circulando dentro de la ZMHQ. No obstante, durante este estudio, estos últimos no fueron considerados para la construcción del ciclo de conducción representativo de los vehículos de carga en la zona.

### Recolección de datos de actividad vehicular

Para obtener los registros de velocidad-tiempo se empleó la técnica de persecución de vehículo, la cual consiste en seguir a un vehículo (objetivo) por la mayor cantidad de tiempo posible, emulando sus velocidades y aceleraciones. El protocolo utilizado fue el establecido por la CalePA (1993), cambiando la preferencia de un color específico de vehículo por camiones comerciales ligeros. En el **cuadro I** se muestran las características de los vehículos seguidos. Los datos fueron adquiridos por medio del Registro Público Vehicular (REPUVE).

Para la presente investigación las velocidades, tiempos y ubicaciones se obtuvieron por medio de un registrador de datos DG-100 de la marca GlobalSat (Fig. 2). Este equipo registra tiempo, fecha, velocidad, altitud y geoposicionamiento en intervalos especificados por el usuario. En este caso el dispositivo fue configurado para registrar datos cada segundo. El dispositivo adopta el datum WGS84 y tiene una precisión de 1-5 m para la posición y 0.1 m/s para la velocidad.

### Análisis de datos de campo

Los datos adquiridos fueron examinados con el fin de realizar su depuración. Para ello se buscaron valores duplicados, registros de velocidad y aceleración desfasados, falsas velocidades cero y huecos en los datos generados por los registradores de datos.



Fig. 1. Clases vehiculares dentro del área de estudio.

**CUADRO I. VEHÍCULOS SEGUIDOS DURANTE EL PERIODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**

Año modelo	Combustible	Línea	Año modelo	Combustible	Línea
2020	Diésel	Forward 800	2012	Freightliner	FL360
2019	Gasolina	Kangoo	2012	Freightliner	FL360
2019	Gasolina	NP300	2012	Nissan	NP300
2019	Gasolina	Promaster	2011	Hino	Hino 300
2018	Diésel	ELF300	2011	Nissan	NP300
2018	Diésel	ELF400	2010	Isuzu	ELF300
2018	Diésel	NP300	2010	Volkswagen	Transporter
2017	Diésel	Hino 300	2009	*	*
2017	Gasolina	NP300	2008	Isuzu	ELF300
2017	Gasolina	NP300	2008	*	*
2017	Gasolina	NP300	2008	Nissan	NP300
2016	Diésel	Hino 300	2008	Nissan	NP300
2016	Diésel	NP300	2007	Nissan	Frontier
2016	Diésel	ELF300	2007	Ford	Ranger
2016	Diésel	Hino 300	2007	*	*
2015	Diésel	ELF300	2006	Volkswagen	Eurovan
2014	Gasolina	Kangoo	2006	Nissan	NP300
2013	Diésel	ELF200	2004	Mercedes	Sprinter
2012	Diésel	NP300	*	*	*

\*No presentaron información en el registro público vehicular.



**Fig. 2.** Dispositivo empleado para el registro de datos.

Posteriormente, la actividad vehicular se caracterizó con una serie de indicadores de velocidad, aceleración y modos de conducción, llamados “estadísticas objetivo”. Los indicadores o criterios de evaluación presentados en este proyecto son similares a los utilizados por Hung et al. (2007). Los parámetros seleccionados, así como sus definiciones, se muestran en el **cuadro II**.

Después, la base de datos de actividad vehicular se dividió en microviajes para su procesamiento. Con

ello, el conjunto de indicadores en las estadísticas objetivo fue simplificada por medio de un análisis de componentes principales (ACP), utilizando la matriz de datos de microviajes y estadísticas objetivo. Por último, se realizó un análisis de conglomerados por el método de k-medias tomando como base las componentes principales extraídas durante el ACP, con el fin de clasificar los microviajes en distintos grupos según sus patrones de operación.

### Desarrollo del ciclo de conducción

Para esta etapa de prueba se construyeron 10 ciclos empleando el método de la cadena de Markov (Peng et al. 2019, Desinedi et al. 2020, Zhao et al. 2020), para posteriormente seleccionar un ciclo de conducción definitivo con base en el análisis de valores de desempeño de cada ciclo de prueba (ecuación 1):

$$VD = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^P \left| \frac{\theta_t - \theta_i}{\theta_t} \right| \quad (1)$$

donde  $p$  es el número de parámetros empleados para evaluar el ciclo,  $\theta_t$  los valores de las estadísticas objetivo y  $\theta_i$  las estadísticas del ciclo en evaluación.

