

ING. OSCAR ALEJANDRO
SALAZAR SABAS

DETERMINACIÓN DE LOS CICLOS DE CONDUCCIÓN DE CAMIONES DE
CARGA EN ÁREAS CONGESTIONADAS

2022



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“PARÁMETROS DE ACTIVIDAD VEHICULAR
DE CAMIONES DE CARGA Y SU APLICACIÓN
EN LA GENERACIÓN DE INVENTARIOS DE
EMISIONES CONTAMINANTES”**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL
GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES Y
MOVILIDAD**

PRESENTA:

ING. OSCAR ALEJANDRO SALAZAR SABAS

DIRIGIDO POR:

DR. EDUARDO BETANZO QUEZADA

Santiago de Querétaro, Qro. Mayo 2022



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Parámetros de actividad vehicular de camiones de carga y su aplicación de la generación de inventarios de emisiones contaminantes

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Oscar Alejandro Salazar Sabas

Dirigido por:

Dr. Eduardo Betanzo Quezada

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Presidente

Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Secretario

Firma

Dr. Roberto de la Llata Gómez
Vocal

Firma

Dr. María de la Luz Pérez Rea
Suplente

Firma

M.I. Marco Luis Dorado Pineda
Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Universitario)

RESUMEN

El transporte de carga urbano es un importante contribuidor de emisiones contaminantes en las ciudades. Una brecha actual en la investigación orientada a la evaluación de emisiones móviles en México, es la falta de ciclos de conducción representativos para el transporte de carga. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue desarrollar un ciclo de conducción para vehículos de carga urbanos y compararlo con ciclos internacionales legislativos. La técnica de persecución de vehículo fue usada para recolectar datos de actividad vehicular a través de 37 recorridos dentro de la Zona de Monumentos Históricos de Querétaro. Una metodología combinando análisis de componentes principales, conglomerados por el método de k-medias y el modelo de la Cadena de Markov, fue utilizada para la construcción de los ciclos candidatos. Los resultados muestran que, comparados con el ciclo obtenido, los ciclos de conducción legislativos aplicados en México, subestiman contaminantes como NO_x y CO por más del 22 % y 48 %, para el New European Driving Cycle y Federal Test Procedure 75, respectivamente. Esto refleja que, el proceso de construcción de ciclos de conducción debe considerar a las diferentes clases vehiculares y sistemas de transporte ya que, cada uno de ellos presentan patrones únicos de manejo, haciendo cada ciclo de conducción significativamente distintos entre ellos.

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

SUMMARY

Urban freight transport is a significant contributor of pollutant emission in the cities. A current gap in mobile emissions evaluation in Mexico is the lack of a representative driving cycle for goods vehicles. Therefore, the aim of this study was to develop a driving cycle for urban freight vehicles and compare it with the standard international cycles. The chase-car technique was used to collect real-world driving data along 37 trips within the Historic Monument Zone of Querétaro. A methodology combining principal components analysis, k-mean clustering and the Markov Chain model was applied for the construction of the candidates driving cycles. Results shows that, compared to the obtained cycle, the legislative drive cycles applied in Mexico, underestimates vehicular emissions as NO_x and CO by about the 22 % and 48 %, for the new European driving cycle and the federal test procedure 75, respectively. This reflects that, the drive cycle construction process must take into account the different vehicular classes and transport systems as all of them have unique driving patterns making every cycle significantly different from each other.

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

DEDICATORIAS

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

En para mí muy importante agradecer al Doctor Eduardo Betanzo Quezada por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Por la dedicación y confianza que ha puesto en este proyecto, por sus comentarios y su capacidad para guiar mis ideas.

Gracias a mi familia, a mis padres y a mi hermana, que me apoyaron en la decisión de esta etapa de mi vida desde el principio. Sin ellos, nada de lo que he logrado hubiera sido posible.

Gracias a mis amigos, por el constante apoyo moral y humano que me brindaron en estos dos años. Se han convertido en mi segunda familia.

CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| RESUMEN..... | IV |
| SUMMARY | V |
| DEDICATORIAS | VI |
| AGRADECIMIENTOS | VII |
| Índice de Tablas | XI |
| Índice de Figuras | XII |
| CAPITULO 1..... | 1 |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 2 |
| 1.3. Justificación | 3 |
| 1.4. Hipótesis | 4 |
| 1.5. Objetivos | 5 |
| 1.5.1. Objetivos específicos | 5 |
| CAPÍTULO 2..... | 6 |
| 2. Marco de Referencia..... | 6 |
| 2.1. Transporte Urbano de Carga | 6 |
| 2.2. Impacto ambiental del transporte urbano de carga | 7 |
| 2.2.1. Transporte de carga y emisiones móviles | 7 |
| 2.2.2. Impactos a la salud humana causada por la mala calidad del aire | 8 |
| 2.3. Estrategias para la reducción del impacto ambiental | 9 |
| 2.4. Metodologías para la estimación de emisiones contaminantes..... | 10 |
| 2.5. Desarrollo de ciclos de conducción para la cuantificación de emisiones móviles..... | 13 |
| 2.5.1. Metodologías para el desarrollo de ciclos de conducción..... | 14 |
| 2.5.2. Selección de la ruta o área de estudio | 15 |
| 2.5.3. Recolección de actividad vehicular..... | 17 |
| 2.5.4. Procesamiento de datos..... | 20 |
| 2.5.5. Construcción del ciclo de conducción..... | 24 |
| CAPÍTULO 3..... | 26 |
| 3. Metodología..... | 26 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1. | Área de estudio | 27 |
| 3.2. | Recolección de datos..... | 28 |
| 3.2.1. | Actividad vehicular..... | 28 |
| 3.2.2. | Equipo usado para el registro de la actividad vehicular..... | 29 |
| 3.2.3. | Obtención de las características de los vehículos observados..... | 30 |
| 3.3. | Selección de criterios de evaluación | 30 |
| 3.4. | Procesamiento de datos..... | 30 |
| 3.4.1. | Generación de micro-viajes | 30 |
| 3.4.2. | Análisis de componentes principales | 31 |
| 3.4.3. | Análisis de conglomerados | 31 |
| 3.5. | Construcción y definición del ciclo final | 31 |
| 3.5.1. | Desarrollo de ciclos candidatos..... | 32 |
| 3.5.2. | Selección del ciclo de conducción definitivo..... | 32 |
| 3.6. | Estimación de emisiones contaminantes..... | 32 |
| | CAPÍTULO 4..... | 35 |
| 4. | Resultados y Discusión..... | 35 |
| 4.1. | Recolección de datos de actividad vehicular | 35 |
| 4.1.1. | Limpieza de datos | 36 |
| 4.1.2. | Distribución espacial y temporal del transporte de carga en la ZMHQ..... | 37 |
| 4.2. | Selección de los criterios de evaluación..... | 39 |
| 4.2.1. | Estadísticas objetivo..... | 41 |
| 4.3. | Procesamiento de los datos | 44 |
| 4.3.1. | Generación de micro-viajes | 44 |
| 4.3.2. | Análisis de componentes principales | 45 |
| 4.3.3. | Análisis de conglomerados | 47 |
| 4.4. | Construcción del ciclo de conducción..... | 50 |
| 4.4.1. | Desarrollo de ciclos prueba..... | 50 |
| 4.4.2. | Selección del ciclo definitivo..... | 53 |
| 4.5. | Comparación con ciclos de conducción establecidos en las normas mexicanas..... | 56 |
| 4.6. | Comparación con otros ciclos internacionales..... | 58 |
| 4.7. | Simulación de emisiones móviles..... | 60 |
| 4.7.1. | Configuración del software MOVES | 60 |
| 4.7.2. | Preparación de archivos de entrada..... | 61 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 4.7.3. Estimación de emisiones | 63 |
| 4.7.4. Escenarios de mitigación | 66 |
| CAPÍTULO 5..... | 70 |
| 5. Conclusiones..... | 70 |
| Referencias..... | 73 |
| Anexos | 81 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2-1. Dispositivos empleados para el registro de velocidades en la recolección de datos. | 18 |
| Tabla 3-1. Clases vehiculares contenidas en MOVES..... | 33 |
| Tabla 4-1. Indicadores aplicados para la caracterización de la actividad vehicular | 40 |
| Tabla 4-2. Comparación parámetros de operación..... | 42 |
| Tabla 4-3. Estructura de micro-viajes. | 44 |
| Tabla 4-4. Matriz de relaciones componentes principales-parámetros de evaluación. | 46 |
| Tabla 4-5. Caracterización de conglomerados. | 50 |
| Tabla 4-6. Criterios de evaluación de 10 ciclos aceptables..... | 53 |
| Tabla 4-7. Comparación ciclo de conducción y datos experimentales. | 54 |
| Tabla 4-8. Comparación con ciclos en normativa mexicana. | 57 |
| Tabla 4-9. Comparación con ciclos estandarizados | 58 |
| Tabla 4-10. Flota vehicular modelada..... | 62 |
| Tabla 4-11. Factores de emisión para PM10 y PM2.5 | 65 |
| Tabla 4-12. Factores de emisión para GEI..... | 66 |
| Tabla 4-13. Comparación factores de emisión para distintos contenidos de azufre en el diésel. | 68 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2-1. Metodologías disponibles para el desarrollo de ciclos de conducción..... | 15 |
| Figura 2-2. Representación gráfica de un micro-viaje..... | 22 |
| Figura 3-1. Esquema metodológico. | 26 |
| Figura 3-2. Zona de estudio. | 28 |
| Figura 3-3. Data Logger DG-100..... | 30 |
| Figura 4-1. Ejemplo de seguimiento a vehículo. | 36 |
| Figura 4-2. Vehículos observados en el área de estudio..... | 37 |
| Figura 4-3. Mapa de calor de la actividad vehicular de carga observada en campo..... | 38 |
| Figura 4-4. Horarios permitidos para maniobras de carga y descarga..... | 39 |
| Figura 4-5. Proporción en modos de conducción | 43 |
| Figura 4-6. Gráfico componente-eigenvalor..... | 46 |
| Figura 4-7. Promedios del índice de Silhouette. | 49 |
| Figura 4-8. DPVA para datos experimentales y ciclo sintetizado. | 55 |
| Figura 4-9. Ciclo de conducción para la ZMHQ. | 56 |
| Figura 4-10. Factores de emisión obtenidos para CO y NOx | 64 |
| Figura 4-11. Factor de emisión promedio por edad vehicular para CO y NOx..... | 67 |

