

## **Memorandum**

**Para:** Tim Dallmann, ICCT  
Leticia Pineda, ICCT

**De:** John Koupal, ERG  
Cindy Palacios, ERG

**Fecha:** 1 de marzo 2021

**Asunto:** Análisis de los niveles de RSD HC de la Ciudad de México en 2019

## **Antecedentes**

Eastern Research Group (ERG) analizó los datos de sensor remoto (*Remote Sensing Data*, o RSD) en carretera recolectados en varias ubicaciones de la Ciudad de México durante la campaña de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) de 2019. Según lo solicitado por el ICCT, nuestro análisis se enfocó en las tendencias de emisión de HC (hidrocarburos) para vehículos ligeros, incluyendo taxis, y las indicaciones de exceso de emisiones evaporativas en estas lecturas. Nuestro enfoque se basó en un análisis de los RSD de la Ciudad de México de 2016 publicado en por Koupal y Palacios (2019).<sup>1</sup> Este estudio encontró que las emisiones promedio de HC por año-modelo de los vehículos registrados por los RSD de la Ciudad de México aumentaron rápidamente en los últimos tres años; estuvieron en un orden de magnitud más alto que el Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO) de la Ciudad de México –que mide solamente emisiones de escape– y de los RSD del área de Denver, en Estados Unidos; y al utilizar la correlación agregada de HC:CO, se identificaron altas emisiones evaporativas potenciales mediante la comparación con las mediciones de evaporación en campo en Estados Unidos. Como se detalla en las siguientes secciones, para este proyecto se evaluó la existencia de tendencias similares en los datos de 2019, y se comparó un pequeño subconjunto de vehículos presentes en los datos de 2016 y 2019.

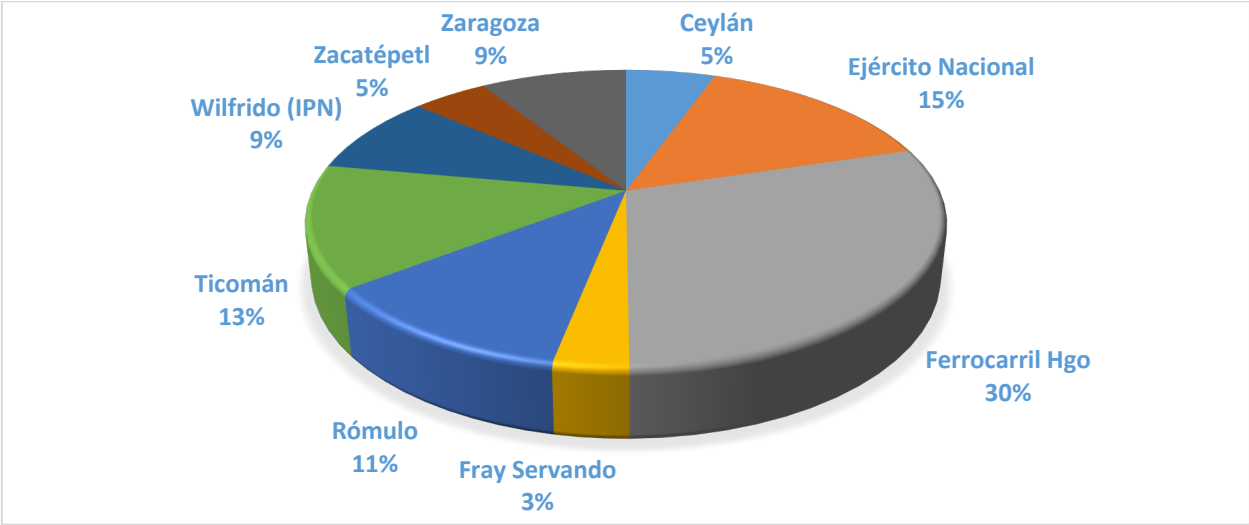
## **Datos analizados**

El ICCT proporcionó el conjunto de datos de Koupal y Palacios (2019) con un total de 34,839 registros, que representan una mezcla de tipos de vehículos y ubicaciones en México.

---

<sup>1</sup> John Koupal and Cynthia Palacios, *Impact of new fuel specifications on vehicle emissions in Mexico*, Atmospheric Environment Volume 201 (2019). 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.028>.

Basándonos en la placa, el 52 % tenían domicilio en la Ciudad de México (CDMX), el 33 % en el Estado de México (EdoMex), y el 15 % en otros estados. La Figura 1 muestra el desglose de las lecturas de RSD por ubicación de medición en la Ciudad de México.



**Figura 1. Distribución de las medidas de RSD de 2019 por ubicación**

Una comparación de los RSD recolectados en diferentes años, diferentes vehículos y diferentes ubicaciones introduce una gran variabilidad inexplicable. La variación normal en la velocidad del vehículo, las condiciones meteorológicas y la composición de la flota pueden compensarse con muestras suficientemente grandes de RSD, pero las diferencias sistemáticas, tales como los cambios en la calidad del combustible, pueden sesgar la comparación. Los resultados de la encuesta de 2016 sobre combustibles publicados por Koupal y Palacios (2019) mostraron que la ciudad de México ya estaba en conformidad con los estándares de la NOM 016; se asume que las propiedades del combustible de 2019 son supuestamente similares a las de 2016.