### Modelación de emisiones contaminantes

Por último, se empleó el software MOVES3 para analizar las diferencias de emisiones entre el ciclo

**CUADRO II.** PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE ACTIVIDAD VEHICULAR.

Parámetros de operación	Definición	Indicadores estadísticos
Duración de recorrido	Tiempo de microviaje	Promedio ( $D$ )
Velocidad	—	Promedio total ( $v$ ) y promedio de movimiento ( $v_m$ )
Media cuadrática de la aceleración	$a_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{aceleración}^2}{n}}$	
Energía cinética positiva	$ECP = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n-1} (v_{i+1}^2 - v_i^2)$	
Cambios de aceleración-deceleración y viceversa	—	Promedio ( $C$ )
Modos de operación		
Aceleración	$\alpha \geq 0.1 \text{ m/s}^2$	Promedio ( $a$ ), proporción del tiempo ( $P_a$ )
Deceleración	$\alpha \leq -0.1 \text{ m/s}^2$	Promedio ( $d$ ), proporción del tiempo ( $P_d$ )
Velocidad crucero	$\alpha \leq  0.1 \text{ m/s}^2 , v > 5 \text{ m/s}$	Proporción del tiempo ( $P_c$ )
Modo lento	$\alpha \leq  0.1 \text{ m/s}^2 , v < 5 \text{ m/s}$	Proporción del tiempo ( $P_{cr}$ )
Ralentí	$v = 0$ (motor en marcha)	Proporción del tiempo ( $P_r$ )

Fuente: Elaboración propia con base en Hung et al. (2007).

de conducción local y los ciclos internacionales. Dentro de sus configuraciones se aplicó la escala de proyecto para considerar características del entorno local, como flota vehicular, composición del combustible, propiedades meteorológicas y patrones de conducción correspondientes a cada ciclo modelado.

Durante este proceso se simularon gases de efecto invernadero (GEI) como óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ). Además, se estimaron emisiones de contaminantes criterio: óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y partículas atmosféricas ( $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ ), ya que autores como Dablanc (2008), Yang et al. (2015) y Singh et al. (2016) coinciden en que éstos son los contaminantes más comunes liberados por los vehículos de reparto.

## RESULTADOS

### Recolección y análisis de actividad vehicular

La adquisición de datos de campo se realizó en el periodo septiembre-octubre de 2020, tiempo en el que se registraron 37 recorridos equivalentes a 6.44 h de actividad vehicular (cantidad similar a la registrada por Yang et al. [2020]). La información se registró de lunes a sábado entre las 08:00 y 12:00 y las 15:30 a 18:00 horas, cubriendo tanto los horarios permitidos para maniobras de carga y descarga en la zona de estudio, así como horarios adyacentes en los que se incumple esta reglamentación.

Los 37 recorridos realizados se enlazaron para formar una base de datos con el objetivo de conocer las principales características de conducción observadas en la ZMHQ. En la **figura 3** se presentan las características principales de la actividad vehicular total registrada; asimismo, se incluyen de manera desagregada los resultados para cada tipo de vialidad dentro de la zona de estudio.

A partir de lo anterior se puede inferir que la operación dentro de la ZMHQ está dominada por los estados de aceleración y deceleración, ocupando más del 65 % de la actividad vehicular. Además, los vehículos observados operan dentro del rango menos eficiente de motores de combustión. Estas características cobran importancia, ya que autores como Tong (2000), Chindamo y Gadola (2018) y Huertas et al. (2018) coinciden en que éstas se encuentran fuertemente ligadas al consumo de energía y la producción de emisiones contaminantes.

### Procesamiento de datos

El conjunto de registros de actividad vehicular fue convertido a 221 microviajes. Los 13 indicadores establecidos como estadísticas objetivo se emplearon para describir y analizar cada uno de ellos.

Durante el análisis de componentes principales se siguió el criterio de Kaiser-Harris (Jolliffe 2002) para seleccionar las variables a retener. Mediante este proceso, el conjunto de variables analizadas se redujo a tres, reteniendo el 78 % de la varianza total. Estas tres variables describen las características de velocidad, aceleración y dinámica de los vehículos evaluados.

