



Emisiones vehiculares de dióxido de carbono al cruzar una zona fronteriza al noroeste de México antes y durante la incidencia del COVID-19

Flores-Jiménez, David E.; Santos-Gómez, Ma. de los Ángeles[†]; Santillán-Soto, Néstor
Emisiones vehiculares de dióxido de carbono al cruzar una zona fronteriza al noroeste de México antes y durante la incidencia del COVID-19

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 31, 2024 | e235

Ciencias Exactas y Aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Flores-Jiménez, D. E., Santos-Gómez, M. de los Á. y Santillán-Soto, N. (2024). Emisiones vehiculares de dióxido de carbono al cruzar una zona fronteriza al noroeste de México antes y durante la incidencia del COVID-19. *CIENCIA ergo-sum*, 31. <http://doi.org/10.30878/ces.v31n0a20>

Emisiones vehiculares de dióxido de carbono al cruzar una zona fronteriza al noroeste de México antes y durante la incidencia del COVID-19

Vehicle Carbon Dioxide Emissions when Crossing a Border zone in northwestern Mexico, Before and During the Incidence of COVID-19

David E. Flores-Jiménez*

Universidad Autónoma de Baja California, México

david.flores80@uabc.edu.mx

<http://orcid.org/0000-0002-3607-9991>

Recepción: 29 de agosto de 2023

Aprobación: 24 de mayo de 2023

Ma. de los Ángeles Santos-Gómez†

Universidad Autónoma de Baja California, México

msantos@uabc.edu.mx

<http://orcid.org/0000-0002-2859-8572>

Néstor Santillán-Soto

Universidad Autónoma de Baja California, México

nsantillan@uabc.edu.mx

<http://orcid.org/0000-0002-3682-7603>

RESUMEN

Se analiza el comportamiento de las emisiones vehiculares de dióxido de carbono en dos puertos fronterizos de Mexicali, Baja California, México, antes y durante la incidencia del COVID-19 en el periodo 2019-2020. Se propone un Índice Relativo de Movilidad Vehicular (IRMV) para cuantificar la influencia de las restricciones de acceso a Estados Unidos sobre las emisiones vehiculares en ambos puertos, las cuales se estiman con el método propuesto por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), de donde se obtiene que fueron mayores en 2019. El IRMV muestra que durante mayo-agosto de 2020 y octubre-diciembre del mismo año, se reduce el impacto de las medidas implementadas, en tanto que en mayo-junio y noviembre-diciembre, respectivamente, se alcanzan los niveles máximos de casos COVID-19 y de emisiones.

PALABRAS CLAVE: emisiones vehiculares, COVID-19, dióxido de carbono, zona fronteriza internacional, restricciones, Mexicali-EE.UU.

ABSTRACT

The behavior of vehicular carbon dioxide emissions in two border ports of Mexicali, Baja California, Mexico, before and during the incidence of COVID-19 in the period 2019-2020, is analyzed. A Relative Vehicle Mobility Index (IRMV) is proposed to quantify the influence of access restrictions to the United States on vehicle emissions in both ports. These are estimated with the method proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), obtaining that in 2019 they were higher. The IRMV shows that during May-August 2020 and October-December of the same year, the impact of the implemented measures is reduced, because in May-June and November-December, the maximum levels of COVID-19 and emissions are reached.

KEYWORDS: vehicle emissions, COVID-19, carbon dioxide, international border area, restrictions, Mexicali-USA.

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire asociada a la dinámica poblacional urbana es uno de los temas de mayor relevancia en la actualidad por su repercusión en aspectos económicos, políticos y de salud pública. La necesidad del ser humano de

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

david.flores80@uabc.edu.mx

trasladarse de un lugar a otro rige en gran medida a nivel global, regional y local la forma en que se distribuirán los contaminantes y cómo afectarán sobre un espacio y tiempo determinados (Crippa *et al.*, 2021; Shaddick *et al.*, 2020; Black *et al.*, 2011). El incremento de las fuentes emisoras vinculadas a estas zonas metropolitanas a su vez favorece un mayor nivel en las emisiones de diversos tipos de gases y partículas, dañinos tanto para la salud (contaminantes criterio) como para el clima (gases de efecto invernadero (GEI) (Lamb *et al.*, 2021; Fann *et al.*, 2009).

La contaminación debida al desplazamiento poblacional en una o entre varias zonas urbanas depende principalmente de las fuentes móviles, que en su mayoría siguen realizando procesos de combustión, los cuales favorecen la generación de contaminantes criterio como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) y GEI, de donde destacan el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (N₂O) (Clairotte *et al.*, 2020; Robertson, 2019; Winkler *et al.*, 2018). Asimismo, tanto dentro del humo que producen los vehículos como debido a su interacción con la superficie también favorecen la emisión de material particulado, de los cuales se encuentran normados o regulados aquellos que tienen un diámetro menor a 10 y 2.5 micrómetros (1×10^{-6} m), es decir, PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente (Baensch-Baltruschat *et al.*, 2021; Beddows y Harrison, 2021; Zavala *et al.*, 2013).

Para un estudio de la zona urbana de Chengdu-Chongqing en China, durante el periodo 1999-2015, se construyó un inventario de emisiones asociado a varios tipos de gases generados por diversos tipos de vehículos, en donde se encuentra que los niveles de emisión de CO₂ incrementaron un 783.86%, ya que las normas asociadas al combustible en dicho país no fueron efectivas; lo mismo sucedió para el N₂O con un incremento del 582.32% (Song *et al.*, 2019).

Para la entrada y salida del túnel de la autopista de Islisberg, ubicado en Suiza, se llevó a cabo un muestreo controlado de varios tipos de gases, durante el 21 y 22 de junio y 25 de julio de 2011. Los picos de tráfico observados por la mañana y por la tarde permitieron contabilizar alrededor de 2 000 vehículos por hora, en su mayoría vehículos personales, los cuales representaron el 85% del transporte durante el día. Los niveles de CO₂ (500 a 2 000 partes por millón, ppm) y N₂O (320 a 380 partes por billón, ppb) obtenidos a la salida del túnel durante el muestreo fueron mayores que en la entrada, lo que significó que estos niveles se debieron a la generación de dichos gases dentro del túnel. Por su parte, los valores correspondientes para el CH₄ (1800 a 2600 ppb) a la salida de éste fueron similares a los muestreos de la entrada (Popa *et al.*, 2014).

En 48 estados de Estados Unidos de América se realizó un estudio durante el periodo 2000-2014, que consistió en construir un modelo de regresión lineal para predecir el comportamiento de las emisiones vehiculares en 2015 y 2016. La variable dependiente fue la emisión de CO₂ y las variables independientes más trascendentes, la temperatura promedio anual y la cantidad de vehículos registrados. Entre los resultados más destacables se encuentra que un incremento del 1% de ambos parámetros se podía asociar respectivamente con un aumento del 0.16% y 0.92% en las emisiones de CO₂ por año y por estado (Robertson, 2019).

En México, su capital y el Estado de México han sido los principales contribuidores en las emisiones nacionales de material particulado PM_{2.5}, ya que tienen en conjunto alrededor del 30% de la flota vehicular del país; sin embargo, el estado de Baja California ha tenido el mayor número de vehículos por persona (0.4) en sus dos ciudades fronterizas (Mexicali y Tijuana), posicionándolas como las principales emisoras de este tipo de contaminante en escala urbana (Zavala *et al.*, 2013). En un estudio de 2007, para ambas zonas metropolitanas considerando vehículos que van de modelos menores o iguales a 1980 a mayores o iguales a 1999, se encontró que el promedio de sus emisiones de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) fue de alrededor de un 20% menos que el reportado en 2005 para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM); sin embargo, las emisiones correspondientes al monóxido de nitrógeno (NO) fueron comparables en magnitud, con valores de 965 ppm en ZMCM, 966 ppm en Tijuana y 1201 ppm en Mexicali (Aguilar *et al.*, 2009).