Introducción

1.1. Antecedentes

De acuerdo con datos del panel intergubernamental para el cambio climático (IPCC), el transporte de personas y de carga contribuyen con el 23% de los gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2014). Por consiguiente, el sector transporte y en particular los vehículos de distribución de carga, tienen un papel crítico en la transición global hacia estrategias de desarrollo bajo en carbono (Kinnear *et al.*, 2015). Actualmente, en México, el tema de los contaminantes producidos por el transporte de carga es particularmente importante debido a la reciente modificación a la norma NOM – 044 – SEMARNAT – 2017, que establece los límites máximos permisibles de emisiones de gases contaminantes para vehículos nuevos que utilizan diésel como combustible y que tienen un peso bruto vehicular (PBV) mayor a 3,857 kg (SEGOB, 2018).

Dentro de las zonas urbanas, unos de los mayores contribuyentes en la degradación de la calidad de aire es el transporte urbano de carga. Diversos estudios han encontrado que, aun cuando el transporte urbano de carga representa sólo cerca del 5% de los parques vehiculares en las ciudades, estos son un gran aportante de las emisiones liberadas, principalmente de material particulado menor a 2.5 micrómetros (PM2.5) y Óxidos de nitrógeno (NOx) (Singh *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2015). En ese sentido, autores como Holguin *et al.* (2018) y Dablanc *et al.* (2013) han centrado sus investigaciones en la exploración de políticas públicas y estrategias que contribuyan a la reducción de los contaminantes liberados por este sector del transporte.

Una de las metodologías más importantes para el desarrollo e implementación de políticas de control de emisiones móviles, consiste en determinar los ciclos de conducción (Abas *et al.*, 2018; Seers *et al.*, 2015). La técnica consiste en la caracterización de los comportamientos de aceleración, desaceleración, ralenti y velocidades de crucero, de los vehículos en una determinada zona (Arun *et al.*, 2017), para el posterior análisis de emisiones por medio de dinamómetros o modelos de estimación de emisiones contaminantes como son el *Computer*

Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT), International Vehicle Emissions Model (IVE) y el Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) (Liu et al., 2013), los cuales, basan sus cálculos en las características de la flota vehicular analizada y sus patrones de operación (Sun et al., 2017).

En México, las regulaciones para la reducción de emisiones móviles están basadas primordialmente en la generación de inventarios de emisiones contaminantes a través de software como MOVES, el cual ha sido empleado por instituciones a nivel nacional como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Además, existe evidencia del uso de ciclos de conducción desarrollados en el país, como el elaborado por Schifter *et al.* para la Ciudad de México en 2005.

1.2. Planteamiento del problema

Debido a las grandes concentraciones de población y de establecimientos comerciales y de servicios, la demanda de viajes de transporte de mercancía se incrementa para satisfacer de manera efectiva las necesidades de bienes y servicios en las zonas urbanas (Browne *et al.*, 2012). En ese sentido, el estado de Querétaro tiene una de las tasas de crecimiento poblacional más altas del país; este índice está fuertemente concentrado en el municipio de Querétaro, que en los últimos años ha presentado un importante porcentaje de inmigración (CONAPO, 2018; INEGI, 2017). Debido a su dinámica poblacional, la ciudad de Querétaro cuenta con 7,850 locales comerciales que demandan viajes de carga para la distribución de bienes de consumo diariamente (INEGI, 2020). Por su parte, Betanzo (2015), señala que la zona metropolitana de Querétaro experimenta una creciente demanda de bienes de consumo no duraderos y por ello es necesario establecer medidas para minimizar las externalidades provocadas por esta actividad.

Una de las consecuencias más importantes provocadas por los vehículos de carga en las ciudades es la liberación de emisiones contaminantes a la atmósfera. El principal efecto negativo de estos contaminantes es la afectación a la salud pública. De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Salud Pública (ISP), la contaminación del aire es el segundo riesgo

medioambiental más importante en nuestro país; a este problema se le atribuyen aproximadamente 20,500 muertes anuales (Hurtado, 2015).

La producción de emisiones contaminantes de los vehículos de carga es influenciada por las condiciones del tráfico, además de diversos factores como los estados de aceleración y deceleración, tiempo en ralentí, paradas y arranques (Zulvia *et al.*, 2020). Por ende, el estudio de los gases contaminantes generados por los camiones de carga requiere de evaluaciones concisas que puedan representar de una manera fiel los patrones de operación de los vehículos y que aporten a las actividades de planeación logística de las ciudades (Demir *et al.*, 2011).