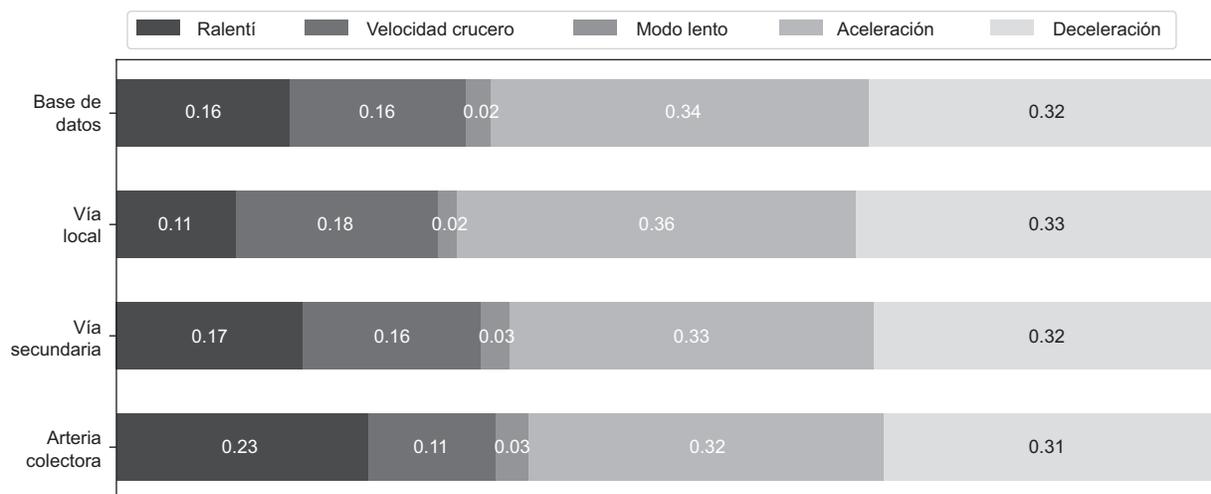


Fig. 3. Características de conducción en la zona de estudio.

Después se hizo un análisis de conglomerados para clasificar los microviajes similares en diferentes categorías de acuerdo con sus patrones y características. Como resultado del análisis por k-medias, los 221 microviajes se subdividieron en cuatro grupos o conglomerados, resultando 96 microviajes en el grupo uno, 48 en el dos, 43 en el tres y 34 en el cuatro. En el **cuadro III** se exponen las características promedio diferenciadoras de cada conglomerado.

### Desarrollo de ciclos de conducción

La construcción y selección de ciclos representativos fue realizada por medio de un proceso iterativo con un código elaborado en Python. El algoritmo contó con dos condiciones especiales: 1) dado que la duración promedio de los microviajes obtenidos fue de 99 s, el algoritmo concatena 12 de ellos, de tal forma que la duración del ciclo representativo esté alrededor de los 1200 s, duración comúnmente utilizada para el desarrollo de ciclos de conducción (Hung et al. 2007). Como segunda condición, las características del ciclo resultante se comparan con las estadísticas objetivo presentadas en la sección de

recolección y análisis de la actividad vehicular. Si cada una de ellas presenta un error relativo menor al 5 %, el ciclo es considerado aceptable y se toma en cuenta para su posterior evaluación.

Se elaboró un conjunto de 10 ciclos de prueba, los cuales fueron analizados por medio de su valor de desempeño para elegir el ciclo de manejo definitivo. El ciclo seleccionado resultó con valor de desempeño de 0.0206, es decir 2.06 % de error en comparación con las características de operación de los datos de seguimiento observadas en el área de estudio y duración de 1205 s.