**Preparación de datos y correspondencia de placas**

Para analizar los RSD por tipo de vehículo específico y año-modelo, se necesitan añadir a los RSD los datos de registro del vehículo que coinciden con las placas. El conjunto de datos original que proporcionó el ICCT incluyó esta coincidencia para aproximadamente el 40 % de los registros (14,216). Una solicitud de la SEDEMA a las agencias de registro vehicular de la Ciudad de México y el Estado de México para extraer información de los vehículos con placas no coincidentes en la base de datos de los RSD, arrojó 1,016 registros adicionales en la CDMX y 6,610 registros en el EdoMex. Esto llevó el recuento total de lecturas de RSD asociadas con la información vehicular a 21,842, lo que definió el conjunto de datos utilizado para el análisis posterior. En la CDMX los registros de RSD asociados fueron 10,279 para automóviles de uso particular (*private light-duty vehicles* o LDV privados, por su sigla en inglés); 4,450 para taxis, y los 307 vehículos restantes se repartieron entre vehículos de carga, autobuses y vehículos de uso especial. Los registros del

EdoMex se reportaron casi todos como *transporte de pasaje particular* y fueron identificados por la SEDEMA como empresas de redes de transporte (TNC, por su sigla en inglés), también conocidos como vehículos de viaje compartido, con menos de diez vehículos de otro tipo y cero taxis reportados. No se pudo determinar si estos vehículos eran realmente de viaje compartido o si estaban mezclados con vehículos privados y taxis. Para evaluar si algunos taxis fueron mal clasificados como TNC en el conjunto de datos del EdoMex, se identificaron las marcas y modelos de vehículos que cuentan con los números de taxis más altos en la CDMX, que también son en su mayoría taxis en comparación con uso privado. Nissan Tsuru, Chevrolet Aveo, y Nisan Tiida representaron casi el 70 % de los taxis en los datos de la CDMX. El 80 % de estas marcas son taxis, y por lo tanto su existencia en la flota del EdoMex podría sugerir una clasificación errónea como vehículos privados. Descubrimos que estas tres marcas de vehículos suman alrededor del 7 % de la flota del EdoMex y que sus emisiones promedio de HC son menos de la mitad en las mismas marcas en la CDMX (137 ppm vs. 311 ppm). Dada la incertidumbre sobre si los vehículos del EdoMex eran de viaje compartido, vehículos privados o taxis, se analizaron como un solo grupo. Los tamaños de las muestras por año del modelo para cada conjunto de datos incluido en el análisis se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Tamaño de la muestra de RSD por año del modelo**

Año del modelo	Conjunto de datos de 2016			Conjunto de datos de 2019	
	CDMX LDV Privado	CDMX Taxi	CDMX LDV Privado	CDMX Taxi	EdoMex
<1996	650	5	102		159
1996	66	0	15		16
1997	177	2	27		35
1998	348	3	46		39
1999	365	1	37		32
2000	492	4	63		41
2001	733	9	106		80
2002	828	13	116		64
2003	789	12	99		77
2004	977	16	130		68
2005	1276	61	171		105
2006	1245	360	216		153
2007	1646	553	312	16	181
2008	1977	911	349	122	188
2009	1923	1224	373	391	151
2010	2208	689	434	284	137
2011	2434	792	492	355	148
2012	3322	715	784	422	197
2013	3619	742	806	415	271
2014	2980	952	846	571	308

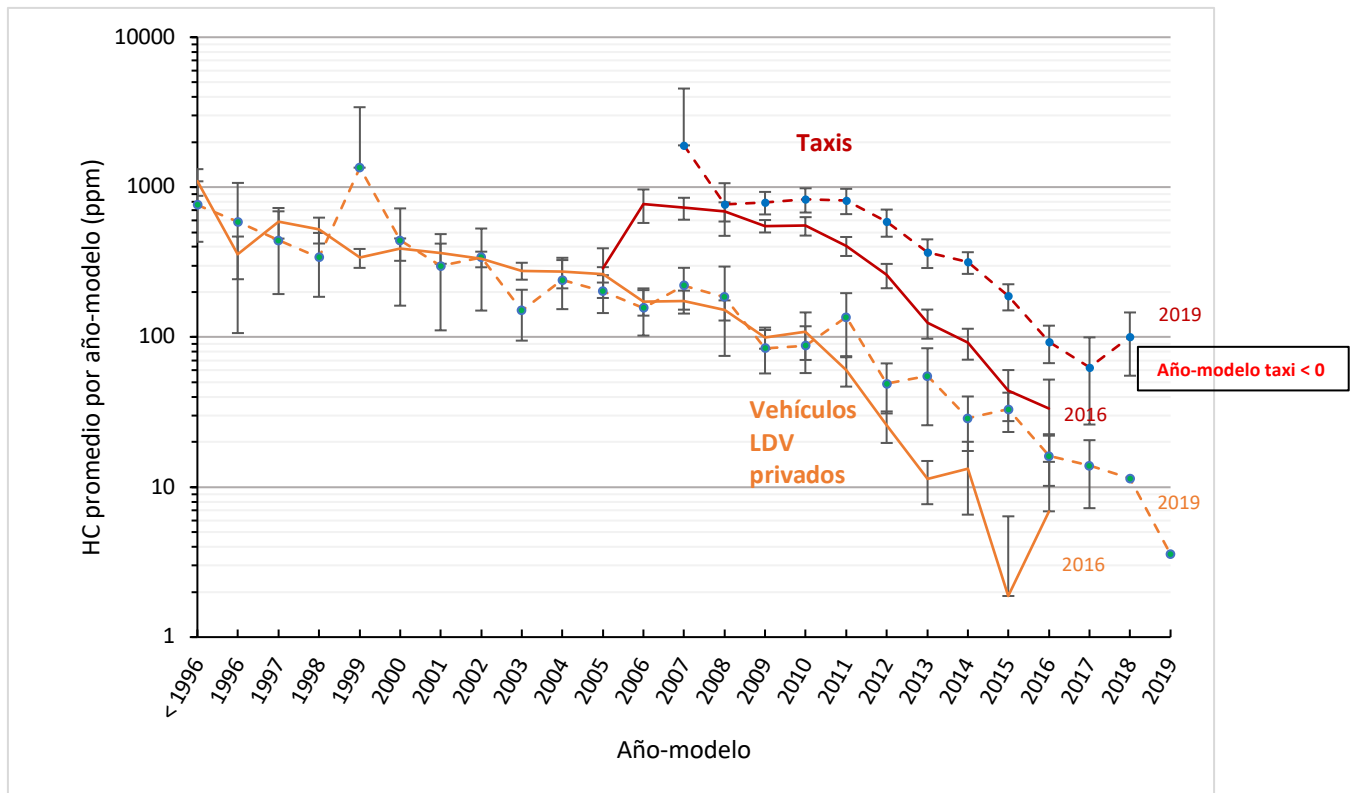
2015	1028	1273	999	690	482
2016	1944	705	1173	449	865
2017	-	-	1024	399	1153
2018	-	-	1110	388	1193
2019	-	-	448	64	520