De este modo, con el propósito de estimar las emisiones móviles de estos vehículos, algunos investigadores han desarrollado metodologías basadas en los ciclos de conducción, los cuales contienen los perfiles de velocidad-aceleración típicos de los vehículos en una ciudad o zona específica. En México de acuerdo a la NOM – 044 – SEMARNAT – 2017, las certificaciones de emisiones contaminantes para los vehículos, se revisan a través del ciclo estandarizado *Federal Test Procedure 75* (FTP-75) y el Nuevo Ciclo Europeo de Prueba (NCEP), sin embargo debido a la variación en las condiciones de conducción que existen de ciudad en ciudad, este no puede ser considerado representativo del rango de operación de estos vehículos en México, por lo que se hace necesario evidenciar las diferencias existentes entre el ciclo de conducción real y los dos ciclos mencionados. De manera similar, los centros de verificación de emisiones vehiculares del país, utilizan ciclos cortos compuestos de velocidades crucero, dejando de lado fases de conducción más contaminantes como los estados transitorios de aceleración y deceleración. Además, es importante mencionar que, la revisión de la literatura indica que la estimación de las emisiones derivadas de los camiones de carga con el enfoque de los ciclos de conducción no han sido estudiada de manera amplia (Amirjamshidi, 2015; Czégé *et al.*, 2020), por lo que esta investigación busca contribuir con aportaciones metodológicas y aplicadas en México.

1.3. Justificación

La minimización de las emisiones producidas por fuentes móviles depende en gran medida de las políticas públicas implementadas para regular la producción de gases contaminantes. Por lo tanto, es primordial contar con las herramientas necesarias para obtener los índices de emisión de los vehículos y con base en ellos desarrollar dichas políticas. La tendencia actual dentro de las investigaciones orientadas a la cuantificación de emisiones móviles el uso de los patrones de conducción típicos de las zonas de estudio por medio de ciclos de conducción. Chindamo y Gadola (2018) sostienen que, en el caso del transporte urbano de carga, no existen ciclos de manejo específicos que representen sus patrones de operación, sino que se utilizan ciclos estandarizados mundialmente establecidos para simular sus emisiones, lo que representa subestimaciones o sobreestimaciones de su contribución a la degradación de la calidad del aire. Aunado a esto, los patrones de conducción difieren de ciudad en ciudad, por ello, es necesario el desarrollo de ciclos de conducción particulares para cada ciudad o incluso para alguna zona en específico (Amirjamshidi y Roorda, 2015). Por tal motivo, la investigación pretende construir un ciclo de conducción que represente las condiciones de operación de vehículos de carga en una ciudad media mexicana, como Querétaro.

La investigación se centra en el estudio de vehículos de carga ligeros, por ser característicos de la distribución urbana y por su contribución de emisiones PM2.5 y NOx (Liu *et al.*, 2015). Además, Betanzo (2015) y Ugarte *et al.*, (2016), exponen la importancia de orientar las investigaciones del transporte de carga urbana, tomando como punto de partida la distribución de bienes de consumo, puesto que la naturaleza de este tipo de productos requiere de una alta frecuencia de viajes de carga y por consiguiente, son causa de una mayor producción de contaminantes. Por último, dado que la congestión vial es un factor importante que influye en la producción de emisiones por vehículos de reparto (Zulvia *et al.*, 2020), la zona de estudio de la investigación será ubicada dentro de un área congestionada de la ciudad de Querétaro.

1.4. Hipótesis

Los ciclos de conducción establecidos para la certificación y verificación de emisiones vehiculares en las normas mexicanas, no representan el rango de operaciones de los vehículos ligeros de carga en zonas congestionadas.

1.5. Objetivo

Desarrollar un ciclo de conducción a partir de una muestra de camiones de carga ligeros que operan dentro de la Zona de Monumentos Históricos de Querétaro.

1.5.1. Objetivos específicos

- Obtener datos de actividad vehicular representativos
- Establecer una metodología para definir los micro-viajes
- Definir un ciclo de conducción representativo para las condiciones de operación de la zona de estudio
- Simular las emisiones contaminantes relacionadas con el ciclo de conducción a través del software MOVES.

Marco de Referencia

2.1. Transporte Urbano de Carga

Ballantyne *et al.* (2013) definen al transporte de carga como “todos los movimientos de transporte de bienes, hacia, fuera de y dentro de una zona urbana, realizados por vehículos pesados o ligeros de carga”. En ese sentido, Rodrigue *et al.* (2016), afirman que el transporte de carga junto con el de pasajeros forman un sistema de transporte urbano, cuyo objetivo es atender la demanda de transporte generada por las diversas actividades en los entornos urbanos; un sistema de transporte eficiente incrementa la accesibilidad a la movilidad y aumenta la calidad de vida de los ciudadanos, además de ser uno de los pilares de la actividad económica y crecimiento de las zonas urbanas (Tavasszy, 2019).

De acuerdo a Betanzo (2017), la demanda del transporte de bienes materiales de una ciudad está dada en función del tiempo y espacio, y depende en gran medida del número de habitantes del área urbana y su poder adquisitivo, así como de la mercadotecnia y los hábitos de consumo en la población, es por esto que, el transporte comercial es crucial para el funcionamiento de las ciudades. Además de satisfacer la demanda de bienes de la población, este sector del transporte aumenta la competitividad económica de la región (Allen *et al.*, 2007).

A causa del acelerado crecimiento poblacional en las zonas urbanas, y con ello el incremento en la demanda del transporte de bienes, los efectos negativos generados por el transporte de carga urbano se han vuelto más significativos (Holguín *et al.*, 2016). De acuerdo al último censo realizado en nuestro país, el porcentaje de la población en las zonas urbanas se ha visto prácticamente duplicado en los últimos 60 años, pasando de 43% en 1950 a 78% en 2010 (INEGI, 2010).

Autores como Browne *et al.* (2012) y Dablanc *et al.* (2013) argumentan que los efectos negativos o externalidades del transporte urbano de carga son: congestión, contaminación del aire, ruido, accidentes de tráfico e incluso daños a las vialidades cuando se trata de vehículos

pesados. Con el objetivo de reducir estos impactos, se han implementado estrategias y políticas fundamentadas en la mejora de la logística urbana, que, en palabras de Taniguchi (2014), “comprende el proceso de optimización logística y de actividades de transporte realizadas por empresas privadas con el apoyo de sistemas de información en áreas urbanas, considerando el entorno, la seguridad y la congestión del tráfico en la ciudad, así como el ahorro de energía en un marco económico”. Sin embargo, estos esfuerzos no han sido suficientes, dado que el crecimiento económico de las ciudades, sigue incrementando la necesidad de movilizar bienes, de hecho, se espera que la demanda del transporte de bienes se triplique para el año 2050 (ITF, 2019).

2.2. Impacto ambiental del transporte urbano de carga

Uno de las principales afectaciones atribuidas al transporte de carga urbano, es el impacto ambiental, el cual es definido como el cambio en el ambiente, ya sea desfavorable o beneficioso, producido total o parcialmente por actividades, productos o servicios (Bai y Bai, 2014). Según Miedzinski *et al.* (2013), esos cambios en el ambiente son producidos por las presiones ambientales, es decir, por el uso de recursos naturales como materiales, energía, agua y suelo, tanto por el consumo derivado de la actividad humana, como por la liberación de sustancias, por ejemplo, desechos y gases de efecto invernadero; Miedzinski *et al.* (2013) categorizaron dichas presiones ambientales en cuatro grupos: consumo y desecho de recursos materiales, el uso y contaminación de suelo y el agua, y las emisiones contaminantes al aire.

Por lo que refiere a la contaminación del aire, esta puede causar severos problemas, como efectos en la salud humana, impactos en la vida silvestre, adelgazamiento de la capa de ozono y el aceleramiento del cambio climático (MASSDEP, 2016) En ese sentido, Miedzinski *et al.* (2013), proponen indicadores para medir el impacto ambiental de la liberación de contaminantes al aire, en un nivel micro, plantean identificar los principales gases emitidos por vehículos e industrias; por otro lado, a nivel macro, se propone desarrollar bases de datos de emisiones contaminantes a escalas regionales y nacionales.