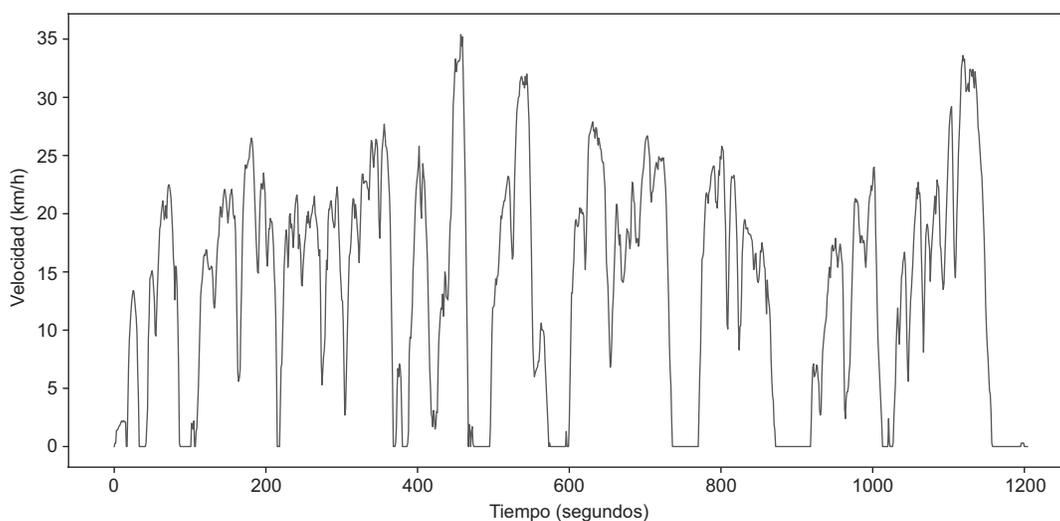
En el **cuadro IV** se comparan las estadísticas objetivo y las estadísticas del ciclo de conducción para la zona de monumentos históricos de Querétaro (ZMHQ). Por último, en la **figura 4** se expone el ciclo de conducción sintetizado de manera gráfica como un perfil velocidad-tiempo. El ciclo tiene una velocidad media de 13.63 km/h y máxima de 35.4 km/h. Además, se presentan alrededor ocho períodos de inactividad, los cuales reflejan comportamientos típicos de la zona con aproximadamente 1.75 paradas por km.

CUADRO III. CARACTERÍSTICAS DIFERENCIADORAS DE CADA CONGLOMERADO.

Parámetro	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Velocidad promedio (km/h)	15.61	6.68	5.78	17.31
Aceleración promedio ( $m/s^2$ )	0.35	0.45	0.39	0.54
Deceleración promedio ( $m/s^2$ )	-0.38	-0.46	-0.35	-0.59
Proporción del tiempo en ralentí (%)	0.08	0.46	0.16	0.13
Duración promedio de microviajes (s)	154.81	75.86	44.08	60.12

**CUADRO IV.** COMPARACIÓN DE INDICADORES DE DATOS DE CAMPO Y CICLO DE CONDUCCIÓN EN LA ZONA DE MONUMENTOS HISTÓRICOS DE QUERÉTARO (ZMHQ).

Indicador	Datos de campo	ZMHQ	Error relativo (%)
Velocidad promedio (km/h)	13.93	13.63	2.15
Velocidad promedio en movimiento (km/h)	16.76	16.42	2.02
Aceleración promedio ( $m/s^2$ )	0.45	0.43	4.46
Deceleración promedio ( $m/s^2$ )	-0.47	-0.46	2.48
Media cuadrática de aceleración ( $m/s^2$ )	0.54	0.54	0.52
Energía cinética positiva ( $m/s^2$ )	0.34	0.32	4.38
Proporción del tiempo en ralentí (%)	0.14	0.15	3.41
Proporción del tiempo en aceleración (%)	0.34	0.33	0.36
Proporción del tiempo en deceleración (%)	0.32	0.32	0.36
Cambios de aceleración-deceleración y viceversa	19.64	20.08	2.24
Duración promedio de microviajes (s)	99.83	100.41	0.59

**Fig. 4.** Ciclo de conducción determinado en la zona de monumentos históricos de Querétaro.

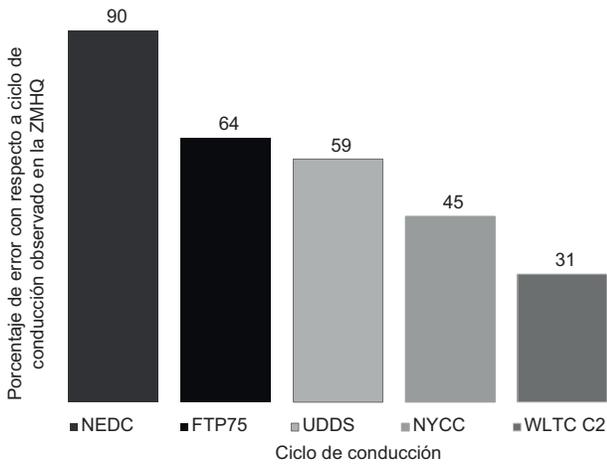
### Comparación con ciclos internacionales

En México, los límites máximos permisibles de emisiones móviles están establecidos en la NOM-044-SEMARNAT-2017 (SEMARNAT 2018), la cual incluye dos ciclos de conducción para emplearlos como herramienta para la certificación de los vehículos comercializados en el país: el FTP75 y el NEDC. Por otro lado, existen otros ciclos internacionales como el Ciclo de Conducción Urbano de Dinamómetro (UDDS), el Ciclo de la Ciudad de Nueva York (NYCC) y el reciente Procedimiento de Prueba de Vehículos Ligeros Armonizado a Nivel Mundial (WLTP), este último elaborado para tres distintas clases vehiculares según su relación potencia/peso (RPP) en kW/t (en este estudio se a el ciclo clase dos para vehículos con relación potencia/peso mayor a 22 y menor que 34 kW/t).