### Tendencias en antigüedad y año-modelo en la CDMX

Para evaluar si las tendencias observadas en los RSD de 2016 aparecen en los datos de 2019 se compararon los promedios del año del modelo entre los conjuntos de datos, enfocados en los LDV privados y los taxis. Esto se muestra primero en la Figura 2 solamente para la CDMX. Para los vehículos privados, los datos de 2019 exponen emisiones más altas para los años de los modelos 2011 a 2016, lo que indica un deterioro a lo largo de tres años en las emisiones para los vehículos que fueron los más nuevos en la flota de 2016. Las emisiones promedio de HC para los años de los modelos 2011-16 fueron 2.6 veces más altas (160 %) en 2019 frente a 2016; en comparación, un análisis de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, por su sigla en inglés) de los datos programas de inspección y mantenimiento (I/M) de Denver, estimó un incremento en las emisiones de 1.7-2.0 para los vehículos Tier 1 y Tier 2 de Estados Unidos durante un periodo de 20 años.<sup>2</sup> Relativamente, el aumento en tres años fue mucho mayor para los HC que para el CO, el cual aumentó cerca del 30 % en vehículos privados, comparable a las tendencias de deterioro de los Estados Unidos según los datos I/M de Denver. Como se discutirá más adelante, una divergencia en los valores de HC y CO es un marcador de exceso en las emisiones evaporativas de HC, lo cual sugiere que las emisiones evaporativas actúan en el alto deterioro de HC observado en la Ciudad de México. Los modelos de 2010 y años anteriores no muestran una diferencia entre las flotas de 2016 y 2019. Para los taxis, las emisiones promedio para cada año del modelo también fueron significativamente más altas con tres años adicionales de antigüedad.

---

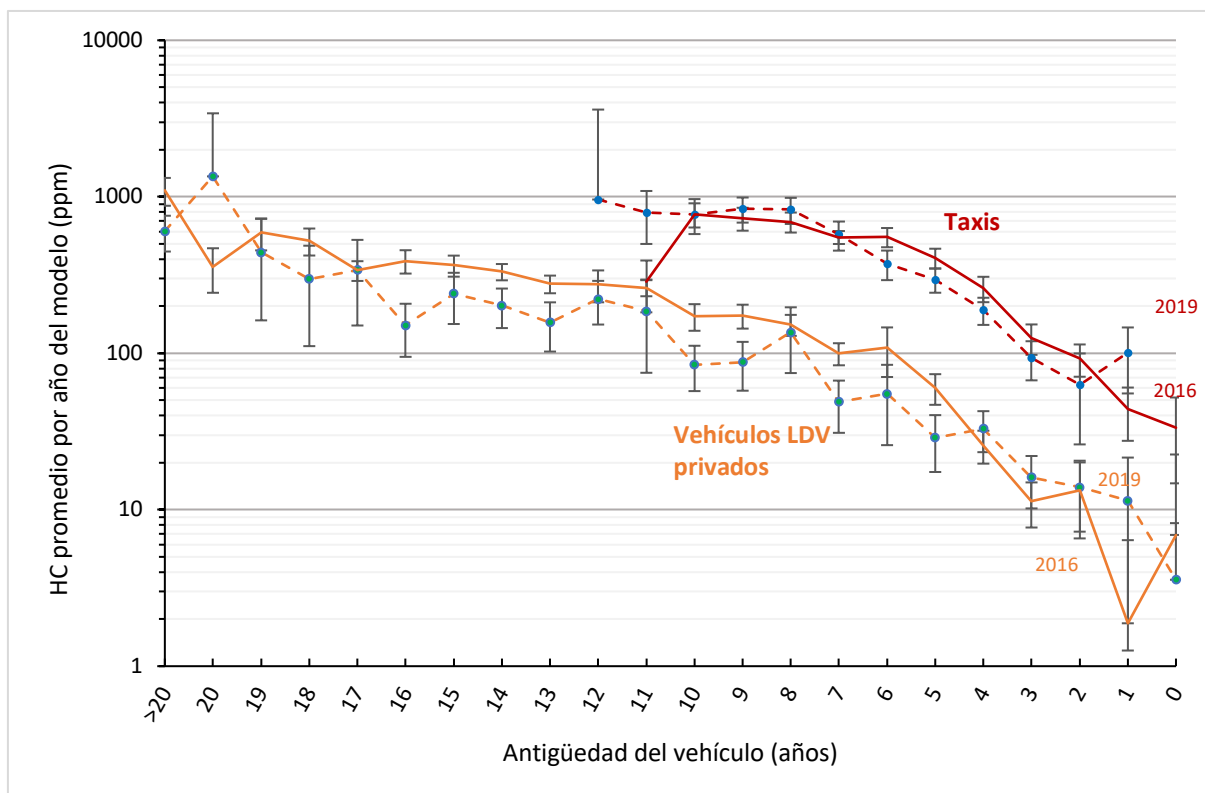
<sup>2</sup> U.S. EPA, *Exhaust Emission Rates for Light-Duty Onroad Vehicles in MOVES3*, EPA Report EPA-420-R-20-019, November 2020.