En relación con los GEI, en la Ciudad de México se realizó un estudio para estimar el consumo energético y las emisiones de CO₂ generadas por fuentes vehiculares; en este sentido, el año base fue 2012 y se construyeron

escenarios de mitigación para 2050. De acuerdo con los resultados más relevantes, entre 2010 y 2050 habrá un crecimiento considerable en la cantidad de automóviles y camiones ligeros, en ambos, mayor al 40%. Al mismo tiempo, las emisiones podrían crecer un 370%, con estos dos tipos de vehículos como los principales contribuidores en la generación de CO₂ (Solís Ávila y Sheinbaum Pardo, 2016).

A partir de 2007, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) comenzó a caracterizar las emisiones vehiculares generadas en la frontera norte de México. En particular, durante 2010 y 2011, apoyándose en un equipo de detección remota, midió este tipo de emisiones provenientes del escape de los vehículos para el estado de Baja California. Dentro de los resultados más sobresalientes, se identificó que los automóviles particulares de las ciudades de Mexicali y Tijuana representaron alrededor del 50% de la flota vehicular en el estado. Asimismo, considerando datos históricos, las emisiones de CO₂ por modelo vehicular fue similar en ambas ciudades durante el periodo de 1980 a 2011; los valores más altos se presentaron para los modelos de los años ochenta (INECC-SEMARNAT, 2011). A nivel nacional, las emisiones de GEI debidas al autotransporte han presentado un incremento notable entre 1990 y 2019, pues han alcanzado niveles superiores a los 140 millones de megagramos (Mg, donde 1 Mg = 1×10⁶ g) de CO₂e (SEMARNAT-INECC, 2022).

Por otro lado, a nivel mundial (Dockery, 2009; Fann *et al.*, 2009), nacional (Cerón-Bretón *et al.*, 2018; Pérez-Padilla, 2018) y para el estado de Baja California (Reyna *et al.*, 2012; Ramírez-Rembao *et al.*, 2009; Reyna *et al.*, 2005), se ha estudiado la relación entre los contaminantes criterio generados por diversas fuentes emisoras y los casos de afectaciones a la salud. En todos ellos se ha encontrado una importante correlación estadística entre los niveles de exposición y los tipos de enfermedades respiratorias crónicas y agudas que existen.

Las condiciones que restringieron el flujo vehicular durante la pandemia en 2020 (Liu *et al.*, 2020) afectaron la dinámica vehicular, ya sea por cuestiones económicas, políticas o sociales. Las restricciones de movilidad impuestas por el gobierno, asociadas al número de casos de COVID registrados, pueden repercutir en la variabilidad de las emisiones vehiculares. En un estudio que tomó en cuenta los registros de número de muertes por COVID-19, así como las emisiones de CO₂ reportadas en 2020 por los países de Estados Unidos, India, Reino Unido, Francia, Alemania, Italia, España Rusia, Brasil y Japón, se identificó que de octubre a diciembre hubo un 50% más de muertes que en el periodo de marzo a mayo; en este último, las emisiones de CO₂ cayeron un 91% en comparación con las registradas en el último trimestre del año. De marzo a mayo se obtuvo una fuerte correlación (0.9) entre dichas emisiones y los casos de muerte por COVID-19 (Liu *et al.*, 2022).

Diversos estudios han demostrado que la frecuencia en la que ocurren traslados mediante transportes vehiculares se ven afectados, así como las emisiones que generan debido a la propagación de enfermedades en un área determinada. En la McGill University, Canadá, se llevó a cabo un estudio para identificar la cantidad, tipo de vehículos y los niveles de emisiones de CO₂ y CO₂e equivalente generados antes, al inicio y después de la pandemia en 2020. Los resultados mostraron que la cantidad de viajes en vehículo hacia la universidad se redujo hasta un 26% en abril al alcanzar emisiones de 3224 Mg, que es 43% menor a lo que se hubiera generado si la cantidad de vehículos se hubiera mantenido (DeWeese *et al.*, 2022). En varias ciudades de Estados Unidos también se identificaron efectos sobre los niveles de emisión de material particulado PM_{2.5} durante la presencia de casos COVID en el 2020 (Pata, 2020). En los estudios mencionados se muestra que la pandemia por COVID afectó la dinámica vehicular y por ende los niveles de emisión.

En México se reportó el primer caso de COVID-19 a finales de febrero de 2020, mientras que en Mexicali fue durante marzo del mismo año, que es cuando se declara la fase 2 en el país como consecuencia de los contagios comunitarios en habitantes que no habían hecho aún viajes al extranjero. La mayor distribución espacial de los casos de contagio en Baja California ocurrió sobre todo en Tijuana y Mexicali (Brugués Rodríguez *et al.*, 2021).

Por un lado, la movilidad urbana desde ambas ciudades fronterizas hacia los condados más cercanos de Estados Unidos de América (EE. UU.) ha favorecido históricamente una actividad económica muy importante debido a las oportunidades de empleo aprovechadas en ambos lados de la frontera; sin embargo, esto llevó a que en Mexicali hubiera un incremento en las emisiones de CO₂e de hasta 180 Mg durante 2010, considerando

solo automóviles (Santos-Gómez y Camacho, 2017). Para 2020, en un estudio que abarcó del 11 de marzo al 31 de julio, se identificó que la pandemia y las medidas de restricción implementadas por México y Estados Unidos ocasionaron que disminuyeran los viajes para cruzar desde Mexicali y Tijuana hacia EE. UU. y viceversa, excepto para las personas que laboraban en alguno de los dos lados, pero, posterior a abril, se registró una recuperación en el flujo de cruce vehicular (Lara-Valencia y García-Pérez, 2021; Esparza Puente, 2020).

De acuerdo con el contexto anterior, y considerando que para determinados meses de 2020 las estrategias de restricción de movilidad vehicular en las zonas de cruce fronterizo de Mexicali no favorecieron su disminución en cantidad de vehículos que cruzaron (Lara-Valencia y García-Pérez, 2021), el objetivo de la investigación fue analizar el comportamiento de las emisiones vehiculares de dióxido de carbono (CO₂) en el cruce unidireccional fronterizo de Mexicali, Baja California, México a Calexico, California, Estados Unidos de América, antes y durante la incidencia del COVID-19 en el periodo 2019-2020.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

En la ciudad de Mexicali existen dos opciones de cruces fronterizos hacia los Estados Unidos de América, que son el puerto de entrada Oeste y el puerto de entrada Este, conocido como Garita Nueva (figura 1). En este sentido, dos de los aspectos que más influyeron en la decisión del usuario para seleccionar alguno de los accesos durante el periodo de estudio fueron el tiempo de espera y los horarios de servicio.

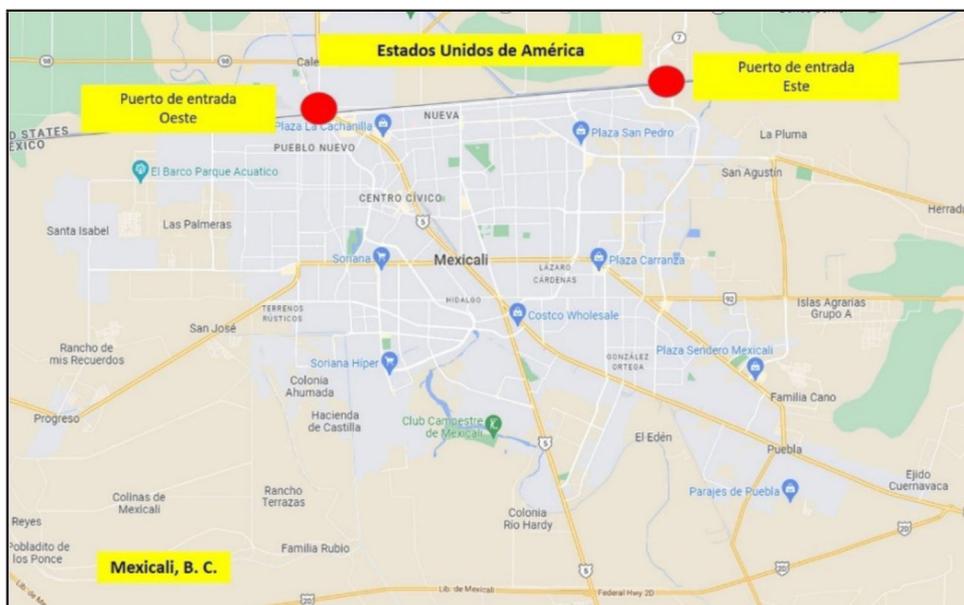


FIGURA 1

Localización de los puertos de entrada, Oeste y Este, hacia EE. UU., en Mexicali, Baja California, México

Fuente: elaboración propia.

