



EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE RESTRICCIÓN DE
CIRCULACIÓN Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN
VEHÍCULOS DE CARGA EN BOGOTÁ Y/O MUNICIPIOS
ALEDAÑOS.

*GiroZero: Dirigiendo el sector transporte automotor de carga en
Colombia hacia las cero emisiones.*

Autores:
Cristiam Gil, Gordon Wilmsmeier

13 de octubre de 2024



Este documento fue preparado por el proyecto GIRO ZERO de la Universidad de los Andes, Colombia, y la Universidad de Cardiff, Reino Unido, dentro del alcance del proyecto del Programa UK PACT entre el Reino Unido y Colombia.

Los autores desean agradecer a todos los colaboradores.

Las opiniones expresadas en este documento no han sido sometidas a revisión editorial por la parte contratante del proyecto, son responsabilidad exclusiva de los autores y pueden no coincidir con la de la entidad financiadora.



Índice

1. Introducción

2. Evaluación de medidas de restricción de circulación

- 2.1. Instancia real
- 2.2. Definición formal del problema

3. Modelo

4. Análisis

- 4.1. Los efectos aislados
- 4.2. Impacto en la circulación de vehículos
 - 4.2.1. Vehículos de carga
 - 4.2.2. Otros tipo de vehículos

5. Evaluación del impacto ambiental

- 5.1. Modelo
- 5.2. Definición de parámetros
- 5.3. Análisis
 - 5.3.1. Precursores de contaminantes atmosféricos
 - 5.3.2. contaminantes atmosféricos de larga vida
 - 5.3.3. contaminantes atmosféricos de corta vida

6. Conclusiones

7. Recomendaciones

1. Introducción

Este documento tiene como objetivo analizar las restricciones de circulación en Bogotá y sus municipios aledaños, así como cuantificar los impactos en la movilidad de los vehículos de carga, comparando los periodos previos y posteriores a la implementación del Decreto 840 de 2019 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019). Este decreto establece las condiciones y restricciones para el tránsito de vehículos de transporte de carga en el Distrito Capital, y ha sido posteriormente modificado por el Decreto 077 de 2020 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020).

El Decreto establece una zona de restricción la malla vial estructurada por: Carrera 16, Calle 164, Carrera 20, Calle 170, Avenida Boyacá, Avenida de La Esperanza, Carrera 30, Calle 24, Carrera 22, Carrera 24, Calle 6, Avenida Calle 3, Avenida de las Américas, Avenida Carrera 68, Autopista Sur, Avenida Villavicencio, Avenida Caracas, y Avenida Primero de Mayo.

En esta zona de restricción, se limita la circulación de vehículos de transporte de carga con un “peso bruto vehicular máximo” superior a 8,500 kilogramos, de lunes a viernes, entre las 06:00 y las 08:00 horas y entre las 17:00 y las 20:00 horas. Adicionalmente, se establecen dos restricciones complementarias que regulan la circulación según la antigüedad del vehículo y la zona geográfica donde solo puede operar un subconjunto de estos vehículos:

- Restricción las 24 horas del día: Se prohíbe la circulación de vehículos de carga con un peso superior a 3,500 kilogramos en la zona centro de la ciudad, que abarca el sector de La Candelaria, delimitada por la Carrera 9 y la Avenida Circunvalar, y desde la Avenida Jiménez hasta la Calle 7.
- Se prohíbe la circulación de vehículos de carga con más de 20 años de antigüedad en toda la ciudad de lunes a viernes, entre las 5:30 a.m. y las 8:00 a.m. y entre las 4:30 p.m. y las 7:00 p.m. Además, estos vehículos están sujetos a un pico y placa rotativo que se aplica desde las 5:30 a.m. hasta las 9:00 p.m., limitándose a un solo día a la semana.

El Decreto también establece exenciones a las restricciones mencionadas para los siguientes tipos de vehículos: (i) vehículos de emergencia; (ii) vehículos de valores, así como aquellos que transportan alimentos perecederos, animales vivos, flores y gases medicinales; (iii) vehículos operativos de empresas de servicios públicos domiciliarios; (iv) vehículos de transporte de materiales y maquinaria para obras públicas en servicio; (v) vehículos eléctricos y de cero emisiones, según lo indicado en la Ley 1964 de 2019; y (vi) vehículos de carga que cuentan con la Resolución de Aprobación del Programa de Autorregulación Ambiental, regulado por la Resolución 1869 de 2006 de la Secretaría Distrital de Ambiente.

2. Evaluación de medidas de restricción de circulación

2.1. Instancia real

El análisis se dividió en dos momentos de implementación, $p \in P$: el primero corresponde a la etapa previa comprendida entre enero de 2018 y marzo de 2020, mes en el cual se dio inicio legal a la emergencia sanitaria por COVID-19 en Colombia. Durante este periodo, se reflejan las condiciones previas a los cambios normativos. El segundo periodo abarca desde julio de 2022, mes posterior al fin decretado de la emergencia sanitaria, hasta abril de 2024. Estos dos intervalos permiten un análisis comparativo para medir los avances logrados.

El número de observaciones que alimentan el modelo en estos dos periodos son 229.044, donde una observación se define como la cantidad de vehículos de un tipo circulando en una dirección del flujo en una intersección en un momento horario del día en una fecha específica. Las franjas horarias del día, $h \in H$, se definieron en intervalos de 15 minutos desde las 5:00 a.m. hasta las 11:00 p.m., para facilidad en la interpretación de resultados se mencionan intervalos de una hora. Cada observación registra una de las direcciones de flujo ($w \in W_z$): norte, sur, occidente y oriente de las siguientes diez Intersecciones de la ciudad ($z \in Z$):

- Avenida las Américas - Transversal 39A bis
- Carrera 10 - Avenida Calle 19
- Avenida caracas - Calle 53
- Autopista norte - Avenida Calle 127
- Autopista norte - Calle 170
- Carrera 68 - Avenida el dorado
- Carrera 68 - Autopista sur
- Avenida Boyaca - Calle 72
- Avenida Ciudad de Cali - Avenida Centenario
- Avenida caracas - Calle 84 sur

El análisis incluyó seis tipos de vehículos ($v \in V$), clasificados en vehículos de carga y otros. Los vehículos de carga tiene tres tipos: de dos ejes (C2), tres ejes (C3) y cuatro o más ejes ($\geq C4$). Los otros tipos de vehículos incluyen automóviles, motocicletas y buses. Flujo de buses articulados de Transmilenio y de bicicletas tienen vías exclusivas cada uno en las intersecciones analizadas, consecuentemente se asumió estos medios de transporte no tienen impacto sobre el flujo de otro tipo de vehículos entonces estos datos no fueron incluidos en el análisis. Se asumió que cada tipo de vehículo utiliza un único tipo de combustible ($f \in F_v$): diésel para vehículos de carga y buses, mientras que los automóviles y motocicletas emplean gasolina. Otros combustibles no son representativos en el mercado. Si bien la tecnología de estándares de emisión ha alcanzado el nivel Euro 6 o Euro VI, en Colombia la mayoría de la flota aún opera bajo estándares menores o iguales a Euro 4, o su equivalente en vehículos de carga. La participación en la flota, para todos los tipos de vehículos, de normas de emisión más altas fueron menores y no se tuvieron en cuenta.