**Figura 2. HC promedio por año-modelo para vehículos LDV privados y taxis de la CDMX, con Intervalo de confianza del 95 %**

En la Figura 3 se muestra una comparación de los mismos datos por antigüedad del vehículo en lugar del año-modelo. Este análisis de los datos compara la tasa de deterioro de las emisiones a lo largo del tiempo, asumiendo que no existen sesgos sistemáticos por la operación del vehículo, combustibles, etc. Hay un cambio en los año-modelo entre los dos conjuntos de datos, con antigüedad 0 = año-modelo 2016 en el conjunto de 2016, y antigüedad 0 = año-modelo 2019 en el conjunto de 2019. La Figura 3 muestra emisiones más bajas para los LDV privados en el conjunto de datos del 2019 a partir de una antigüedad de 5 años (año-modelo 2014) en comparación con 2016 (año-modelo 2011), con diferencias significativas para casi todas las antigüedades a partir de entonces. Las emisiones por antigüedad en los taxis son más bajas para algunas edades en 2019, aunque la tasa de deterioro es similar entre los dos años.

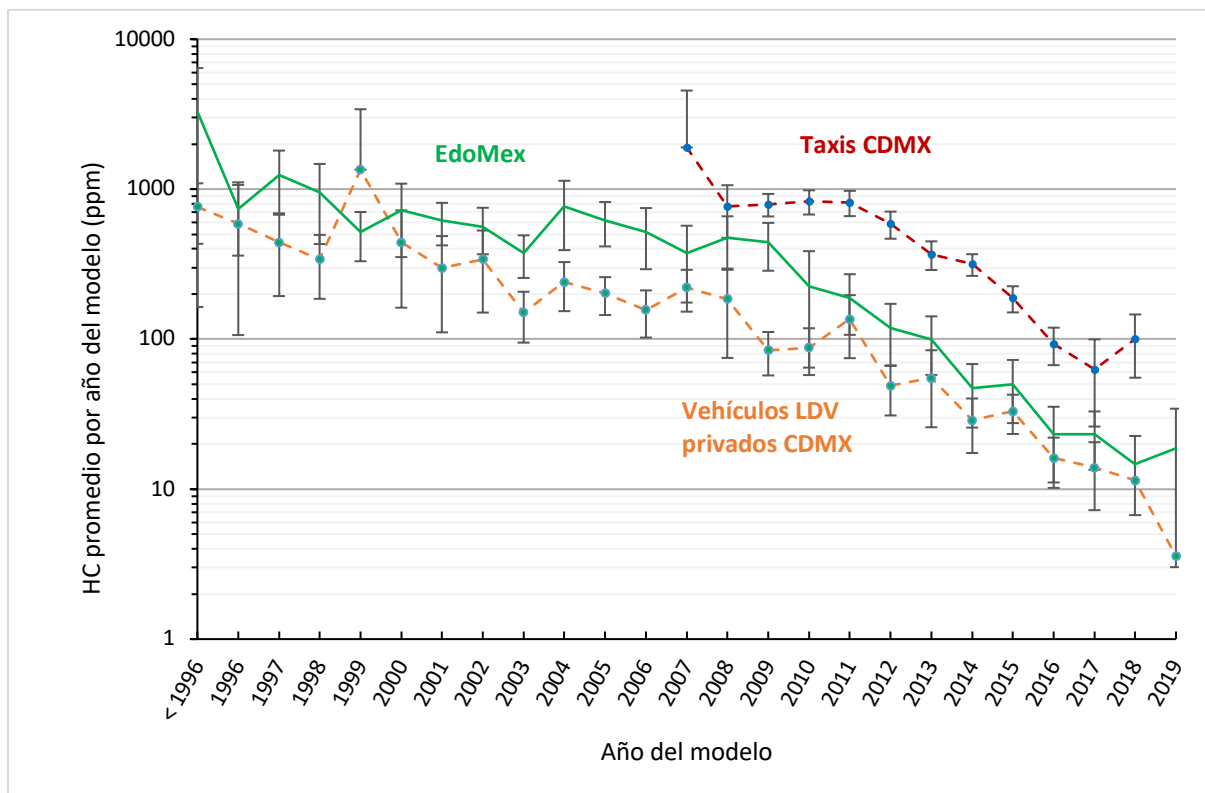
Determinar la razón de las emisiones por antigüedad más bajas de 2019 es un reto, dado que la comparación incluye dos muestras vehiculares diferentes consideradas en ubicaciones distintas, diferentes épocas del año (la muestra de 2019 se recolectó principalmente en abril-mayo, mientras que la de 2016 se realizó en su mayoría en julio-noviembre) y diferentes operaciones. Las posibles razones de una compensación de emisiones podrían incluir la implementación de la norma de emisiones vehiculares NOM 042, el sobre cumplimiento de los estándares a través de vehículos estadounidenses o mejoras en el programa PVVO.