Los tipos de vehículos considerados en este estudio fueron los personales y de pasajeros. Al respecto, la base de datos a partir de la cual se obtuvo la cantidad mensual que cruza por los puertos de entrada en Mexicali, se tomó del sitio web del Departamento de Transporte de Estados Unidos (Bureau of Transportation Statistics, 2022), tanto para 2019 como para 2020. La información correspondiente a los tiempos de espera promedio horarios, por día, considerados en una semana, para cada mes de 2020, se obtuvieron de la Oficina de Aduanas y Protección de Fronteras de Estados Unidos (U.S. Customs and Border Protection, 2022). Puesto que para

2019 no había información de este último parámetro en la base de datos mencionada, se tomaron los valores promedio mensuales que reportó el *Observatorio de Calidad de Vida* del Gobierno de Mexicali (Observatorio Ciudadano, 2021).

Las restricciones o recomendaciones de movilidad vehicular de Mexicali a Calexico durante el 2020 dependieron directamente de los comunicados oficiales que emitió la Secretaría de Salud a través de su Unidad de Inteligencia Epidemiológica y Sanitaria (UIES), de la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE) y de la Embajada y Consulados de Estados Unidos en México (ECEM); por tal razón se identificaron de los sitios web oficiales. Para cuantificar el nivel de afectación sobre el flujo vehicular fronterizo se dividió la cantidad de vehículos del mes de interés ($C_{v, m}$) entre la cantidad de vehículos en el mes anterior ($C_{v, m-1}$), donde m representa el contador del mes, que inicia con 1 para enero y termina con 12 para diciembre. A esta razón se le llamó Índice Relativo de Movilidad Vehicular (IRMV) (ecuación 1).

$$IRMV = \frac{C_{v, m}}{C_{v, m-1}} \quad (1)$$

Se consideró que el flujo vehicular de Mexicali a Calexico se mantuvo, disminuyó o aumentó respecto al mes anterior. En los dos primeros casos $IRMV \leq 1$, lo cual significó que las restricciones de movilidad aumentaron su influencia y provocaron una disminución del flujo vehicular. En el tercero $IRMV > 1$, por lo que en este caso las medidas de movilidad implementadas disminuyeron y provocaron un aumento en la cantidad de vehículos que cruzan.

Para la estimación de las emisiones diarias de CO₂ que generó cada vehículo al momento de cruzar de Mexicali hacia Estados Unidos, se utilizó la metodología que propone el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), cuya ecuación es la siguiente (IPCC, 2021):

$$Emisión\ diaria = DA \times FE \quad (2)$$

donde para vehículos que usaron gasolina, el factor de emisión FE , para un rendimiento de 6.2 km/l, que fue el más cercano a los rendimientos registrados en Mexicali en 2019 (6.85 km/l) y 2020 (6.93 km/l) reportado por el IPCC, tuvo un valor asignado por dicho organismo de 72.098 gramos por megajoule (g/MJ) ($1MJ = 1 \times 10^6J$) (IPCC, 1996). El dato de actividad (DA) representó la cantidad de litros de gasolina consumidos por vehículo para poder pasar por los puertos de entrada, el cual se calculó de la siguiente manera:

$$DA = \frac{d(km)}{Rendimiento\ anual \left(\frac{km}{l} \right)} \quad (3)$$

donde d es la distancia en kilómetros (km) que recorrió al día un vehículo para cruzar, el cual se obtuvo considerando la cantidad de vehículos que buscaron cruzar en cada puerto a la semana (C_v), la razón del tiempo total de espera diario (t_i) respecto al tiempo total de espera semanal (T), es decir, t_i/T , donde el subíndice i representó cada día de la semana, y, finalmente, la longitud de cada vehículo (redondeada a 4 m) (MAPFRE, 2022) junto con una distancia adicional de separación entre cada uno (1 m), en total 5 m, tal que:

$$d = C_v \times \left(\frac{t_i}{T} \right) \times 5\ m \quad (4)$$

Por otro lado, el número de casos diarios de COVID-19 presentados en la ciudad de Mexicali durante 2020 se obtuvieron de la Secretaría de Vigilancia Epidemiológica de Enfermedades Respiratoria Viral (SISVER) (Secretaría de Salud, 2021). Debido a que los casos comenzaron a finales de marzo y con el fin de compararlos con las emisiones vehiculares de CO₂ para meses con información completa, se consideró el periodo de abril-diciembre para dicho año, mientras que el horario de acceso en el puerto Este fue de 6 a 13 horas a partir de abril, en el acceso Oeste fue de 0 a 23 horas.

Cabe señalar que como los tiempos de espera obtenidos (U.S. Customs and Border Protection, 2022) en un inicio estaban registrados para cada hora del día y el factor de emisión estuvo en unidades de g/MJ (IPCC, 1996), entonces las unidades de las emisiones estimadas fueron de gramos por hora (g/h), de tal forma que para compararlas con los casos diarios de COVID-19 se decidió obtener los promedios diarios de las emisiones en las unidades mencionadas.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medidas de contingencia para restringir viajes “no esenciales” emitidos de marzo a diciembre del 2020 fueron las que limitaron el flujo vehicular en la zona fronteriza de Mexicali, y se implementaron por el incremento del número de casos COVID, los cuales tuvieron una tendencia positiva en específico para los periodos de mayo-junio y octubre-diciembre. El IMRV mostró para el puerto Oeste que en mayo (1.30) y octubre (1.19) las restricciones disminuyeron su influencia sobre el flujo vehicular a causa de que se presentó la mayor cantidad de vehículos cruzando de Mexicali, México a Calexico, EE. UU. Además, ambos meses marcaron el patrón de comportamiento del flujo vehicular en la línea fronteriza para primavera-verano y otoño-invierno respectivamente. En el primero la cantidad de vehículos osciló entre los 690 a 790 000 ($0.98 < IRMV < 1.30$) y en el segundo fue superior a 830 000 ($0.97 < IRMV < 1.19$) (cuadro 1).

Para el puerto Este la cantidad de vehículos que cruzó hacia Calexico osciló entre 224 a 268 000 ($0.94 < IRMV < 1.05$). El índice mostró que en mayo (1.03) y octubre (1.24) también disminuyó la influencia de las medidas de contingencia (cuadro 1); sin embargo, la diferencia en la cantidad de vehículos entre ambos meses fue de 43 000, mientras que para el puerto Oeste fue de 149 000. Esto tiene que ver en gran medida con el total de horas en las que se podía acceder por cada puerto.

En junio y diciembre, meses en los que se presentó la mayor cantidad de casos COVID en Mexicali, el flujo vehicular para el puerto Oeste no aumentó, ya que el IRMV fue de 0.98 y 0.99 respectivamente, por lo que las medidas de restricción tuvieron mayor impacto en ambos meses; sin embargo, para el puerto Este se identificó un ligero aumento en los valores del índice (1.01 y 1.05 para cada mes) (cuadro 1), que en cantidad de vehículos reflejó un incremento de 2 000 y 13 000 de mayo a junio y noviembre a diciembre respectivamente.