En este estudio se abordaron ocho contaminantes atmosféricos, $i \in I$, clasificados en tres categorías: de larga vida (contribuyen al cambio climático), de corta vida (afectan la salud pública) y los precursores de contaminantes (interactúan en la atmósfera para formar contaminantes secundarios). El dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4)

y el óxido nitroso (N_2O) se contemplan como contaminantes de larga vida. Entre los contaminante de corta vida se encuentran el material particulado de 2.5 micrómetros o menor ($PM_{2,5}$), las partículas sólidas de tamaño no mayor a 23 nanómetros (SPN_{23}) y el amoníaco (NH_3). Mientras los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) se definen como precursores de contaminantes.

2.2. Definición formal del problema

Dado la implementación de un Decreto que legisla sobre el tránsito de vehículos de carga, se busca determinar en diferentes momentos de tiempo (i) su impacto en la circulación de la flota de vehículos de una ciudad, que emplean diversos estándares de emisión y tipos de combustibles, y (ii) su impacto en la emisión de contaminantes atmosféricos en múltiples intersecciones (puntos geográficos) con flujo en diferentes direcciones. La definición formal de cada uno de los conjuntos sobre los cuales el problema se estructura son descritos formalmente en el cuadro 1.

Conjunto	Definición
$p \in P$	Momentos de implementación del Decreto.
$h \in H$	Franjas horarias en un día típico.
$z \in Z$	Intersecciones.
$w \in W_z$	Direcciones del flujo del tráfico en la intersección $z \in Z$.
$v \in V$	Tipos de vehículos.
$f \in F_v$	Combustibles predominantes por el tipo de vehículo $v \in V$ en el contexto colombiano.
$t \in T_v$	Estándares de emisiones euro del tipo de vehículo $v \in V$ predominante en el contexto colombiano.
$i \in I$	Conjunto de contaminantes atmosféricos emitidas por el parque automotor debido al consumo de combustible.
$n \in N$	Conjunto de observaciones del estudio, una observación se produce en un día, mes y año específico.

Cuadro 1. Conjuntos y subconjuntos empleados en la metodología

Variable	Definición
$TRAF_{z w v}^{h n}$	Cantidad de vehículos de la categoría $v \in V$ que atravesaron la intersección $z \in Z$ en la dirección del flujo $w \in W_z$ durante la franja horaria $h \in H$ registrados por la observación $n \in N$, (<i>veh</i>).
$EMIS_{i h z v}^n$	Emisiones generadas por unidad de distancia de un vehículo tipo $v \in V$ del contaminante atmosférico $i \in I$ en la intersección $z \in Z$ durante la franja horaria $h \in H$ registrados por la observación $n \in N$, (<i>grams/km – veh</i>).

Cuadro 2. Variables de la metodología

Dos variables son creadas para dar respuesta a la magnitud de cada uno de los impactos planteados. La primera variable, $TRAF_{zvw}^{hn}$, busca cuantificar el tráfico mientras que la segunda variable, $EMIS_{ihzv}^n$, busca estimar la magnitud de los contaminantes atmosféricos de este tráfico. El cuadro 2 presenta la definición precisa de estas variables.

3. Modelo

En el flujo del tráfico influyen diversos factores. Para realizar una comparación adecuada en la implementación de una política pública, es necesario aislar aquellos factores que no ofrecen una respuesta directa o que no guardan relación con la pregunta de investigación. En este caso, el objetivo del estudio es determinar si los patrones de movilidad en Bogotá, en distintos momentos del día y para diversos tipos de vehículos, cambiaron tras la implementación del Decreto 840 de 2019.

Las variaciones causadas por factores como las características físicas de las intersecciones (por ejemplo, el número de carriles), el día específico de la semana y el mes en que se realizó una observación, así como el crecimiento del parque automotor (reflejado en el flujo de tráfico) para cada tipo de vehículo, podrían llevar a conclusiones erróneas si no son adecuadamente controladas. Por esta razón, en el cálculo del tráfico (ecuación 1), cada uno de estos elementos se incluye como una variable a evaluar, permitiendo obtener un estimador asociado al tráfico por hora para cada tipo de vehículo, minimizando al máximo el ruido en la información.

$$TRAF_{zvw}^{hn} = QVEH_v \cdot (1 + \lambda_{zw}) \cdot (1 + \delta_d) \cdot (1 + \beta_m) \cdot (1 + \gamma_{p(n)}^v) \cdot \Omega_{hv}^{p(n)} + \bar{\epsilon}_n \quad (1)$$

$$\Delta QVEH_{hv} = \frac{\Omega_{hv}^2}{\Omega_{hv}^1} - 1 \quad \forall v \in V, h \in H \quad (2)$$

Variable	Definición
$QVEH_v$	Flujo base de vehículos tipo $v \in V$ en un periodo de 15 minutos.
λ_{zw}	Cambio porcentual del flujo de vehículos en la intersección $z \in Z$ en la dirección del flujo $w \in W_z$.
δ_d	Cambio porcentual efecto de la estacionalidad semanal del flujo en la ciudad el día de la semana $d \in D$.
β_m	Cambio porcentual efecto de la estacionalidad mensual del flujo en la ciudad en el mes $m \in M$.
γ_p^v	Crecimiento anual del flujo de los vehículos tipo $v \in V$ en la etapa de implementación del decreto $p \in P$.
Ω_{hv}^p	Estimador asociado al tráfico de vehículos tipo $v \in V$ durante la franja horaria $h \in H$ en la etapa de implementación de Decreto $p \in P$.
ϵ_n	Error estocástico de observación $n \in N$.

Cuadro 3. Variables del modelo de normalización del tráfico de vehículos.

La estimación de las distintas variables asociadas al tráfico puede llevarse a cabo mediante una regresión lineal del tipo log-log, seguida del pos-procesamiento de los coeficientes obtenidos para aislar las variables descritas en el cuadro 3 y proceder con el análisis correspondiente. Este método se propone debido a su eficiencia en el cálculo de estimadores insesgados de los efectos identificados, que interactúan en el problema. Todos las intersecciones se encuentran bajo la influencia del Decreto, por ello la no posibilidad de usar un enfoque diff-in-diff.