En la **figura 5** se observa que existe una gran imprecisión en los ciclos de conducción aplicados a México respecto al ciclo de conducción desarrollado. De manera contraria, el ciclo WLTP clase dos reduce el porcentaje de error al 31 %, siendo éste el que mejor refleja los estilos de manejo en la zona de estudio.

### Emisiones móviles modeladas

En la sección anterior se observaron las diferencias de operación que hay entre los ciclos internacionales adoptados por la normativa mexicana y el ciclo de conducción ZMHQ. Para plasmar estas diferencias en términos de emisiones contaminantes, cuatro ciclos de conducción fueron simulados en el programa MOVES: el ciclo desarrollado durante este proyecto y los ciclos internacionales FTP, NEDC y WLTP clase dos.



**Fig. 5.** Porcentajes de error de los ciclos de referencia con relación al ciclo de conducción observado en la zona de monumentos históricos de Querétaro (ZMHQ). NEDC: Nuevo Ciclo Europeo de Conducción, FTP75: Procedimiento de Ensayo Federal 75, WLTC C2: Procedimiento de Prueba de Vehículos Ligeros Armonizado a Nivel Mundial clase dos.

***Emisión de gases criterio***

Aun cuando este tipo de gases no contribuye de manera directa al calentamiento global, lo hace de forma indirecta, potenciando la formación de GEI como el ozono, los cuales, según la Organización Mundial de la Salud son potenciales causantes de enfermedades en el sistema respiratorio (OMS 2021). Los factores de emisión límite de estos gases (0.74 g/km para CO y 0.125 g/km para NO<sub>x</sub>) están plasmados en la NOM-044-SEMARNAT-2017 (SEMARNAT 2018).

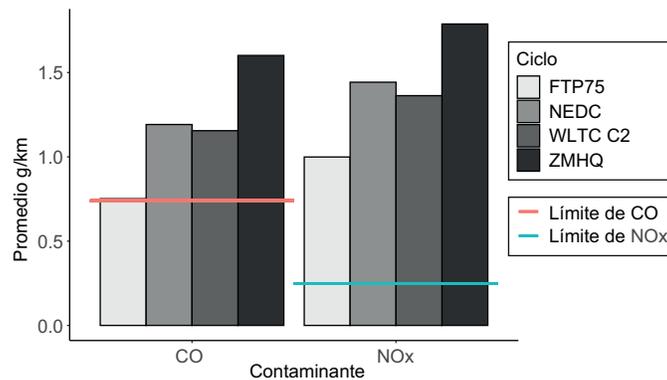
Los factores de emisión estimados en CO y NO<sub>x</sub> para los vehículos a diésel se presentan en la **figura 6**. Los resultados muestran que, con la flota vehicular considerada, se superan los valores límite para todos

los ciclos de conducción modelados. En particular, con el ciclo desarrollado en la investigación, los límites se ven rebasados en 142 y 1332 % para CO y NO<sub>x</sub>, respectivamente. Por otro lado, es evidente que la adopción de los ciclos internacionales produce una subestimación de las potenciales emisiones de los vehículos evaluados. Así, considerando el NEDC, la subestimación sería de aproximadamente 22 %, y en el caso del ciclo FTP75 las emisiones estimadas son 48 % menores que para el ciclo de conducción local.

En términos de salud humana, las partículas atmosféricas son algunos de los contaminantes más peligrosos, ya que han sido catalogados por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer como cancerígenos (IARC 2012). En el **cuadro V** se muestran los resultados obtenidos en la simulación. Al igual que en el caso de los gases reactivos, los mayores factores de emisión corresponden al ciclo desarrollado en este proyecto y los menores para el ciclo americano. Los valores de emisión para cada contaminante son similares entre sí, siendo en promedio 8.7 % mayores para las partículas menores a 10 μm. Respecto a los factores por tipo de combustible, los correspondientes a vehículos de gasolina, representarían apenas el 1 % de las partículas atmosféricas producidas.

***Emissiones de gases de efecto invernadero***

Los GEI son los principales causantes del cambio climático. A través de MOVES y con la información recabada durante el trabajo de campo, se estimaron los factores de emisión para CO<sub>2e</sub>, el cual representa en términos de dióxido de carbono la suma de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O considerando el potencial de calentamiento global de cada uno (**Cuadro VI**).