CUADRO 1

Indicadores mensuales de las medidas de contingencia para restringir la movilidad vehicular, el *IRMV* y los casos acumulados de COVID-19 para 2020

Fecha de publicación: medida oficial de contingencia para restringir viajes no esenciales	Índice Relativo de Movilidad Vehicular (IRMV)		Código de colores*	Razones de la restricción de viajes
	Puerto Este	Puerto Oeste		
Enero 30 (UIES, 2020a; <i>BBC News Mundo</i> , 2020)	0.86	0.92	■	Avisos preventivos. Se reporta coronavirus en EE. UU.**
Febrero 7 y 27 (UIES, 2020b, 2020c)	0.94	0.94		

Marzo 14, 16, 30 y (UIES, 2020d, 2020e; SRE, 2020a; ECEM, 2020a)	0.79	0.81		Limitar propagación COVID-19
Abril 1 y 6 (SRE, 2020b, 2020c)	0.43	0.62		Contrarrestar transmisión del virus. Posibilidad de enfermar elevada
Mayo 18 (UIES, 2020f)	1.03	1.30		
Junio 15 (ECEM, 2020b)	1.01	0.98		
Julio 2 (SRE, 2020d)	1.00	0.99		Evitar viajes no esenciales por motivos del 4 de julio
Agosto 6 (ECEM, 2020c)	0.98	1.04		Contrarrestar transmisión del virus. Posibilidad de enfermar elevada
Septiembre 12 y 22 (SRE, 2020e; ECEM, 2020c)	0.97	1.00		
Octubre 20 (UIES, 2020g)	1.24	1.19		
Noviembre 25 (SRE, 2020f)	0.94	0.97		Limitar propagación COVID-19
Diciembre 1 (SRE, 2020g)	1.05	0.99		

Fuente: elaboración propia.

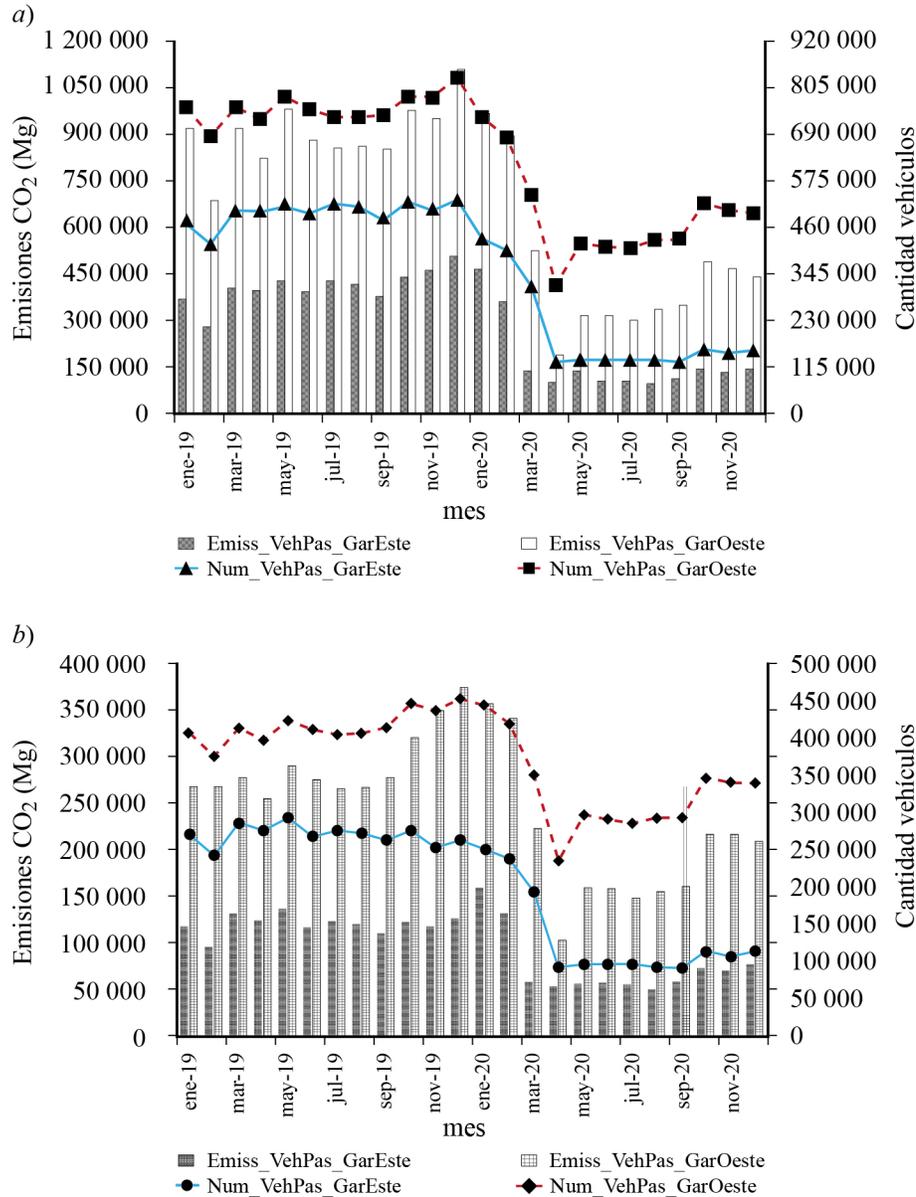
Nota: *el color amarillo indica que el flujo vehicular se redujo respecto al mes anterior ($IRMV < 1$), el color rojo que aumentó ($IRMV > 1$) y el color café que no hubo variaciones significativas de la cantidad de vehículos que cruzan respecto a mayo y octubre respectivamente debido a los valores del índice tan cercanos o iguales a 1 en alguno de los dos puertos de acceso, o ambos.

**En enero y febrero aún no había restricciones oficiales o cierres parciales de la frontera solo avisos preventivos y reportes de los primeros casos en EE. UU.

Del 2019 al 2020 hubo una reducción del 70% y del 43% de la cantidad de vehículos que cruzan en los puertos Oeste y Este respectivamente. Durante 2019, el IRMV presentó valores entre 0.91 a 1.10 y de 0.9 a 1.19 para cada puerto; esto significa que, a comparación de 2020, no se presentaron disminuciones tan grandes del flujo vehicular respecto al mes inmediato anterior (cuadro 1). En ambos años, tanto en mayo como invierno se registró la mayor cantidad de vehículos que cruzaron la zona fronteriza de Mexicali a Calexico.

En cantidades totales, y con base en lo anterior, las emisiones por mes de CO₂ muestran que durante 2019 fueron mayores en magnitud que las de 2020 en ambos puertos (también llamados *garitas*) y para los dos tipos de vehículos (gráfica 1). A partir de marzo de 2020, para los vehículos de pasajeros, hubo una tendencia negativa en sus niveles de emisión, pues en abril cayeron a sus niveles más bajos, con valores de 185 305.25 y 97 506.68 Mg/mes de CO₂ en los puertos Oeste y Este respectivamente (gráfica 1a). Para los vehículos personales, en ese mismo mes, las emisiones se redujeron a 103 185.35 y 53 930.99 Mg/mes de CO₂ respectivamente en cada puerto (gráfica 1b); sin embargo, de mayo a diciembre del mismo año, se presentó una recuperación en sus valores. En este último periodo la cantidad promedio mensual de vehículos personales y de pasajeros que cruzaron a Calexico mostró un comportamiento constante para la garita Este, mientras que en el acceso Oeste hubo un incremento. En ambos años se aprecia que tanto en mayo-junio como en octubre-diciembre se presentaron los valores más elevados de este gas de efecto invernadero.

En el Inventario de Emisiones de GEI del estado de Baja California se proyectó que para 2020 las emisiones vehiculares totales de transportación carretera por uso de gasolina serían de 6.88 millones de Mg de CO₂e (Chacón Anaya *et al.*, 2010). Para este año, Mexicali contaba con un parque vehicular por uso de gasolina de 468 897 unidades, considerándose tanto autos públicos como motos y autos particulares (INEGI, 2022); sin embargo, lograron cruzar por la frontera norte del municipio, un promedio mensual de 286 243.6 vehículos (tanto los personales como los de pasajeros por ambos puertos), que representa el 61% del registro oficial mencionado, los cuales en conjunto generaron 2.71 millones de Mg de CO₂, es decir, 39% del total proyectado para ese año en dicho inventario.