4. Análisis

4.1. Los efectos aislados

El modelo propuesto para explicar los valores del flujo de tráfico ($TRAF_{zwj}^{hn}$) presenta un R-cuadrado múltiple con un valor de 0.721, implica aproximadamente el 72.1 % de la variabilidad en la variable dependiente puede ser explicada por las variables independientes incluidas en el modelo. Esto sugiere un ajuste adecuado, ya que una proporción considerable de la variabilidad se explica por el modelo. Además de un R-cuadrado ajustado de igual valor lo que indica que todas las variables incluidas son significativas. Esto implica que el modelo explica la relación entre las variables y que las variables independientes aportan valor.

El flujo base de vehículos ($QVEH_v$) pre implementación del Decreto revela una predominancia notable de automóviles, que alcanzan un total de 90.51 unidades, seguidos por los buses con 17.01 (aquellos que no usan el carril exclusivo de Transmilenio) y las motocicletas con 36.36. En cuanto a los vehículos de carga, los C2 representan 7.39 unidades, mientras que los C3 y los de 4 ejes o más ($\geq C4$) tienen una presencia más limitada, con 1.13 y 1.38 unidades respectivamente. En el periodo pos implementación, se observan cambios significativos en el crecimiento (γ_p^v) de cada categoría de vehículos. Mientras que los automóviles experimentan una leve disminución del 2.0 %, los buses sufren una drástica caída del 35.0 %. En contraste, las motocicletas registran un notable incremento del 41.0 %, indicando un cambio en las preferencias de movilidad de los ciudadanos. Se calcula que los automóviles representan un 54.0 %, los buses un 20.3 % y las motocicletas un 10.9 % del flujo en termino de vehículos equivalentes, lo que subraya la creciente preponderancia de las motocicletas en el tráfico urbano.

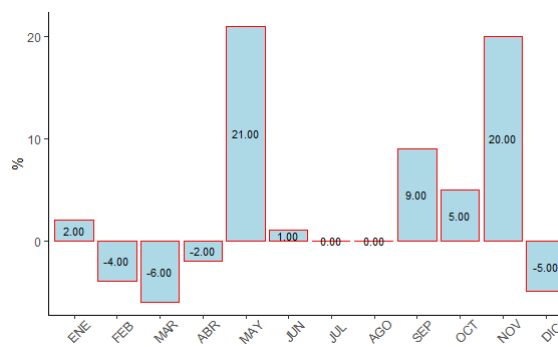


Figura 1. Estacionalidad del tráfico de vehículos por mes en el periodo 01/2018-04/2023

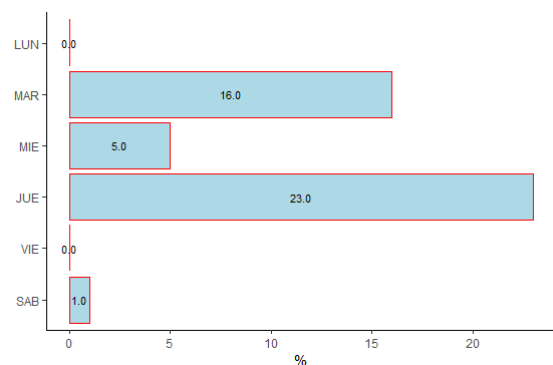


Figura 2. Estacionalidad del tráfico de vehículos por día de semana en el periodo 01/2018-04/2023

De manera similar, los vehículos de carga muestran cambios modestos al comparar los períodos antes y después de la implementación, con una disminución del 4.0 % en los camiones C2, un aumento del 1.0 % en los camiones C3, y un incremento del 8.0 % en los camiones con cuatro o más ejes ($\geq C4$). Estos datos sugieren una transformación en la dinámica del tráfico urbano, donde, tras la pandemia, se han reconfigurado las modalidades de transporte, favoreciendo el uso de motocicletas, una mayor demanda de vehículos de carga de gran tamaño y un detrimento de la disponibilidad del transporte público. En este contexto, los vehículos de carga C2 contribuyen con un 11.0 %, los C3 con un 1.7 % y los $\geq C4$ con un 2.1 % del flujo vehicular. Finalmente, las gráficas 1 y 2 muestran los cambios porcentuales asociadas a las estacionalidades mensual (β_m) y semanal (δ_d), respectivamente.

4.2. Impacto en la circulación de vehículos

En esta sección se analiza el estimador asociado al tráfico de vehículos durante la franja horaria en la etapa de implementación del Decreto (Ω_{hv}^p), sus resultados evidenciaran o no el impacto las restricciones de circulación en una ciudad. A continuación se describen los hallazgos más relevantes y las principales hipótesis sobre los cambios observados a lo largo del día en seis tipos de vehículos, tanto en el período previo como posterior a la implementación del Decreto 840 de 2019 por parte de la Alcaldía de Bogotá. El análisis comienza con los vehículos destinados al transporte de carga y luego se extiende a otros tipos. En general, se observa que, aunque existen cambios en los patrones de comportamiento, no todos pueden atribuirse directamente a la implementación del Decreto; muchos de ellos son consecuencia de la adaptación de la ciudadanía tras la pandemia.

4.2.1. Vehículos de carga

En cuanto a los vehículos de carga, específicamente aquellos de 2 ejes (C2), la comparación del flujo en los periodos previos y posteriores a la implementación del Decreto muestra tres cambios significativos en los patrones de tráfico a lo largo del día. El primer cambio es la disminución total del flujo entre las 5 a.m. y las 8 a.m., como consecuencia directa de la restricción en estos horarios impuesta por el Decreto. El segundo cambio es la reducción del flujo en todos los momentos posteriores a las 3 p.m., una hora y media antes del inicio de la restricción vespertina. Este comportamiento podría deberse a que los vehículos que recorren largas distancias por la ciudad anticipan la posibilidad de incumplir la norma, dado el aumento en los tiempos de desplazamiento provocado por el denso tráfico de la capital. El tercer cambio es la concentración de la mayoría de las operaciones en el horario comprendido entre las 8 a.m. y las 3 p.m., con un aumento porcentual en el flujo de vehículos del 11 % al 17 % entre las 9 a.m. y las 2 p.m. (ver Figura 3).