2.2.1. Transporte de carga y emisiones móviles

Debido al peligro inminente por el cambio climático y las potenciales afectaciones a la salud ocasionados por la contaminación del aire, ha surgido una gran presión por reducir los gases de efecto invernadero y contaminantes locales en ambientes urbanos (Holguín et al., 2018). Es por esto que diversas investigaciones como las realizadas por Perugu, (2019), Yao *et al.*, (2014), Malik *et al.*, (2019) y Mahesh *et al.*, (2019) se han enfocado en la cuantificación y mitigación de las emisiones móviles producidas por los vehículos de reparto.

Generalmente, los estudios dirigidos a las emisiones contaminantes móviles, se enfocan sólo en el bióxido de carbono (CO₂). Sin embargo, los camiones de carga son también, liberadores de otros contaminantes como la materia particulada (PM₁₀ y PM_{2.5}), óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles (VOC), los cuales afectan de manera significativa a la calidad del aire y salud humana (Talebian *et al.*, 2018). De acuerdo a Dablanc (2008) el transporte terrestre, y en particular el transporte de carga, libera en mayores cantidades contaminantes como PM y NO_x. Además, se ha encontrado que aun cuando el transporte urbano de carga representa un pequeño porcentaje de los parques vehiculares en las ciudades, estos son un gran aportante de las emisiones, principalmente en particular PM_{2.5} y NO_x, ya que, según Yang *et al.* (2015) y Singh *et al.* (2016), los vehículos de distribución pueden generar más del 35% de este tipo de contaminantes.

Es importante mencionar que las emisiones contaminantes causados por la movilidad urbana tienen presencia en el tiempo y espacio, es decir, se tienen mayores concentraciones de contaminación durante las horas pico, además de que una gran parte de los gases contaminantes se pueden liberar en las zonas más densas de las ciudades; por ejemplo, Coulombel *et al.*, (2018) concluyeron que un tercio de las emisiones diarias se liberan durante las horas pico y que cerca del 40% de las emisiones se puede concentra en tan solo el 5% de la zona urbana.

2.2.2. Impactos a la salud humana causada por la mala calidad del aire

Uno de los efectos más importantes ocasionados por la emisión de gases contaminantes, es el impacto en la salud humana, este efecto está relacionado con una gran cantidad de enfermedades y en la reducción de la esperanza de vida. Requía *et al.*, (2018) realizaron un recuento de estudios en donde se exponen enfermedades asociadas a la contaminación del aire, entre ellas se encuentran padecimientos respiratorios y cardiovasculares, cáncer, afectaciones al sistema nervioso e incluso nacimientos prematuros o con bajo peso; adicionalmente, se relaciona el aumento de índices de desarrollo de diabetes y cáncer de pulmón en ciudades con altas concentraciones de partículas PM2.5, uno de los contaminantes mayormente producidos por el transporte de carga. La Organización Mundial de la Salud sostiene que, alrededor de siete millones de personas mueren cada año por enfermedades relacionadas con la calidad del aire (OMS, 2018); por su parte, a nivel nacional, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático argumenta que la mala calidad del aire en México tiene un alto factor de riesgo, pues se estima que este problema es el causante de 29,000 muertes prematuras cada año (INSP, 2017).

2.3. Estrategias para la reducción del impacto ambiental

Como se ha mencionado, el transporte de carga tiene un papel crítico en el deterioro de la calidad del aire en las ciudades, por lo que es necesario impulsar un giro hacia políticas de reducción de contaminantes, sin embargo, este sector del transporte ha sido relativamente ignorado por los tomadores de decisiones en distintos países (Hammond *et al.*, 2019). Referente al impacto ambiental, según Dablanc *et al.* (2013), las estrategias para reducir los impactos en el ambiente, están orientadas a la minimización de emisiones y ruido por medio de incentivos para usar vehículos menos contaminantes.

De acuerdo a Muñoz *et al.* (2020), para atacar los impactos ambientales producidos por el transporte de carga urbano, se deben tomar en cuenta tres elementos esenciales:

1. Las políticas públicas deben considerar las múltiples interacciones que caracterizan al transporte de carga, revisando las perspectivas de todos los involucrados;
2. La metodología debe ser aplicable y transferible para otros casos; y
3. Debe ser considerada la productividad económica que representa el movimiento de bienes.

En ese sentido, las estrategias de reducción de emisiones contaminantes para el sector transporte pueden ser clasificadas de distintas maneras. Stelling (2014) propone una categorización con base en su instrumento de apoyo, las categorías son:

- Políticas económicas, como la excepción de impuestos por el uso de biocombustibles o vehículos híbridos.
- Políticas legales, por ejemplo, los estándares de emisión establecidos por las normas oficiales mexicanas.
- Las estrategias privadas, que se fundamentan en los conocimientos de los expertos, como pueden ser las medidas logísticas para la optimización de rutas.
- Las estrategias sociales, que se basan principalmente en la infraestructura disponible, un ejemplo de esta puede ser la distribución intermodal.

Por otro lado, y de una manera simplificada, las medidas de reducción de contaminantes se pueden clasificar también en técnicas y no técnicas. La primera de ellas refiere a la optimización de consumo de energías de las nuevas tecnologías en los vehículos; las no técnicas representan las medidas logísticas aplicadas con el fin de obtener una mejor eficiencia en el consumo de energía y recursos (Talebian *et al.* 2018).

2.4. Metodologías para la estimación de emisiones contaminantes

El cálculo de factores de emisión precisos es primordial para la elaboración de inventarios de emisiones contaminantes representativos. La precisión de estos depende en gran medida de utilizar patrones de operación vehicular reales, de ahí la necesidad de que los ciclos de conducción reflejen fielmente los patrones de manejo de los vehículos en la zona de estudio. La obtención de los factores de emisión empleando ciclos de conducción se puede atacar a través de tres técnicas: 1) mediante dinamómetros vehiculares, 2) por medio de modelos de emisión y 3) utilizando software especializado. Primero, de manera física, los factores de emisión pueden ser obtenidos operando el vehículo en un laboratorio empleando un dinamómetro, aplicando el ciclo de conducción objetivo.

Por lo que refiere a los modelos de emisión, uno de lo más aplicados es el *Vehicle Specific Power* (VSP), desarrollado en 1999 (Jiménez-Palacios, 1999) (Mahesh y Ramadurai, 2017;

Schifter *et al.*, 2005). El modelo está basado en la velocidad y aceleración instantánea del vehículo, siendo la expresión propia del modelo la siguiente:

$$VSP = \frac{Av + Bv^2 + Cv^3 + (a + g \sin \theta)vm}{m} \quad \text{Ec. 2-1}$$

donde:

A = coeficiente de resistencia a la rodadura [kw-s/m];

B = coeficiente de resistencia rotacional [kw-s²/m²];

C = coeficiente de resistencia aerodinámica [kw-s³/m³];

v = velocidad [m/s];

a = aceleración [m/s²];

m = masa del vehículo [ton];

g = aceleración debido a la gravedad [m/s²]; y

θ = pendiente de la vialidad [m/m].

El factor de emisión correspondiente a cada tipo de contaminante (CO₂, HC, NO_x, PM) corresponde al modo de operación obtenido con la ecuación 2-1.