GRÁFICA 1
Cantidades promedio mensuales de emisiones*
a) para vehículos de pasajeros y b) vehículos personales

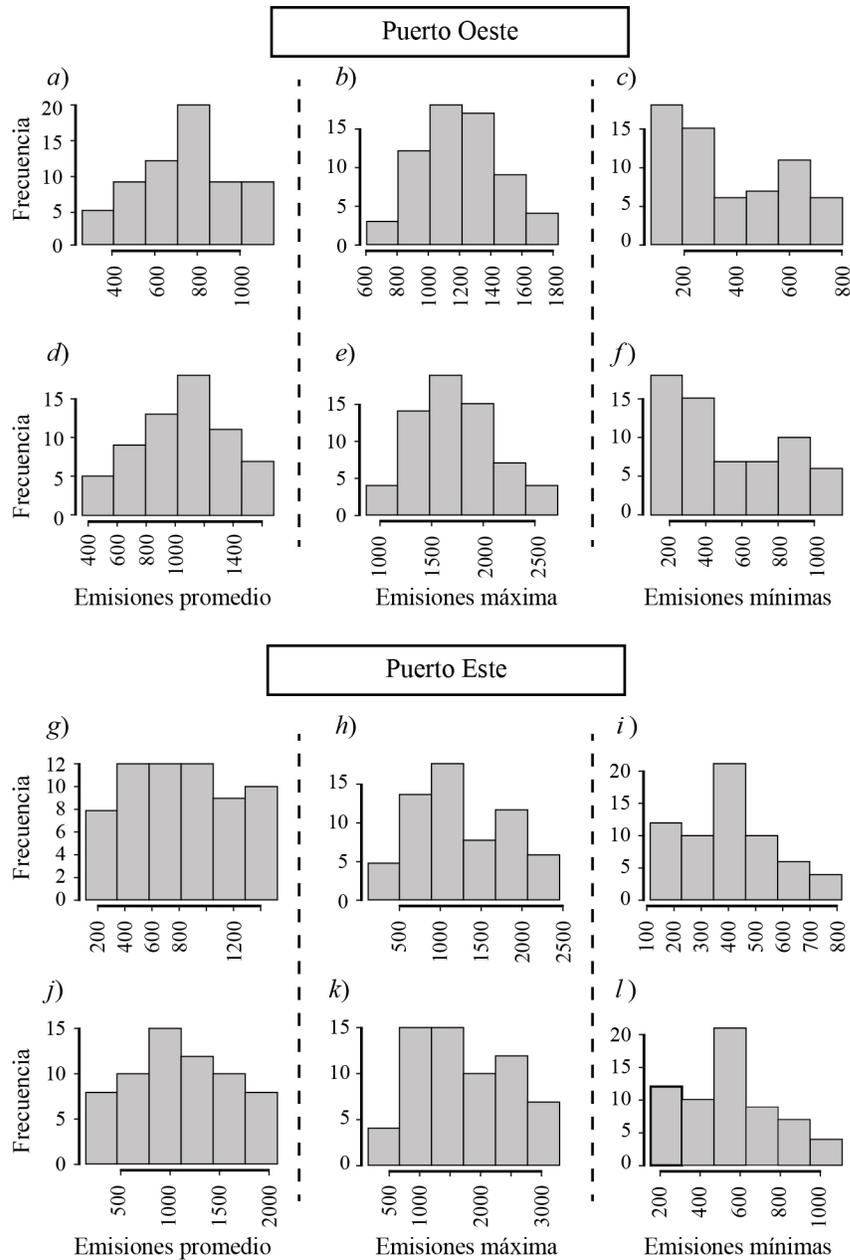
Fuente: elaboración propia.

Nota: *considerando vehículos personales (VehPer) y de pasajeros (VehPas), se muestran los promedios mensuales tanto de las emisiones de CO₂ (Emiss_VehPas y Emiss_VehPer) en megagramos (Mg), como del número de vehículos (Num_VehPas y Num_VehPer) para las garitas Este (GarEste) y Oeste (GarOeste) durante el periodo 2019-2020.

Por otro lado, analizando el promedio diario de las emisiones de CO₂ que generó cada vehículo por hora, para el puerto Oeste, dicho GEI presentó una mayor frecuencia en valores alrededor de los 800 g/h y 1 100 g/h tanto para vehículos personales como de pasajeros (gráfica 2a y 2d), mientras que sus emisiones máximas estuvieron entre los 1 100g/h y 1 600g/h (gráfica 2b y 2e). En ambos casos los principales meses involucrados fueron octubre y noviembre, donde el IRMV fue de 1.19 y 0.97 respectivamente. En los histogramas de emisiones mínimas (gráficas 2c y 2f), las mayores frecuencias se ubicaron en el extremo

izquierdo, con valores menores o iguales a 200 g/h para ambos tipos de vehículos, los cuales se presentaron en abril, donde el IRMV fue 0.92 (cuadro 1).

Comparadas con el caso anterior, para el puerto Este las emisiones fueron de menor magnitud (gráfica 2g y 2l). Las emisiones promedio de vehículos personales con las más altas frecuencias correspondieron al rango de 400 a 900 g/h en abril, mayo, agosto y septiembre, mientras que para los vehículos de pasajeros fueron de alrededor de 1 000 g/h en abril, mayo, julio y agosto. En ambos casos, a excepción de mayo, el $IRMV \leq 1$ (cuadro 1), lo que significa que las medidas de restricción de movilidad vehicular tuvieron en general un mayor impacto.



GRÁFICA 2

Histogramas de frecuencias de las emisiones de CO₂ generadas por vehículo (g/h) cada día*

Fuente: elaboración propia.

Nota: *estimadas para el puerto Oeste, considerando los vehículos personales a), b) y c) y los de pasajeros d), e) y f). De la misma manera, para el puerto Este, considerando los vehículos personales g), h) e i) y los de pasajeros j), k) y l).

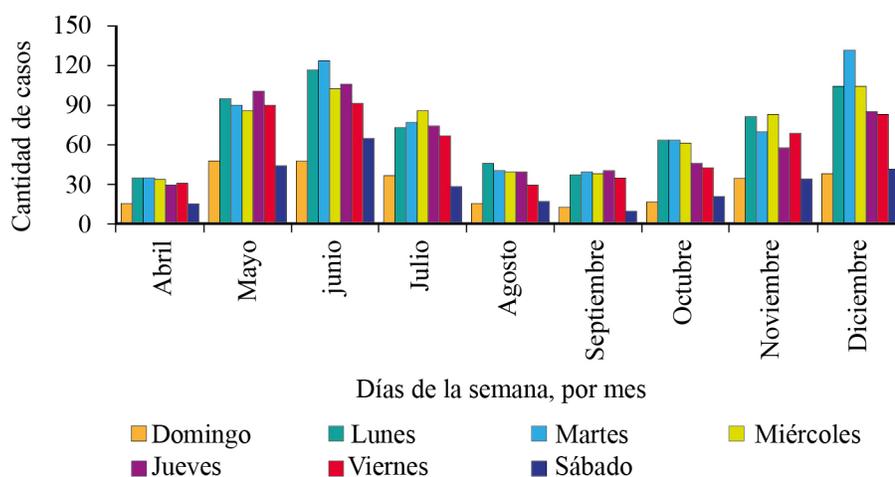
Las emisiones máximas ocurrieron con mayor frecuencia en abril y septiembre para ambos tipos de vehículos, con valores entre 1 100 g/h para los vehículos personales y 1 500 g/h para los de pasajeros, en ambos meses el *IRMV* < 1. Para los vehículos personales, los valores máximos se presentaron también en octubre (*IRMV* = 1.24), y para los de pasajeros durante mayo y agosto, cuyo *IRMV* fue DE 1.03 y 0.98 respectivamente. Las mínimas con mayor frecuencia para los vehículos personales estuvieron alrededor de los 400 g/h en abril, agosto, septiembre y noviembre y para los vehículos de pasajeros fue de 600 g/h en abril, octubre y noviembre. En este último mes el *IRMV* = 0.94 (cuadro 1).

Tanto para el puerto Este como para el Oeste, los fines de semana de cada mes presentaron los menores niveles de emisión promedio diaria, con un rango de 195 g/h a 794 g/h de CO₂, mientras que los lunes tuvieron los máximos niveles de 1 630 g/h a 2 084 g/h de CO₂.