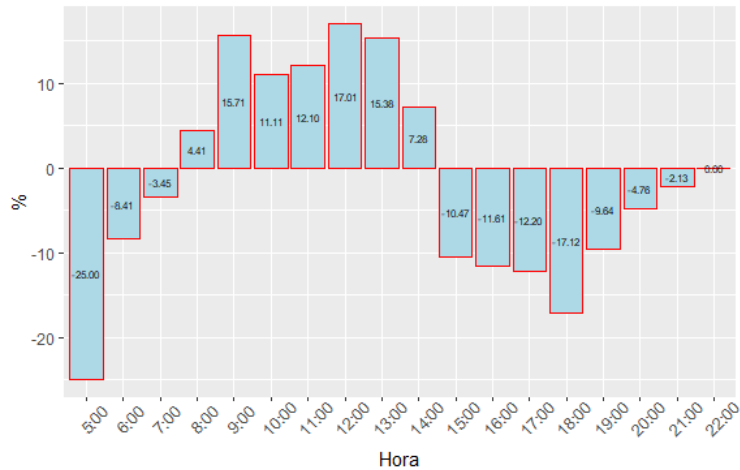


Figura 3. Cambio porcentual horario del tráfico de vehículos de carga tipo C2 pre y post Decreto 840/2019

En el caso de los vehículos de carga de tres ejes (C3) y de cuatro ejes o más ($\geq C4$), se identifican tres efectos relevantes. El primero es el incremento de la actividad del transporte de carga entre las 6 a.m. y las 9 a.m., con aumentos de hasta un 11% para los vehículos C3 y hasta un 39% para los vehículos $\geq C4$, a pesar de la restricción impuesta por el Decreto 840 de 2019. Esto podría explicarse por las excepciones contempladas en el Decreto, que permiten el tránsito de ciertos vehículos, como los dedicados al transporte de alimentos perecederos, animales vivos, concreto, combustible, acero, productos de consumo humano y otros insumos esenciales para la industria local y nacional. En general, después de las 10 a.m., se observan disminuciones o variaciones menores en el flujo, lo que sugiere que estos incrementos en las primeras horas pueden ser un efecto cruzado. En otras palabras, los vehículos exentos podrían haber sido incentivados a circular en horarios en los que otros tipos de vehículos de carga estaban restringidos.

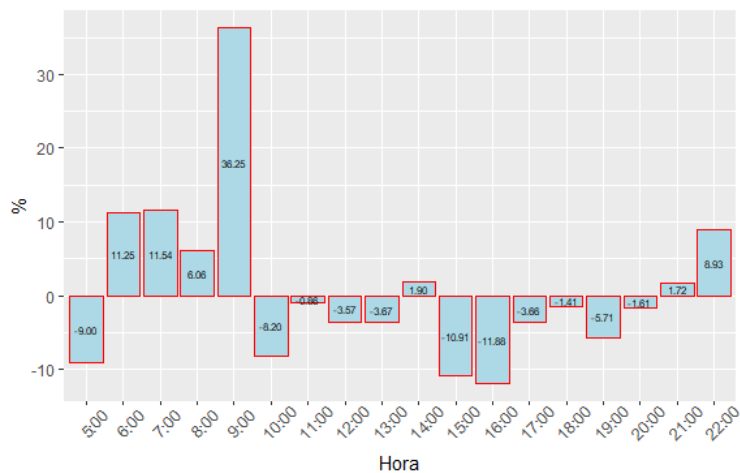


Figura 4. Cambio porcentual horario del tráfico de vehículos de carga tipo C3 pre y post Decreto 840/2019

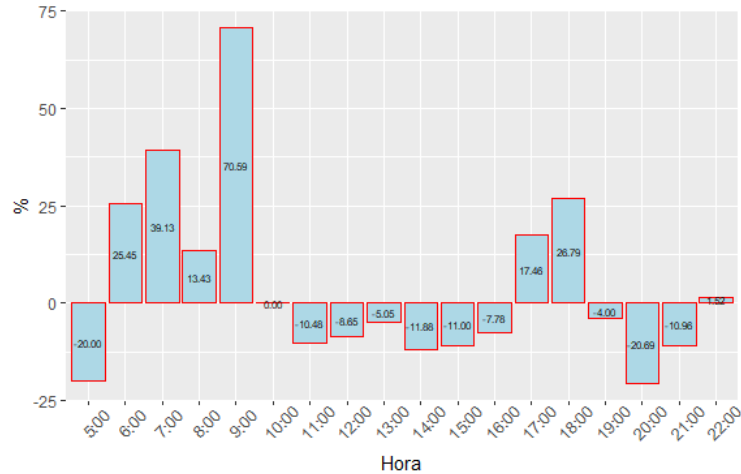


Figura 5. Cambio porcentual horario del tráfico de vehículos de carga tipo C4 pre y post Decreto 840/2019

El segundo efecto es el aumento del tráfico justo al finalizar el primer horario de restricción del Decreto, en el intervalo entre las 9 a.m. y las 10 a.m. En este periodo, se observan incrementos del 36 % y del 70 % en los patrones horarios de los vehículos de carga tipo C3 y $\geq C4$, respectivamente. Es probable que empresas que no están incluidas en las excepciones, pero que no pueden detener su maquinaria productiva, operen estos vehículos tan pronto como les es posible, ya que no son lo suficientemente flexibles para utilizar vehículos de menos de 8.5 toneladas, como permite la restricción. Estas empresas buscan minimizar el impacto económico al operar sus vehículos en el primer momento posible, dado que no tienen la capacidad de ajustar sus operaciones para recibir las cargas en otros momentos del día. Estos dos tipos de vehículos son capaces de transportar hasta 28 toneladas, lo que los hace rentables por las economías de escala que ofrecen.

El tercer efecto es una reducción del tráfico de aproximadamente un 11 % en vehículos de carga tipo C3 que cumplen con alguna de las excepciones del Decreto 840/2019, durante el horario de 3p.m. a 5p.m. y su incremento de hasta el 9 % en el tráfico entre las 9 p.m. y las 11 p.m. Estos cambios coinciden con los límites horarios establecidos por la restricción complementaria del mismo decreto para vehículos de carga con más de 20 años de antigüedad. Cabe recordar que el 68 % de estos vehículos tiene un estándar de emisión pre-euro. Se infiere parte de estos vehículos fueron reemplazados por vehículos tipo $\geq C4$, lo que explicaría el aumento en el flujo de entre un 17 % y un 27 % observado entre las 5p.m. y las 7p.m.

4.2.2. Otros tipo de vehículos

En lo que respecta a los vehículos particulares, tanto automóviles como motocicletas, se han evidenciado cambios en sus patrones de movilidad. El tráfico después de las 6 p.m. ha disminuido hasta en un 27 %, mientras que en las horas anteriores a las 6 p.m. la reducción fue cercana al 18 %. Estos cambios podrían reflejar una migración del tráfico desde los horarios vespertinos y nocturnos hacia los diurnos, lo que sugiere una transformación en la dinámica de la ciudad. La disminución del flujo nocturno podría ser un comportamiento residual de la pandemia, cuando los habitantes adaptaron sus rutinas, aprendiendo a acceder a productos y servicios en nuevos horarios.