Por otra parte, existen modelos más sencillos como el propuesto por Hickman *et al.* (1999), quienes desarrollaron una metodología para el cálculo de las emisiones y consumo de energía de vehículos pesados llamada MEET. El modelo fue creado para su aplicación a la liberación de CO₂ de vehículos con pesos brutos vehiculares entre las 3.5 y 32 toneladas. El modelo basa el cálculo de las emisiones en la siguiente fórmula:

$$F = \epsilon * GC * LC * Distancia \quad \text{Ec. 2-2}$$

donde:

F es el CO₂ liberado [g]

ϵ es el factor de emisión [g/km]

GC la corrección por pendiente

LC el coeficiente de corrección por carga

El modelo MEET está basado en medidas y parámetros obtenidos de los trayectos de los vehículos. La principal debilidad de este modelo es que utiliza algunos parámetros vehiculares específicos fijos, de manera que generaliza resultados para las distintas clases vehiculares.

En relación al software especializado para simular las emisiones contaminantes por medio de ciclos de conducción, hoy en día, las herramientas más utilizadas para la estimación de emisiones contaminantes son IVE, COPERT y MOVES. El primero de ellos tiene la capacidad de incorporar ciclos de conducción reales para la estimación de los factores de emisión. El software incluye variables como la velocidad instantánea, características de los vehículos y su combustible y parámetros meteorológicos. La función aplicada dentro de los cálculos de IVE se muestra enseguida (ISSRC, 2008):

$$Q_R = \sum_t \frac{[f_t \sum_d (Q_t * \bar{U}_{FTP} * f_{dt} * K_{dt})]}{\bar{U}_C} \quad \text{Ec. 2-3}$$

donde:

Q_R es el promedio de emisiones [g/km];

f_t es la fracción de viajes por clase vehicular;

Q_t es el ajuste de emisión por clase vehicular;

f_{dt} es la fracción de tiempo por tipo de conducción;

\bar{U}_{FTP} es la velocidad promedio del ciclo de conducción (constante [km/h]); y

\bar{U}_C es la velocidad promedio del patrón de conducción específico, dado por el usuario.

Por otro lado, se encuentra COPERT – IV, el cual está basado en un modelo de velocidad promedio. La función de cálculo de los factores de emisión en este simulador está fundamentada en especificaciones de las clases vehiculares como su combustible, capacidades del motor y las normas EURO, las cuales limitan la cantidad de gases contaminantes liberados por los vehículos. La expresión empleada en COPERTT-IV es la siguiente (Choudhary y Gokhale, 2018):

$$EF_{i,m,n} = \alpha + \beta V + \gamma V^2 + \delta V^3 + \varepsilon V^4 + \zeta V^5 \quad \text{Ec. 2-4}$$

donde:

$EF_{i,m,n}$ son el factor de emisión en g/km para una clase vehicular i , edad m y tamaño de motor n .

V es la velocidad promedio vehicular; y

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$, son coeficientes relacionados a los factores de emisión para un vehículo en específico.

Por último, el software más utilizado a nivel mundial es *MOVES*. De manera general, esta herramienta de cómputo basa el cálculo de las emisiones en la actividad total de los vehículos, sus índices de emisión y su distribución por tipo de vehículo y operación. Entonces, para un tiempo dado, ubicación, tipo de vehículo y actividad vehicular, la emisión de gases contaminantes en *MOVES*, está dada por la siguiente ecuación:

$$Total\ de\ emisiones = Actividad\ Total \times \sum_{n=1}^{Número\ de\ bins} índice\ de\ emisión \times BinDistribución$$

donde:

Actividad total es el producto de la población de vehículos simulados y la actividad por unidad;

índice de emisión es la tasa de gases liberados por tipo de vehículo; y

BinDistribución, que describe la fuente de las emisiones, considerando tipo de combustible, tecnología del motor, modelo, PVB, tamaño del motor y estándar de emisión; también, está basado en los parámetros de operación de los vehículos como pudieran ser la velocidad promedio o la potencia específica del mismo.

Una de las grandes fortalezas de este software es que su rutina emplea el modelo de emisión VSP, por lo que es capaz de reproducir las emisiones segundo a segundo.

2.5.Desarrollo de ciclos de conducción para la cuantificación de emisiones móviles

Como ya se mencionó, la movilidad urbana a través de medios motorizados es generadora de externalidades negativas que repercuten directamente en la sociedad. Para comprender de mejor manera este fenómeno y ser capaces de estimar las emisiones contaminantes producidas por los vehículos, se han estudiado los ciclos de conducción en distintas regiones del planeta. De acuerdo a Hung *et al.* (2007) los ciclos de conducción son perfiles de velocidad-tiempo que representan a través de datos de actividad real un patrón de conducción promedio en una determinada región o ciudad.

El desarrollo de ciclos de conducción comenzó en la época de los 70's, con el establecimiento de los ciclos FTP – 72 y FTP – 75 en Estados Unidos (Galgamuwa *et al.*, 2015). De manera paralela, se elaboraron los ciclos *Improved Driving cycle* en Europa y los de Perth, Melbourne y Sídney en Australia (Hung *et al.*, 2007). Existen además, ciclos de manejo que pretenden representar los parámetros de operación en todo el mundo como el *Worldwide Harmonized Light Duty Vehicles Test Cycles*, sin embargo, debido a las diferencias de la actividad vehicular, estos ciclos estandarizados no pueden ser considerados representativos de todas las ciudades o de los distintos modos de transporte, como el transporte privado, público o de mercancías (Czégé *et al.*, 2020). Bajo esta premisa, está claro que para el desarrollo de cualquier ciclo de conducción es conveniente llevar a cabo un proceso minucioso de análisis, recopilando los datos de actividad vehicular propios de cada zona de estudio, así como de los flujos de tráfico y de la estructura de la red de infraestructura vial.

2.5.1. Metodologías para el desarrollo de ciclos de conducción

Existen diferentes técnicas para la construcción de los ciclos de conducción, sin embargo, todas son distintas, cubriendo diferentes objetivos. A continuación, se proporciona un amplio panorama de las diferentes metodologías empleadas comúnmente para la construcción de los ciclos de conducción, resaltando las particularidades de cada una y su aplicación en investigaciones anteriores. En la Figura 2-1 se muestran las etapas de desarrollo de los ciclos de conducción de una manera esquemática.

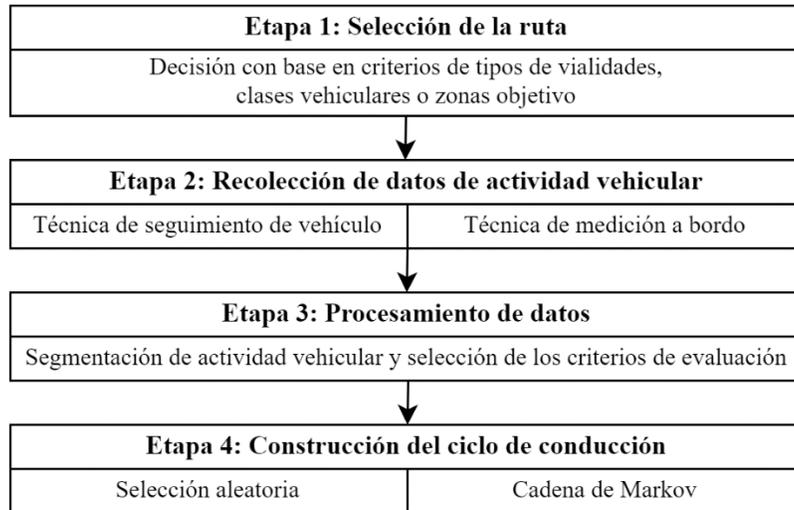


Figura 2-1. Metodologías disponibles para el desarrollo de ciclos de conducción.