**Figura 3. HC promedio por antigüedad para los vehículos LDV privados en la CDMX, con IC del 95 %**

### CDMX frente a EdoMex

La facilitación de los datos de las placas decodificadas del EdoMex permitió llevar a cabo una comparación entre los vehículos registrados en la CDMX frente a los del EdoMex, lo cual no era posible en la base de datos de 2016. Como se señaló anteriormente, casi todos los vehículos en EdoMex se clasificaron como vehículos de viaje compartido, aunque la composición real de la flota es incierta. La comparación de las emisiones promedio de HC por año-modelo para la CDMX y el EdoMex en 2019 se muestra en la Figura 4, incluyendo para su comparación los resultados para vehículos privados y taxis de la CDMX. La flota del EdoMex se encuentra entre estos dos, con mayores emisiones de HC en comparación con los vehículos privados en la CDMX para casi todos los años-modelos, significativo al 95 % para varios años. Los resultados del EdoMex merecen una mayor investigación; puede que sean indicativos de la influencia del viaje compartido o de los taxis en relación con los vehículos privados, o diferencias en las propiedades del combustible o la eficacia del PVVO entre las dos ubicaciones.



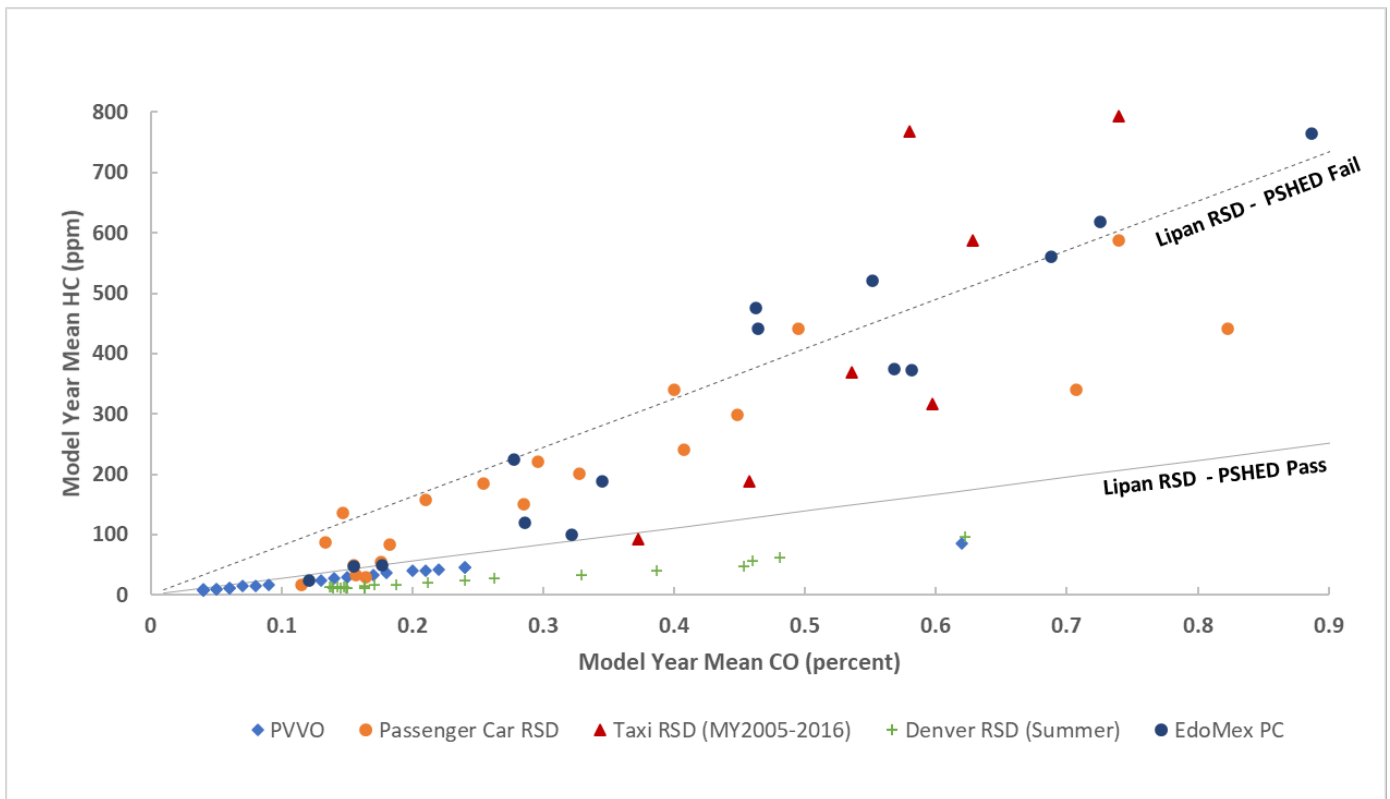
**Figura 4. HC promedio por año-modelo para vehículos de la CDMX y EdoMex, con intervalo de confianza del 95 %**