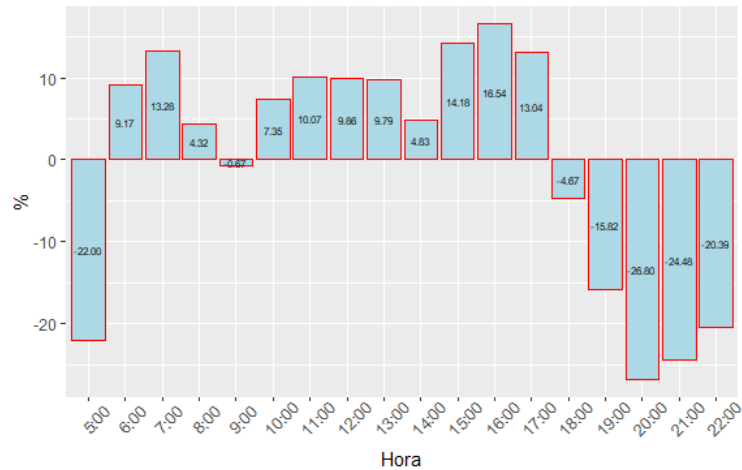


Figura 6. Cambio porcentual horario del tráfico de automóviles pre y post Decreto 840/2019

La mayor concentración de población proveniente de municipios aledaños en Bogotá durante los horarios laborales, impulsada por las afectaciones económicas derivadas de la pandemia, que han convertido a la capital en un foco de mayores oportunidades laborales es una explicación plausible. En cuanto a los buses no Transmilenio (gráfica 8), se observan disminuciones significativas en las horas pico de la mañana y la tarde, pero importantes aumentos en las horas valle (incluyendo el mediodía). Ante la disminución del flujo de buses mencionada previamente, y dada la imposibilidad de utilizar carriles exclusivos, como los destinados a los vehículos del transporte masivo, que otorgan una ventaja competitiva en momentos de alto tráfico, el sector privado se ha enfocado en operar en horarios donde puede aprovechar sus características diferenciadoras. Estas incluyen la cobertura de zonas de la ciudad donde el sistema masivo no tiene presencia y la posibilidad de circular a mayores velocidades en horarios donde el flujo de automóviles y motocicletas es menor, como se observa en las horas nocturnas, después de las 8 p.m.

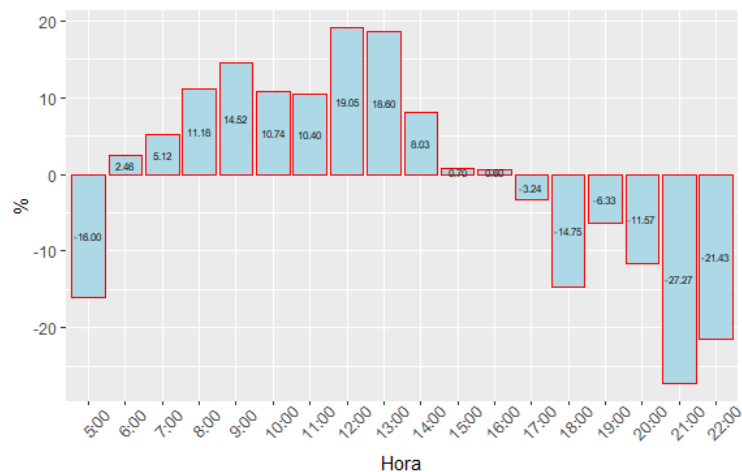


Figura 7. Cambio porcentual horario del tráfico de motocicletas pre y post Decreto 840/2019

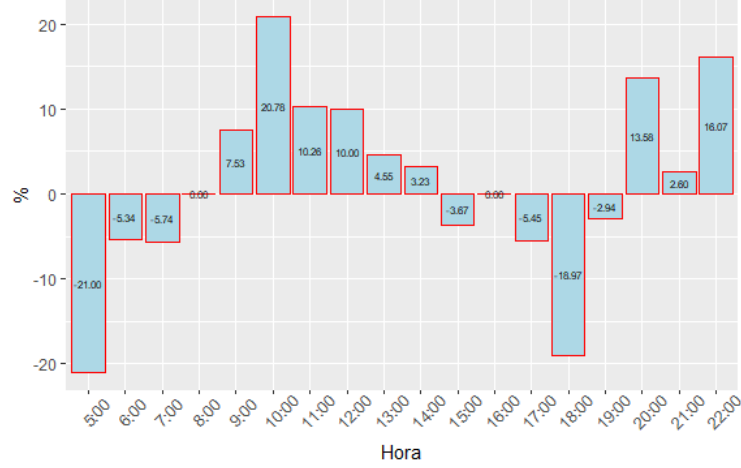


Figura 8. Cambio porcentual horario del tráfico de buses no Transmilenio pre y post Decreto 840/2019

5. Evaluación del impacto ambiental

5.1. Modelo

En esta sección se estiman las diferentes emisiones contaminantes atmosféricas por unidad de distancia, \overline{EMIS}_{ihzv}^n . Estas emisiones son generadas en una intersección específico durante un horario del día por un tipo de vehículo (ver ecuación 3). Posteriormente, se calculará la diferencia porcentual entre los momentos pre y post declaración (ver ecuación 4). Es importante destacar que se evalúan las emisiones contaminantes atmosféricas por unidad de distancia ya que no se dispone de información sobre la productividad media (en términos de distancia recorrida atribuible a esa intersección) de cada tipo de vehículo, lo que dificulta obtener una magnitud total de las emisiones liberadas a la atmósfera. Sin embargo, se calcula la emisión media por kilómetro por tipo de vehículo, considerando su estándar de emisiones y el tipo de combustible utilizado; estos dos elementos son fundamentales para lograr un cálculo preciso.

$$\overline{EMIS}_{ihzv}^n = \sum_{w \in W_z} \overline{TRAF}_{zvw}^{hn} \cdot \sum_{f \in F_v} \sum_{t \in T_v} MIX_v^{ft} \cdot LCP_{iv}^{ft} (\overline{S}_{zw}^{hn}) \quad \forall i \in I, z \in Z, v \in V, h \in H, n \in N \quad (3)$$

$$\Delta \overline{EMIS}_{ihzv} = \frac{\overline{EMIS}_{ihzv}^2}{\overline{EMIS}_{ihzv}^1} - 1 \quad \forall i \in I, z \in Z, v \in V, h \in H \quad (4)$$

Para realizar una comparación adecuada entre dos momentos temporales diferentes, es necesario normalizar la magnitud del tráfico y calcular la velocidad esperada que afecta dicho tráfico. De esta manera, ambos flujos de tráfico se ven influenciados por las mismas variables: igual intersección, día, mes y año, con la excepción el estimador de la franja horaria (Ω_{hv}^p), que es el fenómeno cuyo impacto queremos medir en ambos momentos. Los parámetros requeridos para el cálculo de las emisiones por unidad de distancia se describen en el Cuadro 4.