Como se muestra en la figura 2-1, el proceso de generación de un ciclo de conducción consta de cuatro pasos esenciales: 1) selección de la ruta de estudio (en donde se establecen las vialidades o áreas específicas que se estudian); 2) recolección de la actividad vehicular en la zona de estudio; 3) procesamiento de los datos obtenidos; y 4) construcción del ciclo de construcción (Romero *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2020). Cada una de las etapas puede ser desarrollada por medio de distintas metodologías, siendo estas, dependientes de los recursos, objetivos y el área a cubrir por la investigación.

2.5.2. Selección de la ruta o área de estudio

El primer paso para la creación de un ciclo de conducción es definir los objetivos del mismo, respondiendo a tres preguntas: ¿a qué vehículos va dirigido?, ¿qué zona se estudiará?, y ¿cuál será su propósito?. Una vez definidos los objetivos, es posible establecer las rutas o zona de prueba, las cuales deberán representar los parámetros de operación vehicular típicos de la región. Por lo tanto, este proceso es crucial en la construcción de los ciclos de conducción,

ya que de ello dependerá de la proporción en que ese ciclo pueda representar la actividad vehicular real del área de estudio.

Generalmente, las rutas de prueba son elegidas por el investigador de manera subjetiva (Hung *et al.*, 2007), sin embargo, existen distintos criterios en los cuales se puede basar la elección de la zona de estudio como la estructura de la red vial, densidad de población, distribución de viajes origen – destino, centros de negocios, vialidades de entrada y salida, y el tránsito diario promedio anual de las vialidades de interés (Zhao *et al.*, 2020). Aunado a esto, se debe considerar el motivo de viaje o el tipo de vehículo al que está dirigida la investigación, ya sea en el transporte de personas privado o público, así como al transporte de mercancías.

Un ejemplo de elección subjetiva, basada en la experiencia del investigador, es la realizada por Knez *et al.* (2014) en Celje, Eslovenia, con un recorrido de 12.9 km bajo la teoría de que esa ruta contiene una de las arterias principales de la ciudad en evaluación y que representa una ruta estándar que los ciudadanos pueden tomar en el día a día. Por otro lado, uno de los procesos de selección de ruta más elaborados, fue el realizado por Zhao *et al.* (2020), quienes analizaron la distribución, composición y el flujo de tráfico de la red vial en la ciudad de Xi'an, China. De acuerdo a los resultados obtenidos, se calculó el largo óptimo para la ruta de prueba por medio de un sistema de muestreo simple, basado en el largo de los viajes más concurridos de la ciudad; la longitud final del recorrido de estudio fue de 38.46 km, cubriendo vialidades principales, secundarias y locales. Por su parte, en la construcción del ciclo de conducción LA4 de Los Ángeles, la metodología para la elección del trayecto de prueba se basó en el estudio de una matriz de viajes origen – destino de los recorridos matutinos producidos por motivo de trabajo, para una ruta seleccionada de 19.2 km de longitud (Kruse y Huls, 1973). También, se han producido ciclos de conducción dirigidos a una zona específica de una ciudad, por ejemplo, en Melbourne, Australia, donde la zona centro de la urbe fue tomada como área de estudio, obtenido los parámetros de operación sólo de los vehículos que transitaban por esa zona (Hung *et al.*, 2007).

La selección de una ruta o área de estudio puede ser dependiente del motivo o modo de transporte para el cual se construye el ciclo de conducción. La ruta de prueba para los ciclos de manejo dirigidos al transporte público está claramente apegada a las rutas ya establecidas

del transporte público. No obstante, se deben elegir los autobuses con los recorridos más representativos y concurridos, para esto se consideran criterios como la frecuencia de paso de los autobuses en esa línea y el número de vehículos que recorren ese mismo viaje (Yuhui *et al.*, 2019).

Debido a que la actividad vehicular y el flujo del tráfico están dados en función del tiempo y el espacio, es preciso considerar no sólo las rutas, sino también las horas del día en que se recolectan los datos. Para lograr un ciclo de conducción representativo, es conveniente recolectar la actividad vehicular durante las horas pico y valle (Arun *et al.*, 2017), dado que considerar una sola de ellas representaría sobreestimar o subestimar los parámetros de operación de los vehículos. Además, independientemente del objetivo final del ciclo de conducción, ya sea para estimar emisiones contaminantes o consumo energético, es importante examinar la topografía de las rutas o zonas de estudio, ya que tiene un fuerte impacto en el funcionamiento de los vehículos. De igual manera, las condiciones climáticas deben ser atendidas, ya que de estas dependerá el patrón de manejo de los usuarios de la red vial (Galgamuwa *et al.*, 2015).

2.5.3. Recolección de actividad vehicular

De acuerdo a la revisión de la literatura, son dos las metodologías principalmente empleadas para recuperar la actividad vehicular necesaria para el desarrollo de un ciclo de conducción. La primera de ellas es la técnica denominada *chase car* o seguimiento de vehículo, la cual consiste en seguir un vehículo (objetivo) la mayor cantidad de tiempo posible dentro del área de estudio, emulando sus parámetros de operación. Cuando el vehículo objetivo sale de la zona de interés, el conductor de prueba elige inmediatamente otro vehículo para seguir (Abas *et al.*, 2018). Por otro lado, se ha empleado también la metodología *on-board* o medición a bordo, la cual consiste en instalar un registrador de datos en los vehículos de prueba y con ello obtener la actividad vehicular a lo largo de toda la ruta (Galgamuwa *et al.*, 2015). Adicionalmente, se han planteado otras técnicas de recolección de datos, como la metodología híbrida, la cual es una mezcla de las dos metodologías anteriores (Hung *et al.*, 2007). Como otra posibilidad, Amirjamshidi y Roorda (2015) proponen un modelo de microsimulación calibrado para reflejar velocidades y aceleraciones utilizando un algoritmo

genético multiobjetivo. En la Tabla 2-1 se muestra un resumen de los dispositivos empleados para el registro de la actividad en el proceso de recolección de datos.

Tabla 2-1. Dispositivos empleados para el registro de velocidades en la recolección de datos.

| Variable | Alternativa | Ventajas | Desventajas |
|-------------------|--------------------------------|---|--|
| Velocidad/altitud | GPS | <ul style="list-style-type: none"> • Medición instantánea • Compacto • Equipo comercial • Visualizable a través de un SIG | <ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de información en pasos a desnivel • Costoso • Posibles datos imprecisos |
| Velocidad | Computadora (OBD) | <ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo de consumo de combustible | <ul style="list-style-type: none"> • No disponible para vehículo de modelo anterior al 2000 |
| Velocidad | Aplicación para teléfono móvil | <ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo | <ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de datos debido a conexión inestable • No disponible para vehículo de modelo anterior al 2000 |

Fuente: Elaboración propia con base en Huertas *et al.* (2018) y Romero *et al.* (2017).

Dado que se pretende conseguir una muestra estadística representativa de los parámetros de operación de los vehículos dentro de la zona de interés, los instrumentos de medición utilizados deben tener una frecuencia de registro de datos de al menos un segundo (Huertas, *et al.*, 2018).

Técnica de medición a bordo

El sistema de obtención de datos *on-board*, es empleado principalmente para proyectos a gran escala, que necesitan de bases de datos robustas. La mayor ventaja que otorga la medición a bordo es que se evitan problemas como la sub o sobreestimación de aceleraciones causadas por el tiempo de reacción del conductor del vehículo de prueba en la técnica de seguimiento de vehículos. Por otro lado, el costo de instrumentación y los tamaños de muestra necesarios para proyectos a gran escala, son las principales desventajas del método (Tong y Hung, 2010).