### Correlación HC:CO

La correlación entre las concentraciones de HC y CO se utilizó como marcador del exceso de emisiones evaporativas. Como se detalla en Koupal y Palacios (2019), este enfoque se adaptó de estudios que infirieren emisiones evaporativas en las mediciones de los RSD basadas en la correlación de HC y contaminantes de escape (principalmente CO<sub>2</sub>) dentro de la muestra de observaciones de 10 milisegundos (ms) típicamente promediadas en una sola “toma” de RSD. Dado que las muestras de RSD de la Ciudad de México carecen de lecturas subyacentes de 10ms, este concepto se adaptó en Koupal y Palacios (2019) para comparar la pendiente del promedio de HC del año-modelo (ppm) con el promedio de CO del año-modelo (%). Esta pendiente es mayor para los vehículos con exceso de emisiones evaporativas, lo que se confirma al comparar la HC:CO de los RSD para una muestra de vehículos con emisiones evaporativas bajas (“pasa”) frente a altas (“falla”), tal como son medidas en un PSHED<sup>3</sup> en la estación Lipan St. I/M de

<sup>3</sup> PSHED son las siglas de *Portable Sealed Housing for Evaporative Determination* (Cámara sellada portátil para la determinación de emisiones evaporativas), que es una carpa de vinilo cerrada de 3 x 6 x 2.5 metros junto con un sistema de medición de emisiones portátil, utilizado por primera vez por la EPA de Estados Unidos para mejorar las estimaciones de la alta prevalencia de emisores evaporativos.

Denver<sup>4</sup>. En Koupal y Palacios (2019) se encontró que la pendiente de HC:CO para los RSD de la Ciudad de México 2016 se correspondía con las lecturas de RSD para vehículos con PSHED altos, mientras que la correlación de HC:CO para las emisiones de escape de PVVO y las de RSD de Denver se correspondía estrechamente con las lecturas de RSD de los vehículos con PSHED baja. La Figura 5 muestra esta comparación repetida con los datos de RSD de 2019. Se incluyeron las muestras del PVVO de la Ciudad de México y de los RSD de Denver de Koupal y Palacios (2019) como referencia, las cuales muestran una correlación lineal comparable a la pendiente de los vehículos de PSHED baja. En contraste, los valores de RSD de 2019 (que se muestran para autos privados de la CDMX, autos privados y taxis del EdoMex) están altamente dispersos con niveles más consistentes con vehículos con PSHED altos. Por lo tanto, los datos de 2019 continúan sugiriendo que las emisiones por evaporación contribuyen a los altos niveles de HC.



**Eje X: CO promedio por año del modelo (%)**

**PVVO**

**RSD de vehículos de pasajeros**

**RSD de taxis (MY 2005-2016)**

**RSD de Denver (verano)**

<sup>4</sup> U.S. EPA, Estimated Summer Hot-Soak Distributions for Denver's Ken Caryl I/M Station Fleet EPA-420-R-14-027 [Distribuciones estimadas de verano de emisiones en reposo con motor caliente para la flota de la estación Ken Caryl I/M de Denver] Preparado por U.S. EPA por Eastern Research Group, Inc., marzo de 2014.



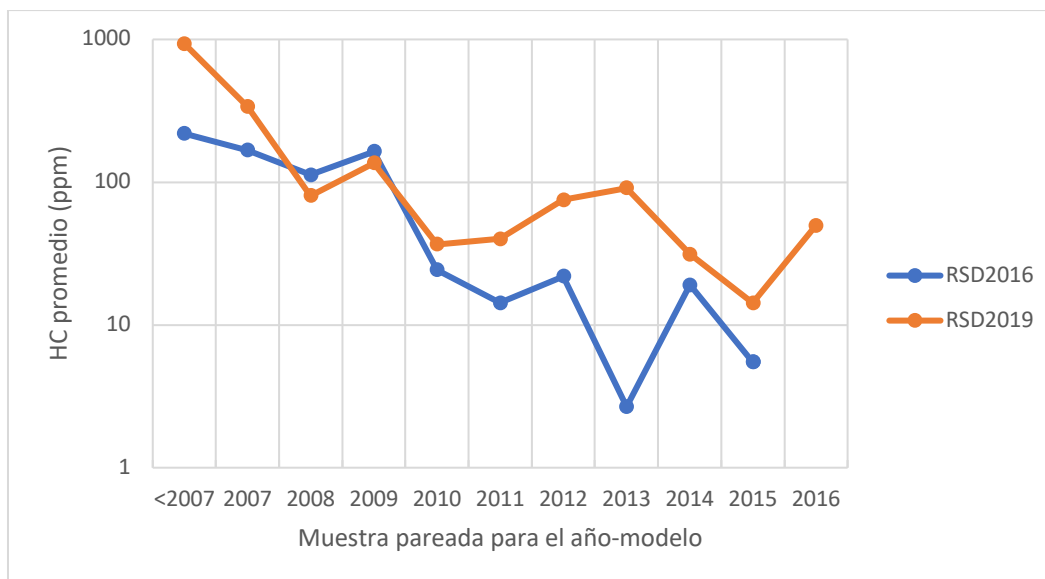
## PC EdoMex

Eje Y: HC promedio por año del modelo (ppm)  
RSD de Lipan – Falla PSHED  
RSD de Lipan – Pasa PSHED