En un estudio realizado para el estado de Baja California se muestra que la mayor tasa de contagio por COVID-19 en Mexicali durante 2020 ocurrió desde la semana 20 (16 de mayo) hasta la semana 27 (2 de agosto) (Brugués Rodríguez *et al.*, 2021); asimismo, en un estudio hecho por Instituto para las Ciencias de la Salud Global (Institute for Global Health Sciences), se reportó que los estados del norte del país presentaron en dicho año dos máximos de tasa de mortalidad a causa de diversas enfermedades, incluida el COVID-19, durante mayo-julio y noviembre-diciembre (Sánchez-Talanquer *et al.*, 2021). Para esta investigación, y en concordancia con ambos estudios, se identificó una tendencia positiva de casos promedio diario en los periodos de mayo-junio y noviembre-diciembre, con máximos de 92.1 y 82.8 en junio y diciembre respectivamente, en tanto que septiembre mostró el menor valor (29.6).

A diferencia de los datos diarios de emisiones, donde en cada día se registraron condiciones variables, los casos promedio diarios de COVID tuvieron patrones de comportamiento similares; por ejemplo, los lunes y martes se tuvo la mayor cantidad de casos reportados, mientras que los sábados y domingos de cada mes se observaron las cantidades mínimas (gráfica 3).

Las emisiones vehiculares y los casos de COVID-19 registrados (Secretaría de Salud, 2021) alcanzaron niveles máximos durante el periodo estacional de invierno para 2020, ya que después de haber obtenido un *IRMV* > 1 en octubre, éste se mantuvo cercano a 1 para los meses posteriores. Al compararlo con verano, también se observó un aumento del 20% de la cantidad promedio de emisiones tanto de vehículos personales como de pasajeros (gráficas 3, 1a y 1b), donde mayo fungió como el mes de referencia, también con *IRMV* > 1 previo a la estación cálida.

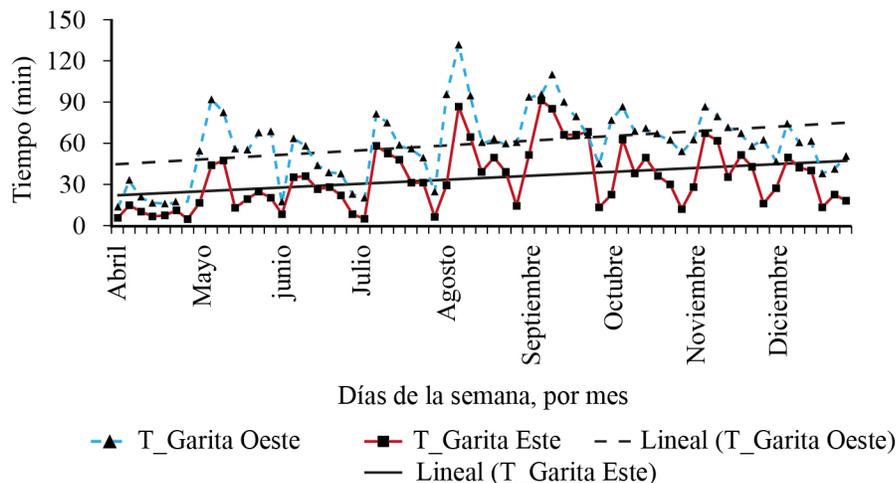


GRÁFICA 3
 Número de casos promedio de COVID-19 por cada día de la semana durante el periodo de abril a diciembre de 2020
 Fuente: elaboración propia.

Nota: estimados a partir de los casos diarios reportados en el sitio web de datos abiertos de la Secretaría de Salud.

Liu *et al.* (2022) muestran que, en Estados Unidos durante 2020, las emisiones de CO₂ tuvieron una tendencia de aumento tanto a finales del periodo abril-agosto como en el de noviembre-diciembre. Para el estado de Baja California, se identificó una recuperación en la dinámica del cruce fronterizo durante el periodo del 11 de marzo al 31 de julio y, por ende, en las emisiones vehiculares de CO₂ (gráfica 1), ya que tanto a las actividades laborales como los días festivos y asuetos (Lara-Valencia y García-Pérez, 2021) impulsaron una reactivación de las actividades económicas (Liu *et al.* 2020). Esto también se observó en las compras y ventas internacionales realizadas en Mexicali, pues, aunque en abril y mayo del 2020 hubo una caída de hasta el 50% de ambos indicadores con respecto a marzo, en julio hubo una recuperación que alcanzó el mismo orden de magnitud de 2019 (900 millones de dólares), mientras que en diciembre de 2020 fue 13% y 18% mayor que en el año previo (DataMéxico, 2023).

Al igual que en los datos de emisiones, los tiempos de espera presentaron sus valores más altos los lunes de cada mes. También, es posible afirmar que, a pesar de la variabilidad de los tiempos promedio diarios, se favoreció una tendencia creciente de los datos asociados a esta variable (gráfica 4). Mayo y octubre fueron los meses con el IRMV más alto y mayor a 1 y, como se mencionó, marcaron el patrón de comportamiento en el flujo vehicular para los meses posteriores en primavera-verano y otoño-invierno respectivamente. En cada uno los tiempos promedio de espera por semana fueron similares, 68 y 69 minutos respectivamente. Agosto y septiembre tuvieron los máximos valores, ligeramente superiores a 80 minutos, meses en los cuales las medidas de restricción tuvieron mayor influencia sobre la movilidad vehicular, ya que el IRMV tuvo valores cercanos a 1, manteniendo el patrón de comportamiento vehicular originado en mayo.



GRÁFICA 4

Tiempos promedio diarios de espera para cada semana correspondiente a los meses de abril a diciembre de 2020

Fuente: elaboración propia.

Nota: en la gráfica cada mes contiene los siete días de la semana para las garitas (puertos) Oeste y Este. Las pendientes representan la tendencia positiva de los datos durante todo el periodo de estudio.

PROSPECTIVA

Este artículo abre la oportunidad de profundizar en una nueva temática en la que se analiza una estrategia para cuantificar la influencia de las restricciones de movilidad vehicular sobre las emisiones vehiculares de CO₂ durante la pandemia por COVID-19 en una zona de cruce fronterizo entre México y Estados Unidos. Será de

gran relevancia para futuras investigaciones tomar en consideración el uso de equipo de medición especializado y la construcción de bases de datos que abarquen un mayor rango de tiempo, generadas a partir de campañas de medición sobre la línea fronteriza tomando en cuenta no solo un transecto unidireccional, sino los flujos vehiculares al cruzar en ambas direcciones. Las estrategias de control y mitigación de contaminantes sobre los puertos fronterizos podrán tomar en cuenta estudios asociados a la calidad del aire y a los gases de efecto invernadero para la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

Considerando que el objetivo de analizar el comportamiento de las emisiones vehiculares de CO₂ en el cruce unidireccional fronterizo de Mexicali, Baja California, México a Calexico, California, Estados Unidos de América, antes y durante la incidencia del COVID-19 en el periodo 2019-2020, se confirma que las medidas de restricción de movilidad vehicular sí influyeron en la reducción de dichas emisiones para ambos puertos fronterizos; sin embargo, en los periodos de mayo-agosto y octubre-diciembre, hubo un incremento por la reactivación económica, lo cual coincidió con el alcance de los niveles máximos de casos COVID-19 y de emisiones en mayo-junio y noviembre-diciembre respectivamente.

El IRMV permitió cuantificar la influencia de las medidas de restricción implementadas en 2020 durante la pandemia, ya que dicho parámetro se basó en la tasa de cambio del flujo vehicular de un mes específico respecto al anterior. El incremento de los casos COVID durante mayo-julio y octubre-diciembre en Mexicali se debió en gran medida a la reactivación económica, tal y como lo mostró dicho índice, con valores mayores a 1. Las emisiones vehiculares del año en cuestión no alcanzaron los niveles de 2019.