Este método fue empleado para el desarrollo de uno de los ciclos de conducción regionales más recientes en Estados Unidos. En 2013, Farzaneh *et al.* en colaboración con el

Departamento de Transporte de Texas, crearon el ciclo de manejo representativo para este estado. Para su elaboración se utilizaron los datos de actividad vehicular de 245 vehículos registrados durante 30 días consecutivos, recuperados por medio de dispositivos GPS; adicionalmente, se consiguió registrar 1,040 km de recorridos de autos eléctricos utilizando la misma metodología. De manera similar, Arun *et al.* (2017) aplicaron la técnica de medición a bordo por medio de la tecnología *on-board diagnostic* (OBD), los autores recuperaron 112 km de recorrido y parámetros de operación para la construcción del ciclo de conducción de Chennai, India. Por su parte, Romero *et al.* (2017) resaltaron la eficacia de trabajar con herramientas de bajo costo para el monitoreo de actividad vehicular *on-board*, los autores recuperaron las velocidades típicas de operación por medio de una aplicación para teléfonos móviles en dos rutas representativas del flujo de tráfico de la ciudad de Pereira, Colombia.

Técnica de seguimiento de vehículo

A diferencia de la metodología anterior, la técnica *chase car* es principalmente empleada en proyectos en escala micro, ya sea en corredores viales o zonas específicas dentro de las ciudades. Una de las mayores preocupaciones sobre este proceso, es la confiabilidad de los datos de velocidad y aceleración, ya que existe una diferencia entre los datos registrados en el vehículo de prueba y los realizados por el vehículo objetivo. Sin embargo, se ha comprobado que los coeficientes de determinación entre los parámetros de operación obtenidos por medio de esta técnica son superiores a 0.97, lo que significa resultados confiables para la construcción del ciclo de conducción (Tong y Hung, 2010).

Las bases teóricas y prácticas para llevar a cabo la técnica de seguimiento de vehículos fueron establecidas por Austin *et al.* en 1993; dentro de su investigación fueron establecidos los protocolos para: 1) el inicio y fin de viajes; 2) la selección de vehículo objetivo; 3) el procedimiento para seguir el vehículo de una manera segura; 4) el proceso para descartar la ruta de un vehículo objetivo; y 5) el equipamiento necesario para la toma de datos. A través de los años algunos de estos puntos han sido modificados según las necesidades de los investigadores, pero a la fecha sigue siendo la base para la aplicación de esta metodología.

De acuerdo a Morey *et al.* 2000 con el propósito de obtener bases de datos con suficiente información y representativas por medio de la técnica de seguimiento de vehículos, se deben

tomar en cuenta tres principios importantes. Primero, las rutas y la metodología de adquisición de datos deben ser simplificadas en la medida de lo posible. De igual manera, se recomienda un proceso simple de muestreo o de selección del vehículo a seguir. Por último, los autores mencionan que se debe evitar la técnica *non – lock chase car*, es decir, producir datos a partir del recorrido de una ruta preestablecida sin tener un vehículo objetivo, registrando parámetros de operación que no pertenece a los individuos de estudio, ya que esto provoca sesgos en parámetros de operación como la velocidad, aceleración y deceleración. Esta última situación se presenta generalmente cuando el proceso de muestreo o la elección del vehículo objetivo es compleja, también, si la investigación tiene como propósito el estudio de una clase vehicular en particular que es difícil de conseguir.

La técnica de seguimiento de vehículo fue empleada en 2005 en México para crear el ciclo de conducción en la zona metropolitana de la Ciudad de México. En esa investigación se utilizó un *data logger* para registrar las velocidades de los vehículos objetivo; en ese estudio fueron analizados un total de 1,044 km y 60 horas de actividad vehicular. La técnica de *chase car* también fue aplicada por Zhao *et al.* (2020), quienes construyeron un ciclo de conducción para vehículos eléctricos, utilizando dispositivos GPS y OBD para la recolección de datos en una ruta de aproximadamente 38.26 km.

2.5.4. Procesamiento de datos

De acuerdo a la revisión de la literatura, el proceso de análisis de los datos de actividad vehicular se lleva a cabo en tres pasos. Primero, los viajes registrados son divididos por medio de criterios basados en los estados de conducción, clases vehiculares o tipos de vialidad. Después, se seleccionan los parámetros que se emplearán como criterios de evaluación para la posterior construcción del ciclo, siendo los más comunes la velocidad y aceleración. Por último, se realizan análisis estadísticos para simplificar el proceso de construcción del ciclo.

Segmentación de recorridos

Para el proceso de división de los datos de actividad vehicular Galgamuwa *et al.* (2015) exponen cuatro metodologías, las cuales se enlistan enseguida:

1. Generación de micro-viajes: consiste en dividir la actividad vehicular entre paradas adyacentes, incluyendo períodos en modo ralentí. Debido a que esta técnica analiza la actividad entre cada arranque y parada, es ideal para la estimación de emisiones contaminantes.
2. Basado en segmentos: los viajes de prueba son divididos en partes según el tipo de vialidad o nivel de servicio, estas características de análisis son principalmente aplicadas en estudios de ingeniería de tránsito.
3. Por patrones de operación: los recorridos registrados son divididos en partes heterogéneas por medio de análisis estadísticos.
4. Construcción modal: la actividad vehicular es dividida en cuatro modos de conducción aceleración, deceleración, velocidad crucero y ralentí.

De acuerdo a Zhang *et al.* (2011) la gran mayoría de los ciclos de conducción existentes están basados en la generación de micro-viajes. Este método proporciona una manera flexible de construir ciclos de construcción más representativos, además de permitir el desarrollo de ciclos para distintos objetivos, rutas o regiones (Tong y Hung, 2010). En este contexto, un micro-viaje es definido como el recorrido realizado entre el inicio de un período de inactividad hasta el próximo momento de ralentí y puede estar formado por cinco estados de conducción (Yuhui *et al.*, 2019):

1. Ralentí: el motor se encuentra trabajando, pero la velocidad del vehículo es cero;
2. Aceleración: la aceleración del vehículo es mayor a 0.1 m/s^2 ;
3. Velocidad crucero: la aceleración absoluta del vehículo es menor a 0.1 m/s^2 , pero la velocidad del vehículo es mayor a cinco;
4. Modo lento: la aceleración absoluta del vehículo es menor a 0.1 m/s^2 , pero la velocidad del vehículo es mayor a cero y menor que cinco;
5. Deceleración: la aceleración del vehículo es menor a -0.1 m/s^2 .

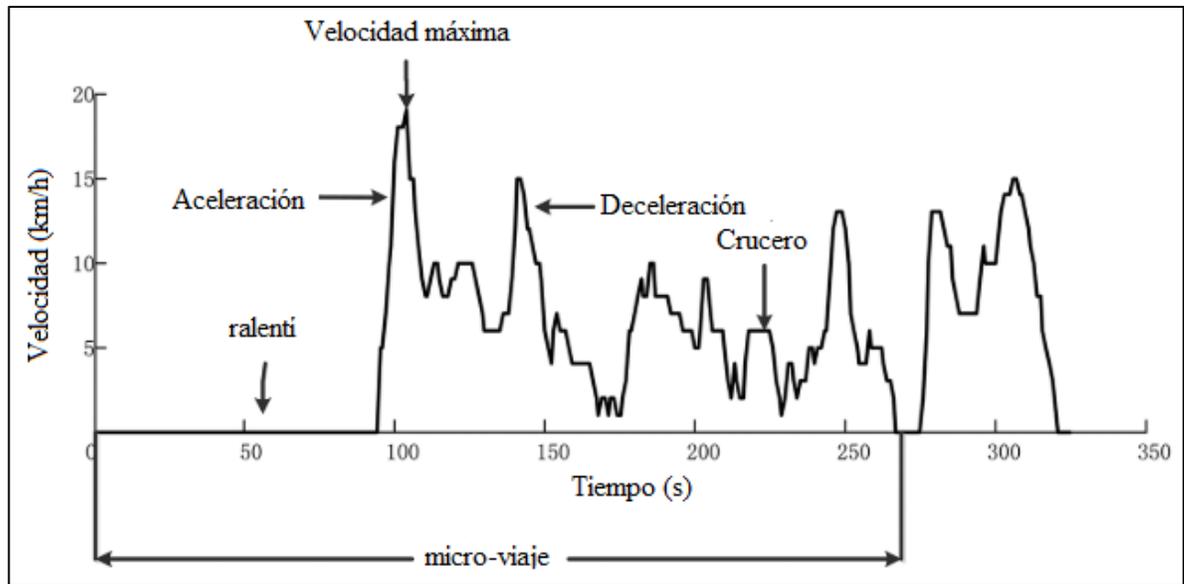


Figura 2-2. Representación gráfica de un micro-viaje.