**Figura 5. HC promedio para el año-modelo vs. CO comparado con vehículos de alto y bajo PSHED**

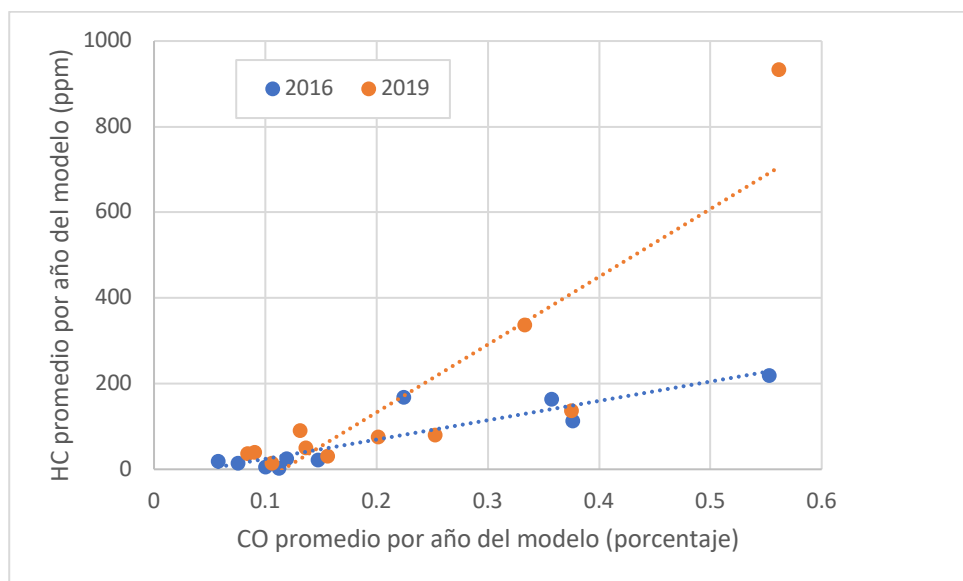
### Análisis comparado

Al hacer coincidir las placas entre los datos de 2016 y 2019, Koupal y Palacios (2019) logró identificar 642 vehículos que aparecieron en ambas muestras: 487 vehículos privados de carga ligera, 45 taxis, 11 otros, y 99 no identificados. Estos vehículos brindan cierta capacidad para observar cambios en las emisiones a lo largo de un periodo de tres años, aunque el tamaño pequeño de la muestra y las diferencias descontroladas en la operación del vehículo, el combustible, el clima y otros factores, dan una variabilidad considerable a las observaciones. Estos factores hacen que un análisis estadístico de muestras pareadas a nivel vehicular no tenga sentido, pero de manera agregada se muestran tendencias. La Figura 6 muestra las concentraciones promedio de HC por año-modelo para la muestra pareada de vehículos privados en 2016 y 2019. Los promedios de la muestra de 2019 son más altos para todos los años, aunque con tamaños de muestra pequeños las diferencias no son significativas al 95 %.



**Figura 6. HC promedio de la muestra pareada para vehículos privados por año-modelo**

La correlación HC:CO para los promedios de año-modelo de la muestra pareada de vehículos privados en 2016 y 2019 se muestra en la Figura 7, con líneas de tendencia lineales. La pendiente más alta para la muestra de 2019 sugiere que las emisiones por evaporación más altas contribuyen a los niveles más altos de HC por año-modelo observados.



**Figura 7: Correlación HC: CO para la muestra pareada de vehículos privados**

### Resumen de los hallazgos

En general, los RSD de la Ciudad de México de 2019 confirman las tendencias observadas tres años antes: altas emisiones de HC para los LDV privados, emisiones excesivamente altas de HC para los taxis, y una indicación continua de emisiones evaporativas excesivas. Los datos de 2019 muestran una alta tasa de deterioro de HC para los años de los modelos 2011-2016 en relación con las emisiones de CO para los mismos años del modelo y con las tasas de deterioro de Estados Unidos. Sin embargo, una comparación por antigüedad del vehículo muestra emisiones más bajas para la flota de 2019 frente a la de 2016. La determinación precisa de la causa es difícil de identificar solo con estos datos, y merece una investigación más profunda para evaluar si los estándares para vehículos ligeros de la NOM 042, las mejoras del PVVO, la ubicación de los RSD, las condiciones ambientales u otros factores contribuyen a la diferencia. Aunque en 2019 los taxis mostraron algunas reducciones basadas en la antigüedad, su tasa de deterioro durante tres años fue muy alta, con el doble de emisiones durante ese periodo incluso para los años-modelos más nuevos. Un hallazgo adicional de los datos de 2019 es que las emisiones de HC en el EdoMex parecen ser más elevadas que los LDV en la CDMX, aunque se desconoce la influencia de los vehículos de viaje compartido y los taxis en la flota del EdoMex. Finalmente, la correlación de HC:CO continúa sugiriendo altas emisiones por evaporación en la flota de la Ciudad de México, subrayando la necesidad de estudiar y mitigar esta importante fuente de emisiones. En la siguiente sección se discuten recomendaciones al respecto.