**Fig. 6.** Factores de emisión simulados para CO y NO<sub>x</sub>. ZMHQ: zona de monumentos históricos de Querétaro, NEDC: Nuevo Ciclo Europeo de Conducción, FTP75: Procedimiento de Ensayo Federal 75, WLTC C2: Procedimiento de Prueba de Vehículos Ligeros Armonizado a Nivel Mundial clase dos.

**CUADRO V.** FACTORES DE EMISIÓN PARA PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS (g/km).

Contaminante	Ciclo	Combustible	
		Diésel	Gasolina
PM <sub>10</sub>	ZMHQ	0.1803	0.0014
	FTP75	0.0967	0.0013
	NEDC	0.1520	0.0011
	WLTP C2	0.1390	0.0011
PM <sub>2.5</sub>	ZMHQ	0.1659	0.0013
	FTP75	0.0890	0.0011
	NEDC	0.1398	0.0010
	WLTP C2	0.1279	0.0010

ZMHQ: zona de monumentos históricos de Querétaro, NEDC: Nuevo Ciclo Europeo de Conducción, FTP75: Procedimiento de Ensayo Federal 75, WLTP C2: Procedimiento de Prueba de Vehículos Ligeros Armonizado a Nivel Mundial clase dos.

**CUADRO VI.** FACTORES DE EMISIÓN PARA GASES EFECTO INVERNADERO EN VEHÍCULOS A DIÉSEL.

Ciclo	ZMHQ	NEDC	FTP75	WLTP C2
g/km	603.39	490.41	393.07	476.49
ton-año	14.40	11.71	9.38	11.37

Nota: Para el cálculo de emisiones en t/año se consideraron 23 871 km recorridos anualmente (Solís y Sheinbaum 2017).

ZMHQ: zona de monumentos históricos de Querétaro, NEDC: Nuevo Ciclo Europeo de Conducción, FTP75: Procedimiento de Ensayo Federal 75, WLTP C2: Procedimiento de Prueba de Vehículos Ligeros Armonizado a Nivel Mundial clase dos.

Los resultados obtenidos son comparables con los obtenidos por Amirjamshidi y Roorda (2015), quienes en un estudio para vehículos medianos de carga en Toronto, obtuvieron factores de emisión de 729.18 y 801.23 g/km, para vehículos de gasolina y diésel respectivamente.

## DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, se muestra que los ciclos establecidos en la normativa mexicana carecen de representatividad respecto a las condiciones de operación dentro de la zona de estudio, y presumiblemente de manera generalizada dentro de las ciudades mexicanas, especialmente para la actividad vehicular del transporte urbano de carga. Por otra parte, entre los ciclos internacionales, la mayor similitud en la actividad vehicular

promedio se encontró para los ciclos WLTP, con porcentajes de error de alrededor del 30 %. Esta semejanza indica la necesidad de distinguir entre ciclos de conducción para representar a las distintas clases vehiculares, así como para los diferentes sistemas de transporte.

En referencia a las emisiones simuladas para cada combustible, entre todos los contaminantes modelados existe una tendencia de marcada superioridad por parte de los factores de emisión correspondientes al diésel, particularmente en las emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas atmosféricas, las cuales son siete y 128 veces mayores que las de gasolina, respectivamente. Las razones que explican lo anterior son: 1) la composición de los combustibles y 2) la edad vehicular de la flota simulada, ya que, en el caso de los vehículos a gasolina, más del 50 % de los vehículos observados tienen tres años o menos de antigüedad, mientras que los vehículos a diésel estudiados tienen en promedio nueve años en uso.

Las diferencias de emisiones entre cada ciclo están relacionadas con los patrones de operación de los ciclos de conducción. Tong (2000) encontró que velocidades bajas y los estados de aceleración y desaceleración potencian la producción de emisiones contaminantes. En relación con las bajas velocidades, el ciclo correspondiente a la ZMHQ presenta velocidades promedio por debajo de los 20 km/h, incluso considerando sólo los períodos con velocidades mayor a cero, mientras que los ciclos legislativos aplicados en México tienen medias de velocidad mayores a los 30 km/h. En lo que se refiere a las aceleraciones y deceleraciones, las diferencias son notorias, principalmente en el número de cambios entre un estado y otro. Por un lado, los ciclos ZMHQ y WLTP C2 contienen variaciones abruptas de aceleración positivas y negativas; de manera paralela, contienen un número importante de transiciones de aceleración a deceleración y viceversa. Por otro lado, el NEDC tiene la particularidad de ser un ciclo “artificial”, por lo que está formado por aceleraciones y deceleraciones agresivas, constantes y con una duración prolongada. Por último, el ciclo FTP75 contiene una menor cantidad de transiciones de estado y sus periodos de aceleración y deceleración son más largos.