Parámetro	Definición
LCP_{iv}^{ft}	Magnitud de las emisiones de la sustancia $i \in I$ por unidad de distancia de un vehículo de la categoría $v \in V$ con el estándar de emisiones euro $t \in T_v$ y combustible $f \in F_v$, (<i>grams/km</i>).
MIX_v^{ft}	Porcentaje de vehículos de la categoría $v \in V$ que emplean el estándar de emisiones euro $t \in T_v$ conjunto con el combustible $f \in F_v$, (%).
S_{zw}^{hn}	Velocidad media de viaje de un vehículo entre la intersección $z \in Z$ y su intersección predecesor en la dirección del flujo $w \in W_z$ durante la franja horaria $h \in H$ registrados por la observación $n \in N$, (<i>km/hora</i>).

Cuadro 4. Parámetros de la metodología

5.2. Definición de parámetros

En base a el informe de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de Bogotá (SDA, 2021), se obtuvo el porcentaje de cada tipo de vehículo en diversos estándares de emisión Euro (MIX_j^{ft}). Este parámetro es crucial, ya que cada tipo de vehículo, combustible y estándar Euro genera diferentes curvas de emisiones para cada contaminante atmosférico, lo que permite lograr una mayor precisión y fidelidad en la representación del estado actual de la flota en la ciudad.

	Combustible	Pre-Euro	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV
C2	Diésel	58.98 %	7.68 %	13.31 %	0.00 %	20.03 %
C3	Diésel	68.76 %	0.00 %	15.21 %	0.00 %	16.02 %
≥ C4	Diésel	68.70 %	0.00 %	15.25 %	0.00 %	16.05 %
Autos	Gasolina	14.09 %	31.30 %	54.61 %	0.00 %	0.00 %
Motocicletas	Gasolina	0.00 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %	0.00 %
Buses	Diésel	61.88 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	38.12 %

Cuadro 5. Porcentaje de vehículo, combustible y estándar Euro. Nota: Euro V y VI excluidos.

El parámetro de velocidad media de viaje (S_{zw}^{hn}) se obtuvo a partir del tablero de visualización de datos GPS del proyecto Giro-Zero (2024), que recopiló registros de movimientos de vehículos de carga en Bogotá durante los últimos tres años. Usando estos registros, se identificaron los cuadrantes que coincidían con las direcciones de flujo de los 10 intersecciones seleccionadas, lo que permitió extrapolar los cambios en velocidad a cada una de las observaciones disponibles en el archivo maestro de la Secretaría de Movilidad de Bogotá (SMB). Esto supone el flujo de cualquier tipo de vehículo se movió a la misma velocidad que el tráfico de vehículos de carga.

El libro guía de inventario de emisiones contaminantes atmosféricos de la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2023) permite calcular diferentes curvas de emisiones para diversos niveles de velocidad (LCP_{ij}^{ft}) para cada uno de los tipos de vehículos analizados (o sus equivalentes). Esto hace posible no solo capturar el efecto del cambio en el tráfico, sino también el efecto del cambio en la velocidad. El uso de factores promedios podría llevar a la conclusión errónea de que el impacto en las emisiones es igual al impacto del cambio en el tráfico, lo cual no refleja la realidad.

Es fundamental resaltar que, para calcular el impacto de diferentes políticas sobre las emisiones en relación con el tráfico, es obligatorio contar con una estimación real de la velocidad media de viaje para cada una de las observaciones. Por ello, se recomienda incorporar la estimación de la velocidad del flujo de vehículos junto con su conteo. igualmente, respecto a las medidas de mitigación por alerta o emergencia ambiental es importante contar con datos e información completa y precisa del momento de aplicación de esta reglamentación de lo contrario no es posible su evaluación.

5.3. Análisis

El cambio real entre los periodos pre y post implementación del Decreto se presenta en la gráfica 12. Sin embargo, es importante destacar que estos mismos periodos coinciden con los momentos pre y post a la cuarentena por COVID-19. Por lo tanto, los efectos aquí presentados no pueden ser atribuidos exclusivamente a las restricciones del Decreto. Como se ha evidenciado en otros apartados, también pueden reflejar cambios en el comportamiento de la población en observación, es decir, los habitantes de la ciudad de Bogotá y sus municipios aledaños, como también otros cambios en el entorno y las condiciones económicas y sociales. De tal forma, las conclusiones presentadas en este apartado corresponden a un ejercicio de comprensión de la metodología y no deben interpretarse como el resultado directo de la aplicación del Decreto.

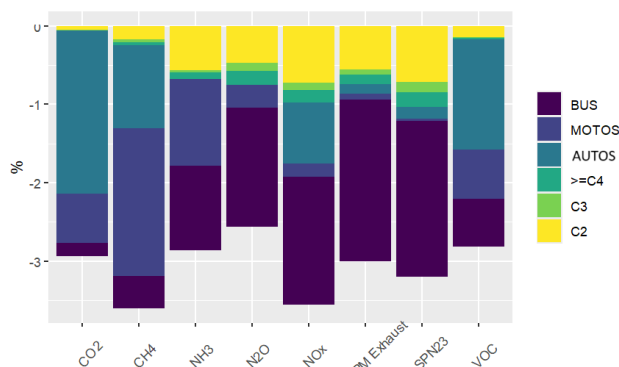


Figura 9. Cambio porcentual por tipo de contaminante atmosférico producto de la implementación del Decreto 840/2019

Aunque el Decreto restringe el tránsito de vehículos de carga, el sistema de tránsito es dinámico y está compuesto por diversos tipos de vehículos que operan con múltiples propósitos y compiten por recursos, como las vías. De acuerdo a esto, un cambio, ya sea en los recursos o en los actores, puede influir en el comportamiento del resto del sistema. La variación atribuible al Decreto se estima en alrededor del 3% para cualquiera de las sustancias analizadas (ver figura 9). Esta variación puede explicarse por la interacción de dos factores:

- (i) Los desplazamientos de los flujos vehiculares hacia horas valle, y
- (ii) la mejora en la velocidad durante las horas pico debido a un menor tráfico, lo que finalmente genera un efecto neto positivo en las emisiones, como consecuencia de las diversas variaciones en el flujo y la velocidad a lo largo del día.

En cuanto a la variación entre 2018 y 2024 (figura 12), se identificaron dos eventos concretos que impulsan estos cambios:

- (i) Un crecimiento inusitado del 41 % en el tráfico de motocicletas, y
- (ii) un notable aumento del 35 % en el tráfico de buses.