### Recomendaciones para futuras investigaciones sobre emisiones evaporativas con RSD

Aunque los RSD se han centrado tradicionalmente solo en las emisiones del tubo de escape, en la última década los estudios realizados con tecnología RSD de nueva generación y métodos de cálculo más nuevos, han confirmado la presencia de emisiones evaporativas en las mediciones de HC en vialidades. La presencia de emisiones evaporativas en las medidas de RSD se investigó por primera vez en estudios que encontraron una divergencia entre los resultados de los RSD y

los de I/M solo de escape, incluidas lecturas altas de HC de los RSD para vehículos que habían pasado las pruebas I/M solo de escape.<sup>5</sup> Los estudios de seguimiento confirmaron la capacidad de los RSD para detectar altas emisiones evaporativas conocidas, basados en mediciones de vehículos que pasan con fallas inducidas en los controles de evaporación.<sup>6</sup> Como se ha mencionado anteriormente, los estudios adicionales se enfocaron en el establecimiento de una correlación entre las mediciones directas de emisiones por evaporación de RSD realizadas en una PSHED. El perfeccionamiento de los métodos para aplicar los RSD para evaluar las emisiones evaporativas está en curso; un estudio recientemente publicado aplicó estos métodos a los RSD recolectados en Los Ángeles en 2013 y 2015, estimando que 0.1-0.2 % de los vehículos medidos tenían niveles extremos de emisiones evaporativas durante su operación (*running loss*), al menos 50 veces más altos que los estándares federales actuales (Tier 3).<sup>7</sup> Estos estudios confirmaron que los RSD pueden ser útiles para cuantificar el exceso de emisiones evaporativas y para identificar altos emisores de emisiones evaporativas. Sin embargo, todos se basaron en algo más que la “toma” agregada de RSD del vehículo que normalmente se informa, complementando ya sea con lecturas subyacentes de 10ms y/o medidas de emisiones independientes como PSHED o I/M. Por lo tanto, para replicar estos estudios en la Ciudad de México (o en cualquier otro lado) se requerirá una recolección de datos adicional durante las campañas de RSD, además de datos complementarios para brindar una comparación independiente y una verificación cruzada de los resultados de los RSD. Para mejorar el diagnóstico de las emisiones evaporativas de los RSD en la Ciudad de México y en otros lugares, Koupal y Palacios (2019) hace las siguientes recomendaciones:

- Mantener lecturas en crudo de 10 milisegundos de los dispositivos RSD para permitir una detección más certera de emisiones evaporativas frente a las de HC de escape. Las medidas típicas de RSD son un agregado de 50 lecturas de absorbancia espaciadas cada 10ms; Koupal y Palacios (2019) ha analizado dichos datos en Estados Unidos. y ha desarrollado algoritmos para señalar las altas emisiones por evaporación.
- Mejorar la coincidencia de placas entre los RSD y el programa I/M (PVVO) de la Ciudad de México, que según estudios anteriores era de tan solo aproximadamente el 55 %. Tener datos pareados de más vehículos brindará una comparación más sólida de las medidas solo de tubo de escape y los RSD para ayudar a diagnosticar la presencia de un exceso de HC no solo de escape en la muestra de los RSD.

---

<sup>5</sup> Burnette, A. et al, *Evaluation of Remote Sensing for Improving California’s Smog Check Program Final Report*, ARB-080303, preparado por California Air Resources Board and California Bureau of Automotive Repair por Eastern Research Group, Inc., 2008.

<sup>6</sup> DeFries, T. et. al, *Estimated Summer Hot-Soak Evaporative Emissions Distributions for the Denver Fleet*, preparado por Colorado Department of Public Health and Environment por ERG, Inc., 2012.

<sup>7</sup> Bishop, G. at al, *Vehicle Exhaust Remote Sensing Device Method to Screen Vehicles for Evaporative Running Loss Emissions*, Environmental Science & Technology 2020 54 (22), 14627-14634.

DOI: 10.1021/acs.est.0c05433.

- Llevar a cabo estudios de campo para cuantificar mejor las emisiones evaporativas en vehículos de gasolina y la frecuencia de vehículos con fugas de vapor o combustible líquido para su uso en el Simulador de emisiones de vehículos de motor (MOVES, por su sigla en inglés). Estudios recientes en los Estados Unidos han desarrollado métodos para el trabajo de campo que son más rentables que las pruebas de cámara de evaporación de desarrollo completo (Cámara sellada para la determinación de emisiones evaporativas, o SHED por su sigla en inglés). Estos métodos incluyen el uso de un SHED portátil en las estaciones de inspección, estacionamientos, etc.; el uso de “rastreadores o sniffers” de hidrocarburos o cámaras infrarrojas para detectar el exceso de vapor en los vehículos estacionados; y un análisis de las lecturas de RSD de 10ms. Estas estrategias pueden ser complementarias— un estudio puede comenzar con una detección no intrusiva de una amplia población de vehículos (RSD, cámaras infrarrojas) para marcar una muestra más pequeña de altos emisores para pruebas más profundas (rastreadores o sniffers, SHED portátil). También se pueden introducir al PVVO métodos para evaluar el exceso de vapor o fugas de líquido para recopilar datos continuos sobre altos emisores de evaporación.