Es importante mencionar que, las estrategias nacionales de mitigación de emisiones móviles para el transporte de carga se centran principalmente en el autotransporte federal. No obstante, su aplicación al transporte urbano de carga implicaría múltiples beneficios. Políticas como el financiamiento para la renovación de flotillas vehiculares o la comercialización de diésel de azufre ultrabajo, son alternativas a

corto plazo que pudiesen contribuir considerablemente en la disminución de emisiones de gases como  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ ; ello, además de la correcta implementación de la NOM-044-SEMARNAT-2017 (SEMARNAT 2018) con tecnologías EuroVI/EPA2010 en los vehículos a diésel del país.

Por su parte, la utilización de combustibles alternativos como el gas natural y la energía eléctrica constituyen otro escenario potencial de mitigación de emisiones móviles; sin embargo, la utilización de estos combustibles necesitaría de un periodo de transición en el cual se desarrollaran estrategias para regular y promover su uso, además de impulsar la inversión para proveer la infraestructura necesaria para la recarga de estos combustibles.

## CONCLUSIONES

En esta investigación se desarrolló un ciclo de conducción representativo de los vehículos urbanos de carga en la Zona de Monumentos Históricos de Querétaro, con el fin de conocer las condiciones de operación, en una zona urbana congestionada típica de México. El ciclo resultante fue comparado con los ciclos establecidos en las normas mexicanas (FTP75 Y NEDC), los resultados indican que estos ciclos carecen de representatividad con respecto del ciclo para la ZMHQ. Las altas velocidades y aceleraciones prolongadas presentes en estos ciclos reflejarían de mejor manera los patrones de conducción en zonas con vías rápidas o con menores niveles de congestión.

De manera paralela, el ciclo ZMHQ se contrastó con ciclos internacionales de referencia, lo cual arrojó una mayor similitud con el WLTP clase dos. Esto se debería principalmente a dos razones: 1) la desagregación por clases vehiculares permite representar de manera precisa los patrones de conducción para los distintos tipos de vehículos y 2) al ser un ciclo de manejo con apenas cinco años de antigüedad, refleja patrones de operación actuales, ya que éstos pueden cambiar a través de los años debido al crecimiento urbano, innovaciones en tecnología vehicular y crecimiento de las flotas vehiculares.

En relación con las emisiones simuladas, se observaron problemas al adoptar ciclos de conducción internacionales. Los resultados permiten observar que, en comparación con el ciclo de conducción determinado en la zona de estudio, las emisiones se pueden subestimar en 19 % para  $\text{NO}_x$  y 25 % para  $\text{CO}$  si se adopta el ciclo FTP75, mientras que para el NEDC se presentan subestimaciones del 31

y el 53 % para  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ , respectivamente. Esto lleva a conflictos en la formulación de políticas públicas para la reducción de emisiones móviles, ya que desde la raíz del desarrollo de la estrategia se consideran mediciones imprecisas, lo cual conduce al establecimiento de soluciones menores a las realmente necesarias. Cabe mencionar que esta situación, además de obstruir la lucha contra el cambio climático en el país, puede representar un problema de salud pública en el largo plazo, exponiendo a la población a concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  mayores a las proyectadas.

Los resultados de esta investigación pueden complementarse mediante la implementación un proyecto a mayor escala en el que se aplique una técnica de adquisición de datos híbrida que permita la obtención de una base de datos de actividad vehicular robusta representativa de los patrones de operación de una zona de mayor extensión urbana. También es posible alcanzar una mayor precisión en los resultados relacionados con las emisiones contaminantes utilizando un simulador dinámico de vehículos, el cual permita considerar no sólo las velocidades sino también los requerimientos de potencia de los vehículos a lo largo sus recorridos (Jazcilevich et al. 2007).