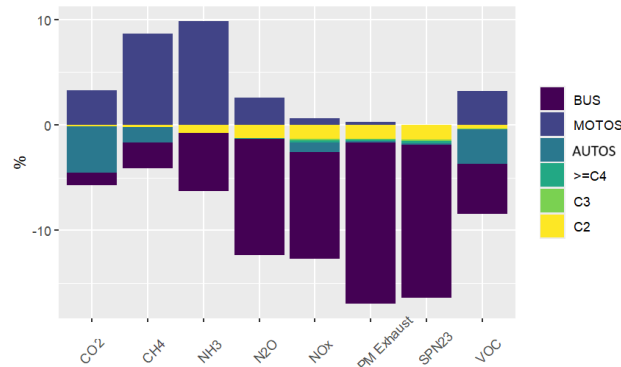


Figura 10. Cambio porcentual por tipo de contaminante atmosférico entre 2018 y 2024

En el primer caso, las motocicletas contribuyeron principalmente al incremento de contaminantes atmosféricos de larga vida, como el dióxido de carbono y el metano (alrededor del 10 % en cada uno). En el segundo caso, los buses impulsaron una disminución en los contaminantes atmosféricos de corta vida, como el material particulado de 2.5 micrómetros o menor (PM2.5) y el número de partículas sólidas de tamaño no mayor a 23 nanómetros (SPN23), con una reducción del -15 % en cada uno. Este cambio se atribuye a que los vehículos reemplazados corresponden a estándar pre-euro. A continuación, se presentan las gráficas que muestran el efecto del Decreto sobre estas sustancias a lo largo del día. Es de resaltar que los efectos de estas sustancias fueron directamente proporcionales a las variaciones en las magnitudes del tráfico.

Los contaminantes atmosféricos presentan variaciones en tres franjas horarias durante el día. Entre las 8 a.m. y la 1 p.m., donde el flujo vehicular equivalente representa alrededor del 29 %, se registran incrementos porcentuales positivos, con picos superiores al 10 %. En cambio, entre las 5 a.m. y las 8 a.m. (17 % del flujo vehicular) y entre la 1 p.m. y las 11 p.m. (54 % del flujo vehicular), se observan disminuciones porcentuales en la emisión de contaminantes, con algunos picos que superan el -20 %.

5.3.1. Precursores de contaminantes atmosféricos

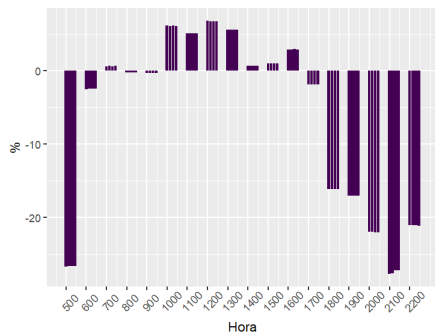


Figura 11. Cambio porcentual horaria de emisiones de VOC pre y post Decreto 840/2019

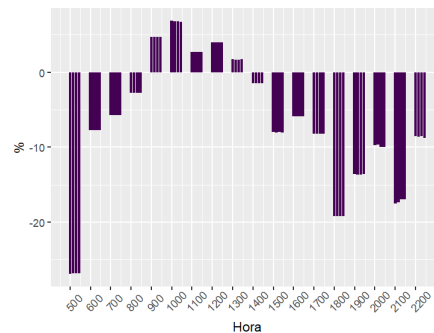


Figura 12. Cambio porcentual horaria de emisiones de NO_x pre y post Decreto 840/2019

5.3.2. contaminantes atmosféricos de larga vida

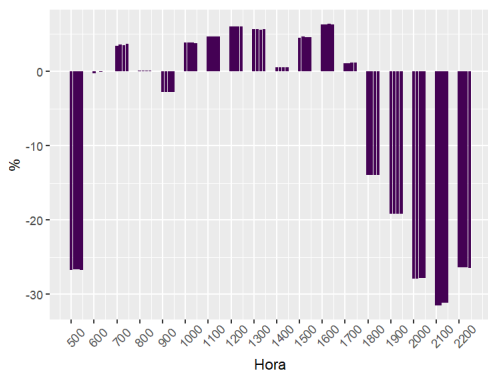


Figura 13. Cambio porcentual horaria de emisiones de CO_2 pre y post Decreto 840/2019

5.3.3. contaminantes atmosféricos de corta vida

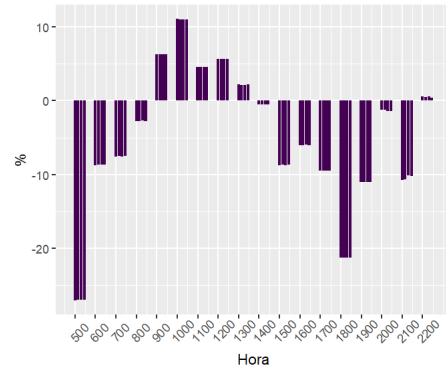


Figura 16. Cambio porcentual horaria de emisiones de $PM_{2,5}$ pre y post Decreto 840/2019

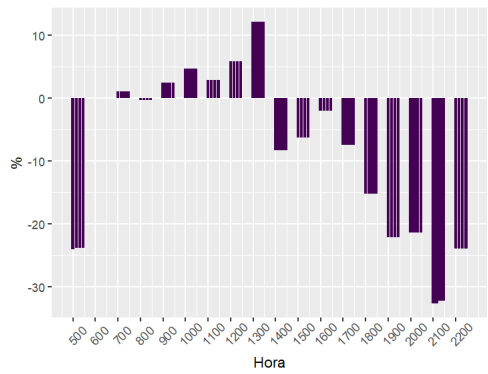


Figura 14. Cambio porcentual horaria de emisiones de CH_4 pre y post Decreto 840/2019

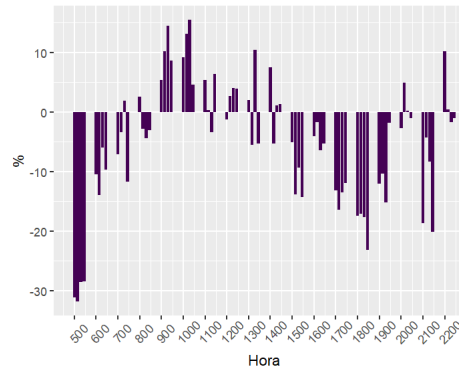


Figura 17. Cambio porcentual horaria de emisiones de SPN_{23} pre y post Decreto 840/2019