Tomando en cuenta que este estudio se realizó mediante el uso de metodologías y modelos conocidos, los cuales fueron alimentados con diversas bases de datos oficiales, se identifica la falta de información con una mayor resolución temporal y espacial para obtener resultados más detallados en zonas urbanas específicas como las zonas de cruce fronterizo analizadas.

Además, la implementación de equipo de medición especializado favorecería la puesta en marcha de campañas de monitoreo, cuyos resultados podrían correlacionarse con diversos factores vinculados a la contaminación del aire, tales como los parámetros meteorológicos, las emisiones/concentraciones de contaminantes normados, diversos tipos de enfermedades respiratorias y el COVID-19, entre otros. De esta forma, se podrían construir modelos de regresión lineal múltiple o modelos no lineales que sirvan para proyectar la variabilidad en las emisiones vehiculares.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los revisores por sus valiosos comentarios, los cuales han servido para mejorar este artículo. Esta investigación se realizó dentro del proyecto “Análisis comparativo de emisiones contaminantes de Mexicali derivadas del flujo vehicular hacia Estados Unidos de América antes y después de la COVID-19”, el cual fue dado de alta en el Departamento de Apoyo a la Docencia e Investigación (DADI), campus Mexicali, de la UABC (Universidad Autónoma de Baja California), con clave de registro 111/2799.

REFERENCIAS

Aguilar, A., Garibay, V., & Cruz-Jimate, I. (2009). Remote sensing study of motor vehicles' emissions in Mexican Cities. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 123, 193-201. <https://doi.org/10.2495/AIR090181>

- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Kochleus, C., Stock, F., & Reifferscheid, G. (2021). Tyre and road wear particles - A calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads. *Science of the Total Environment*, 752, 141939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141939>
- BBC News Mundo. (2020). *Coronavirus en EE.UU.: a qué otros países ha llegado la enfermedad*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-51201248>
- Beddows, D. C. S., & Harrison, R. M. (2021). PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 244, 117886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117886>
- Black, R., Adger, W. N., Arnell, N. W., Dercon, S., Geddes, A., & Thomas, D. (2011). The effect of environmental change on human migration. *Global Environmental Change*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.001>
- Brugués Rodríguez, A., Fuentes Flores, N. A., & Ramírez Cervantes, A. (2021). Análisis del patrón espacio-temporal de transmisión del COVID-19 por municipios de Baja California. *Estudios Fronterizos*, 22. <https://doi.org/10.21670/ref.2108071>
- Bureau of Transportation Statistics. (2022). *Border Crossing/Entry Data*. United States Department of Transportation. <https://www.bts.gov/browse-statistical-products-and-data/border-crossing-data/border-crossing-entry-data>
- Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., Lara-Severino, R. C., Espinosa-Fuentes, M. L., Ramírez-Lara, E., Rangel-Marrón, M., Rodríguez-Guzmán, A., & Uc-Chi, M. P. (2018). Short-term effects of air pollution on health in the metropolitan area of Guadalajara using a time-series approach. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 2383-2411. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.09.0346>
- Chacón Anaya, D., Giner, M. A., Vázquez Valles, M., Roe, S. M., Maldonado, J. A., Lindquist, H., Strode, B., Anderson, R., Quiroz, C., & Schreiber, J. (2010). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Baja California y proyecciones de casos de referencia 1990-2025*. COCEF, CCS, Gobierno del Estado de Baja California.
- Claïrotte, M., Suarez-Bertoa, R., Zardini, A. A., Giechaskiel, B., Pavlovic, J., Valverde, V., Ciuffo, B., & Astorga, C. (2020). Exhaust emission factors of greenhouse gases (GHGs) from European road vehicles. *Environmental Sciences Europe*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00407-5>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pisoni, E., Solazzo, E., Guion, A., Muntean, M., Florczyk, A., Schiavina, M., Melchiorri, M., & Hutfilter, A. F. (2021). Global anthropogenic emissions in urban areas: Patterns, trends, and challenges. *Environmental Research Letters*, 16(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac00e2>
- DeWeese, J., Ravensbergen, L., & El-Geneidy, A. (2022). Travel behaviour and greenhouse gas emissions during the COVID-19 pandemic: A case study in a university setting. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100531>
- Dockery, D. W. (2009). Health effects of particulate air pollution. *Annals of Epidemiology*, 19(4), 257-263. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.annepidem.2009.01.018>
- DataMéxico. (2023). *Acerca de Mexicali. Economía. Comercio internacional neto*. Gobierno de México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/mexicali#:~:text=Las%20compras%20internacionales%20de%20Mexicali,4.02%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%20anterior>
- ECEM (Embajada y Consulados de Estados Unidos en México). (2020a). *Alerta de salud – COVID19 – embajada de los Estados Unidos Ciudad de México, México*. <https://mx.usembassy.gov/es/alerta-de-salud-covid19-embajada-de-los-estados-unidos-ciudad-de-mexico-mexico/>
- ECEM (Embajada y Consulados de Estados Unidos en México). (2020b). *Información sobre COVID-19*. <https://mx.usembassy.gov/es/informacion-sobre-covid-19/>

- ECEM (Embajada y Consulados de Estados Unidos en México). (2020c). *Alerta de viaje para México: nivel 4: no viajar*. <https://mx.usembassy.gov/es/alerta-de-viaje-para-mexico-nivel-4-no-viajar/>
- Esparza Puente, G. S. (2020). La pandemia y la contaminación de la atmósfera, en N. González Martín & J. Vega Gómez (eds.), *Emergencia sanitaria por COVID-19. Noroeste de México*. UNAM. https://archivos.juridicas.unam.mx/www/site//publicaciones/160Emergencia_sanitaria_por_COVID_19_Noroeste_de_Mexico.pdf
- Fann, N., Fulcher, C. M., & Hubbell, B. J. (2009). The influence of location, source, and emission type in estimates of the human health benefits of reducing a ton of air pollution. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2(3), 169-176. <https://doi.org/10.1007/s11869-009-0044-0>
- INECC-SEMARNAT. (2011). *Estudio de emisiones y actividad vehicular en Baja California, México. Reporte final*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112408/2011_CGCSA_RSD_Baja_California.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2022). *Economía y sectores productivos. Parque vehicular*. <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (1996). *Volume 2. Energy. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5a.html>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Capítulo 3. Combustión móvil, en *Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volúmen 2. Energía*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., ... & Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>
- Lara-Valencia, F., & García-Pérez, H. (2021). Las fronteras de la pandemia: lecciones para la gobernanza y la cooperación en las ciudades de la frontera México-Estados Unidos. *Estudios Fronterizos*, 22, 1-21. <https://doi.org/10.21670/ref.2104067>
- Liu, L., Miller, H. J., & Scheff, J. (2020). The impacts of COVID-19 pandemic on public transit demand in the United States. *PLOS ONE*, 15(11), 1-22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242476>
- Liu, Z., Deng, Z., Zhu, B., Ciais, P., Davis, S. J., Tan, J., Andrew, R. M., Boucher, O., ... & Schellnhuber, H. J. (2022). Global patterns of daily CO₂ emissions reductions in the first year of COVID-19. *Nature Geoscience*, 15, 615-620. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00965-8>
- MAPFRE. (2022). Guía de medidas de coches por segmento. *Motor blogs MAPFRE*. <https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/guia-medidas-coches-segmento/>
- Observatorio Ciudadano. (2021). *Observatorio de Calidad de Vida. Tiempo promedio de espera en garitas - Puertos Calexico Este y Oeste, Mexicali*. Gobierno de Mexicali. https://coplademm.org.mx/observatorio/indicadores/pdf/entorno_urbano/01.15_Tiempo%20espera%20garitas.pdf
- Pata, U. K. (2020). How is COVID-19 affecting environmental pollution in US cities? Evidence from asymmetric Fourier causality test. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13, 1149-1155. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00877-9>
- Pérez-Padilla, J. R. (2018). Muertes respiratorias en México, 2015. *NCT. Neumología y Cirugía de Tórax*, 77(3), 198-202. <http://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=82367>
- Popa, M. E., Vollmer, M. K., Jordan, A., Brand, W. A., Pathirana, S. L., Rothe, M., & Röckmann, T. (2014). Vehicle emissions of greenhouse gases and related tracers from a tunnel study: CO : CO₂, N₂O : CH₄ : O₂ : Atios, and the stable isotopes ¹³C and ¹⁸O in CO₂ and CO. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(4), 2105-2123. <https://doi.org/10.5194/acp-14-2105-2014>