## REFERENCIAS

- Amirjamshidi G. y Roorda M.J. (2015). Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy-duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 34, 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.11.010>
- CalEPA (1993). Characterization of driving patterns and emissions from light duty vehicles in California. California Environmental Protection Agency. Reporte. Sacramento, California, EUA, 140 pp.
- Betanzo E. (2011). Una aproximación metodológica al estudio integrado del transporte urbano de carga: el caso de la Zona Metropolitana de Querétaro en México. *Eure* 37 (112), 63-87. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612011000300004>
- Chindamo D. y Gadola M. (2018). What is the most representative standard driving cycle to estimate diesel emissions of a light commercial vehicle? *IFAC-PapersOnLine* 51 (5), 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.213>
- Dablanc L. (2008). Urban goods movement and air quality policy and regulation issues in European Cities. *Journal of Environmental Law* 20 (2), 245-266. <https://doi.org/10.1093/jel/eqn005>

- Desineedi R.M., Mahesh S. y Ramadurai G. (2020). Developing driving cycles using k-means clustering and determining their optimal duration. *Transportation Research Procedia* 48, 2083-2095. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.268>
- Huertas J.I., Díaz J., Cordero D. y Cedillo K. (2018). A new methodology to determine typical driving cycles for the design of vehicles power trains. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 12 (1), 319-326. <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0379-y>
- Hung W.T., Tong H.Y., Lee C.P., Ha K. y Pao L.Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12 (2), 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.01.002>
- IARC (2012). Gases de escape de los motores diésel son carcinógenos. Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer [en línea]. [https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr213\\_S-1.pdf](https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr213_S-1.pdf) 12/02/2022
- IMPLAN (2011). Plan de manejo y conservación de la zona de monumentos históricos de Santiago de Querétaro. Instituto Municipal de Planeación del Municipio de Querétaro. Documento Técnico. Querétaro, México, 497 pp.
- INEGI (2020). Directorio estadístico nacional de unidades económicas. Instituto nacional de Estadística y Geografía [en línea]. <https://en.www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/20/06/2020>
- Jazcilevich A., García-Fragoso A., Reynoso A., Grutter M., Diego-Ayala U., Lents J. y Davis N. (2007). Vehicle emissions system using a car simulator and a geographical information system: Part 1-system description and testing. *Journal of the Air and Waste Management Association* 57 (10), 1234-1240. <http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.57.10.1234>
- Jolliffe I.T. (2002). *Principal component analysis*. 2a ed. Springer-Verlag, Nueva York, EUA, 487 pp. <https://doi.org/10.2307/1270093>
- Ochoa J., Betanzo E. y Romero J. (2021). A modeling and micro-simulation approach to number and size of loading/unloading bays: A case study in the city of Querétaro, México. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 10, 100400. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100400>
- OMS (2021). Contaminación del aire ambiente (exterior). Organización Mundial de la Salud [en línea]. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) 12/02/2022
- Peng Y., Zhuang Y. y Yang Y. (2019). A driving cycle construction methodology combining k-means clustering and Markov model for urban mixed roads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering* 234, 714-724. <https://doi.org/10.1177/0954407019848873>
- Seers P., Nachin G. y Glaus M. (2015). Development of two driving cycles for utility vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 41, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.013>
- SEMARNAT (2018). Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017. Que establece los límites máximos permisibles de emisión de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no metano, hidrocarburos no metano más óxidos de nitrógeno, partículas y amoníaco, provenientes del escape de motores nuevos que utilizan diésel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor a 3857 kilogramos, así como del escape de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipados con este tipo de motores. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México, 19 de febrero de 2018.
- Singh D., Shukla S. P., Sharma M., Behera S. N., Mohan D., Singh N. B. y Pandey G. (2016). GIS-based on-road vehicular emission inventory for Lucknow, India. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* 20 (4), 4014006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000244)
- Tong H.Y., Hung W.T. y Cheung C.S. (2000). On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. *Journal of the Air and Waste Management Association* 50 (4), 543-554. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464041>
- Yang X.F., Liu H., Man H.Y. y He K.B. (2015). Characterization of road freight transportation and its impact on the national emission inventory in China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15 (4), 2105-2118. <https://doi.org/10.5194/acp-15-2105-2015>
- Yang Y., Li T., Zhang T. y Yu Q. (2020). Time dimension analysis: Comparison of Nanjing local driving cycles in 2009 and 2017. *Sustainable Cities and Society* 53, 101949. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101949>
- Yuhui P., Yuan Z. y Huibao Y. (2019). Development of a representative driving cycle for urban buses based on the K-means cluster method. *Cluster Computing* 22, 6871-6880. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1673-y>
- Zhao X., Zhao X., Yu Q., Ye Y. y Yu M. (2020). Development of a representative urban driving cycle construction methodology for electric vehicles: A case study in Xi'an. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 81, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102279>