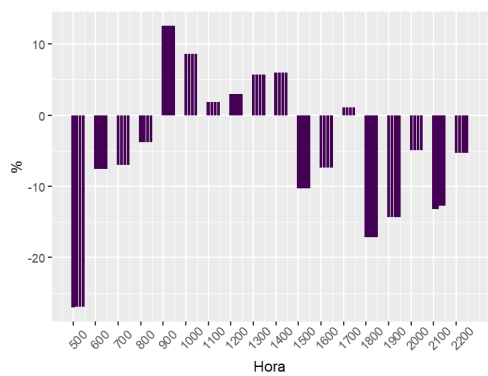


Figura 15. Cambio porcentual horaria de emisiones de N_2O pre y post Decreto 840/2019

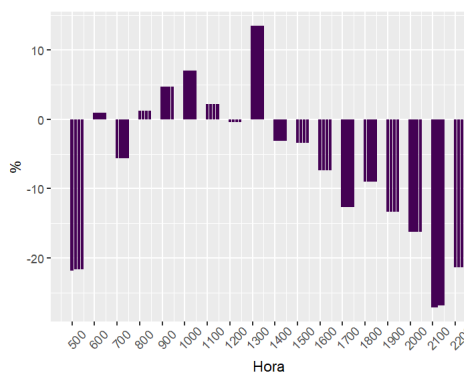


Figura 18. Cambio porcentual horaria de emisiones de NH_3 pre y post Decreto 840/2019

6. Conclusiones

Existe un efecto positivo del Decreto 890/2019 en la reducción de emisiones en las intersecciones de la muestra, alrededor de un 3 % de disminución en todas las sustancias contaminantes atmosféricos (larga y corta vida) al ser este impacto aislado de otros tipos de impacto.

Los vehículos de carga (sobre los cuales legisla el Decreto) representan el 14.8 % del flujo vehicular. Existe un impacto económico no medido del Decreto en este tipo de vehículos del cual se debe realizar un análisis del balance de restringir su circulación en términos del impacto real aislado.

Existe evidencia (i) cambios relevantes en los patrones de tráfico de vehículos particulares y motocicletas a lo largo del día, positivos en horarios previos a las 5pm y negativos en horarios posteriores, y (ii) posibles efectos cruzados, ej. el incremento del flujo de vehículos particulares en horas donde el flujo de carga se encuentra restringido. Ejemplo: el impacto de la pandemia podría haber derivado un movimiento laboral desde municipios aledaños a Bogotá y con ello explicando el crecimiento sustancial del flujo neto de motocicletas.

El impacto bruto de las emisiones impulsado por cambio en el flujo de dos tipos de vehículos: (i) una disminución en la emisión de sustancias contaminantes atmosféricos de corta vida debido al decrecimiento del -35 % del flujo neto de buses y (ii) un incremento de emisión de sustancias contaminantes atmosféricos de larga vida debido al crecimiento del 41 % del flujo neto de motocicletas.

Es fundamental monitorear el tráfico y su velocidad para evaluar su impacto y entender la naturaleza de los cambios significativos. Las conclusiones derivadas del análisis de un solo tipo de vehículo, sin tener en cuenta los efectos cruzados o las reacciones de los conductores que ajustan su comportamiento para minimizar impactos o aprovechar ventajas frente a otros tipos de vehículos, en diferentes geografías o en distintos horarios, pierden validez. Esto se debe a que podrían generar resultados contrarios a los objetivos de las políticas públicas.

El decrecimiento del flujo neto de buses como efecto de una política efectiva de desintegración y/o reemplazo de vehículos con energías limpias y estándares actualizados en términos de emisiones se evidencia mucho más eficiente ($\sim 3\%$ vs $\sim 16\%$) que la sola restricción horaria.

Asimismo, tomar acciones aisladas como la restricción de los vehículos descarga que generan emisiones en horas pico solo hace que el problema se traslada a otros momentos del día. no implementar acciones efectivas como por ejemplo la desintegración de este tipo de vehículos. Según el inventario de misiones de la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA, 2021), de entre el 58 % y 68 % del parque automotor (según tipo de vehículo de carga) tienen estándares pre euro y alrededor de un 15 % adicional presentan estándar EURO I o EURO II.

Es evidente que reducir el tráfico y mejorar las velocidades de tránsito tiene un impacto en las emisiones, tanto a corto como a largo plazo. Sin embargo, para lograr un impacto duradero y de gran magnitud, la solución más efectiva es el recambio tecnológico: la renovación de vehículos con estándares de emisiones obsoletos por aquellos que incorporen tecnologías actuales y utilicen combustibles limpios.

7. Recomendaciones

El enfoque empleado actualmente para restringir el flujo de vehículos de carga es extensivo, la malla vial comprende toda la ciudad de Bogotá, ignora los efectos que puede tener en los municipios aledaños, estos hacen parte del mismo sistema., el comportamiento de otro tipo de vehículos y otros efectos en la económica. Conocer el objeto de estudio antes de intervenirlo se hace urgente y emplear toda información existente como la GPS se hace una obligación.

Es necesario en la medición no solo involucrar el conteo de cada tipo de vehículo tal y como se lleva a cabo actualmente, también es requerido registrar la velocidad de flujo de la intersección (en la dirección respectiva). La estimación de emisiones de contaminantes atmosférico, su magnitud, es directamente proporcional a la velocidad (pero no lineal) y análogamente la velocidad es influenciada por el tráfico de vehículos. Por tanto, el tráfico como la velocidad son obligatorios para la estimación exacta de las emisiones.

La data de secretaria de movilidad de Bogotá usada y disponible para el presente análisis corresponden a 10 intersecciones neurálgicas de la ciudad. No obstante, el Decreto 840/2019 describe una cuadrícula de 7 calles y 10 carreras/avenidas, esto representa potencialmente 70 intersecciones. Un evento, como la aplicación de un Decreto puede derivar en efectos cruzados tanto en vehículos, horarios e intersecciones (no incluidos) y su impacto estar en oposición a los efectos deseados, lo cual debe ser conocido, entendido y manejado.

Se recomienda el registro de data los tipos de vehículos sea adecuadamente definido (exhaustivo) y normalizado. vehículos de carga C2 ($\geq 8,5$ ton) y C3 (≤ 32 ton) en muchos casos hacen parte de la misma clasificación, sin embargo, su consumo de combustible y por ende sus emisiones por km tienen un margen amplio de diferencia. Incluir categorías de carga $\leq 3,5$ ton y entre $3,5 - 8,5$ ton.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá, D. (2019). Decreto 840 de 2019.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, D. (2020). Decreto 077 de 2020.
- EEA (2023). Emep/eea air pollutant emission inventory guidebook 2023.
- Giro-Zero (2024). Tablero de visualización de datos gps proyecto girozero.
- SDA (2021). Inventario de emisiones de bogotá, contaminantes atmosféricos.