- Ramírez-Rembao, M., Rojas, R. I. y García-Cueto, R. (2009). Influencia de los contaminantes atmosféricos en las infecciones respiratorias agudas en Mexicali-Baja California, México. *Información Tecnológica*, 20(3), 89-100. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4060it.08>
- Reyna, C., Quintero, N., & Collins, K. (2005). Correlation study of the association of PM10 with the main respiratory diseases in the populations of Mexicali, Baja California and Imperial County, California. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 26(1), 22-36. <http://new.medigraphic.com/cgi-bin/resumenI.cgi?IDARTICULO=5174>
- Reyna, M. A., Bravo, M. E., López, R., Nieblas, E. C., & Nava, M. L. (2012). Relative risk of death from exposure to air pollutants: A short-term (2003-2007) study in Mexicali, Baja California, México. *International Journal of Environmental Health Research*, 22(4), 370-386. <https://doi.org/10.1080/09603123.2011.650153>
- Robertson, L. S. (2019). Motor vehicle CO₂ emissions in the United States: Potential behavioral feedback and global warming. *Weather, Climate, and Society*, 11(3), 623-628. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0128.1>
- Sánchez-Talanquer, M., Gonzalez-Pier, E., Sepúlveda, J., Abascal-Miguel, L., Fieldhouse, J., Del Río, C., & Gallalee, S. (2021). *Mexico's response to COVID-19: A case study*. Institute for Global Health. Sciences, University of California. <https://globalhealthsciences.ucsf.edu/wp-content/uploads/2024/02/mexico-covid-19-case-study-english.pdf>
- Santos-Gómez, M. A. y Camacho, O. L. (2017). Patrones de viaje hacia el empleo en una ciudad fronteriza México – USA con sistemas de información geográfica: Mexicali. *Proyección*, 21, 190-211. <https://bdigital.uncu.edu.ar/app/navegador/?idobjeto=10303>
- Secretaría de Salud. (2021). *Información referente a casos COVID-19 en México*. Secretaría de Salud. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/informacion-referente-a-casos-covid-19-en-mexico>
- SEMARNAT-INECC. (2022). *México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2019. Gobierno de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737226/156_2022_INEGYCEI_1990-2019_NIR.pdf
- Shaddick, G., Thomas, M. L., Mudu, P., Ruggeri, G., & Gumy, S. (2020). Half the world's population are exposed to increasing air pollution. *npj. Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 1-5. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0124-2>
- Solís Ávila, J. C., & Sheinbaum Pardo, C. (2016). Consumo de energía y emisiones de CO₂ del autotransporte en México y escenarios de mitigación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(1), 7-23. <https://www.revistascca.unam.mx/rca/index.php/rca/article/view/46111>
- Song, X., Hao, Y., & Zhu, X. (2019). Air pollutant emissions from vehicles and their abatement scenarios: A case study of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration, China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(22), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su11226503>
- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). (2020a). *El Gobierno de México sugiere a connacionales evitar viajes internacionales no esenciales*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sre/articulos/el-gobierno-de-mexico-sugiere-a-connacionales-evitar-viajes-internacionales-no-esenciales-237978?idiom=es>
- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). (2020b). *SRE reitera llamado a evitar viajes no esenciales, particularmente entre México y Estados Unidos. Comunicado No. 112*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sre/prensa/sre-reitera-llamado-a-evitar-viajes-no-esenciales-particularmente-entre-mexico-y-estados-unidos>
- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). (2020c). *SRE exhorta a evitar viajes no esenciales durante Semana Santa. Comunicado No. 115*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sre/prensa/sre-exhorta-a-evitar-viajes-no-esenciales-durante-semana-santa>

- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). (2020d). *SRE exhorta a evitar viajes no esenciales a México por motivo del 4 de julio*. Gobierno de México. <https://consulmex.sre.gob.mx/sandiego/index.php/boletines/729-sre-exhorta-a-evitar-viajes-no-esenciales-a-mexico-por-motivo-del-4-de-julio-2>
- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). (2020e). La Secretaría de Relaciones Exteriores exhorta a evitar viajes no esenciales entre México y Estados Unidos. *Boletín de Prensa*. https://consulmex.sre.gob.mx/douglas/images/stories/BOLETINES/2020/DOU-BP-15-20__Boletn_de_Prensa_-Exhorta_Consulado_de_Mxico_en_Douglas_a_la_poblacin_a_evitar_viajes_no_esenciales_SEPTIEMBRE.pdf
- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). (2020f). *Relaciones Exteriores llama a evitar viajes no esenciales durante festividades de invierno*. Comunicado No. 367. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sre/prensa/relaciones-exteriores-llama-a-evitar-viajes-no-esenciales-durante-festividades-de-invierno?state=published>
- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). (2020g). *Relaciones Exteriores llama a evitar viajes no esenciales durante festividades de invierno*. Comunicado No. 367. Consulado General de México en Chicago. <https://consulmex.sre.gob.mx/chicago/index.php/comunicados-prensa/287-relaciones-exteriores-llama-a-evitar-viajes-no-esenciales-durante-festividades-de-invierno>
- UIES. (2020a). *Aviso preventivo de viaje a Hubei, China por infección respiratoria por nuevo coronavirus (2019-nCoV)*. Secretaría de Salud. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/530342/UIES-APV-China-Infeccion_Respiratoria_2019-nCoV-v04-30Ene2020.pdf
- UIES. (2020b). *Aviso preventivo de viaje a China por infección respiratoria por nuevo coronavirus (2019-NCOV)*. Secretaría de Salud. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/532753/UIES-APV-CHINA_2019_nCoV.PDF
- UIES. (2020c). *Aviso preventivo de viaje a países con transmisión comunitaria de la enfermedad por coronavirus (COVID-19) causada por el nuevo coronavirus (SARS-CoV-2)*. Secretaría de Salud. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/537520/UIES-APV-COVID19-SARSCoV2_2020.02.27.pdf
- UIES. (2020d). *Aviso preventivo de viaje a Estados Unidos de América y áreas con transmisión local comunitaria de la enfermedad de coronavirus (COVID-19) causada por SARS-CoV-2*. Secretaría de Salud. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/541496/APV-EUA-COVID19-SARSCoV2_Comunitaria_2020.03.14.pdf
- UIES. (2020e). *Aviso preventivo de viajes internacionales por pandemia de COVID-19 causada por SARS-CoV-2*. Secretaría de Salud. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/544698/APV-Pandemia-COVID19-SARSCoV2-v08-31Mar2020.pdf>
- UIES. (2020f). *Aviso preventivo de viaje personas que retornan o son repatriadas de cruceros internacionales por pandemia de COVID-19 causada por SARS-CoV-2*. Secretaría de Salud. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/552746/APV_Cruceros_Pandemia_COVID19_SARSCoV2.pdf
- UIES. (2020g). *Aviso preventivo de viajes internacionales por pandemia de COVID-19 causada por SARS-CoV-2*. Secretaría de Salud. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/586573/UIES-APV-Pandemia-COVID19-SARSCoV2-v10-20Oct2020f.pdf>
- U.S. Customs and Border Protection. (2022). *Historical Wait Times*. <https://bwt.cbp.gov/historical>
- Winkler, S. L., Anderson, J. E., Garza, L., Ruona, W. C., Vogt, R., & Wallington, T. J. (2018). Vehicle criteria pollutant (PM, NO_x, CO, HCs) emissions: how low should we go? *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0037-5>
- Zavala, M., Barrera, H., Morante, J., & Molina, L. T. (2013). Analysis of model-based PM_{2.5} emission factors for on-road mobile sources in Mexico. *Atmósfera*, 26(1), 109-124. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71065-8](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71065-8)