Fuente: Yuhui *et al.* (2019)

En la literatura también se establecen varios criterios para definir la duración de cada micro-viaje. Por ejemplo, Farzaneh *et al.* (2014) proponen los siguientes cinco criterios:

1. El primer micro-viaje inicia en el comienzo de un viaje y termina cuando:
 - a. Hay más de 30 segundos en velocidad cero.
 - b. Es el final del viaje.
 - c. La longitud del viaje supera los 3.2 km.
2. El siguiente micro-viaje comienza en el final del anterior y termina siguiendo los criterios a,b y c del paso 1.
3. Un micro-viaje debe tener una duración mínima de 20 segundos.
4. Los micro-viajes con velocidad promedio menor a 1.6 km/h no son considerados.
5. Si hay un período estacionario (velocidad cero) con duración mayor a 35 segundos, el siguiente micro-viaje comienza cinco segundos antes del inicio de movimiento del vehículo.

Selección de criterios de evaluación

Una vez dividida la base de datos de actividad vehicular en micro-viajes y con el fin comparar las características de los mismos, es necesario elegir criterios de evaluación relacionados con

la actividad vehicular registrada durante el protocolo de obtención de datos. Este proceso es particularmente importante por tres razones (Tong y Hung, 2010):

- Primero, para la extracción de los parámetros de operación de cada micro-viaje;
- Segundo, los criterios son esenciales para la construcción de los ciclos de conducción candidatos; y
- Tercero, juegan un papel importante en la determinación de la representatividad estadística de cada ciclo con respecto a las condiciones de operación reales.

Los criterios son indicadores estadísticos de los modos de conducción como la velocidad, aceleración, deceleración, ralentí, velocidad crucero, entre otras. En promedio se emplean 13 criterios para describir las características de los micro-viajes , según Yang *et al.* (2020).

Además de la velocidad y aceleración máxima, los indicadores estadísticos comúnmente empleadas para describir los ciclos de conducción son: media y desviación estándar; media cuadrática de aceleración; así como las proporciones de tiempo en los diferentes modos de conducción (aceleración, deceleración, velocidad crucero y ralentí).

Análisis estadísticos

Después de la elección de los criterios de evaluación, existen dos análisis estadísticos que pueden realizarse para mejorar la calidad y precisión del ciclo de conducción en desarrollo. Primero, para simplificar el proceso de evaluación de los micro-viajes, se ha implementado el *análisis de componentes principales*, reduciendo así el número de variables y evitando tendencias de variables correlacionadas. De acuerdo a Kabacoff, (2011) el análisis de componentes principales es una técnica de reducción de datos que transforma grandes números de variables correlacionadas en un conjunto mucho más pequeño de variables no correlacionadas, a las cuales se les llama componentes principales. En ese sentido, algunos autores (Peng *et al.*, 2019; Yuhui *et al.*, 2019) recomiendan seleccionar un conjunto de componentes principales que puedan describir al menos el 80% de la varianza del grupo inicial de parámetros.

Por otra parte, se aplica el método de conglomerados para clasificar los micro-viajes en categorías homogéneas que representen los diferentes patrones de manejo que ocurren dentro

de la zona de estudio, estas categorías o agrupaciones se establecerán como criterio objetivo en la construcción del ciclo de manejo (Abas *et al.*, 2018; Nouri y Morency, 2017). Las variables más comunes por las que se clasifican los micro-viajes en el análisis son la velocidad, aceleración y porcentaje en estado de inactividad. Por último, el método más utilizado para el análisis de conglomerados es el k-medias.

2.5.5. Construcción del ciclo de conducción

Finalmente, para la construcción del ciclo de conducción a partir de los micro-viajes, el primer paso a seguir consiste en definir la longitud del ciclo que se desarrollará. Esta debe ser definida en función de la duración promedio de los viajes observados durante la recolección de los datos (Tong y Hung, 2010). Según *Hung et al.*, (2007) la mayoría de los ciclos tienen una duración de entre 10 y 30 minutos, sin embargo, es conveniente considerar que estos deben tener la longitud necesaria para poder contener la suficiente cantidad de micro-viajes que representen los parámetros de operación reales de la zona.

Posteriormente, es necesario unir un conjunto de micro-viajes para la creación de los ciclos de conducción, este proceso se puede llevar a cabo por medio de dos métodos. El primero de ellos, recurre a una técnica totalmente aleatoria, en donde los viajes son seleccionados aleatoriamente de cada conglomerado para formar un ciclo conformado por distintos micro viajes; el único criterio para esta metodología es mantener la duración del ciclo, de acuerdo al valor de longitud establecido (Nouri y Morency, 2017). Como segundo método, se aplica el proceso de la Cadena de Markov, en donde cada evento es dependiente del estado en turno, aquí el primer micro-viaje es seleccionado aleatoriamente, la selección de los viajes sucesivos está basada en la probabilidad de que ocurra el siguiente conglomerado en la base de datos, tomando el siguiente micro-viaje de ese conglomerado (Nouri y Morency, 2017; Shi *et al.*, 2011). Por lo tanto, este último método tiene mayores probabilidades de crear un ciclo que representa de manera precisa los parámetros de operación observados en la base de datos (Bishop *et al.*, 2012).

El proceso anterior se vuelve iterativo, ya que se necesita crear un grupo de ciclos candidatos a ser elegidos como definitivos. El ciclo final se selecciona por medios estadísticos, comparando las estadísticas de los criterios de evaluación (velocidad, aceleración, ralentí,

etc.) con las estadísticas objetivo, las cuales son obtenidas del conjunto de los perfiles de velocidad-tiempo obtenidos durante la etapa experimental (Amirjamshidi y Roorda, 2015). El ciclo definitivo será aquel que replique de mejor manera las condiciones reales de operación observadas en el área de estudio. De acuerdo a la revisión de la literatura, existen dos metodologías para llevar a cabo este último proceso; la primera de ellas, el error cuadrático medio, el cual expone la suma absoluta de las diferencias de las estadísticas de los parámetros de operación del ciclo candidato y las estadísticas objetivo (Mathew y Velaga, 2019; Zhao *et al.*, 2020). De manera similar, es posible emplear técnica del valor de desempeño, el cual representa el promedio de la diferencia absoluta entre la estadística de los parámetros de operación de la muestra y la estadística objetivo (Amirjamshidi y Roorda, 2015; Hung *et al.*, 2007).

El ciclo de conducción obtenido después de todo el proceso generalmente es comparado con ciclos de conducción de otras regiones para hacer notar las diferencias de operación que hay entre cada zona. Además, se emplean también software y modelos orientados a la estimación de emisiones contaminantes y consumo energético.

Metodología

En este capítulo se presenta el proceso seguido para la construcción del ciclo de conducción y la posterior estimación de emisiones contaminantes producidas por los vehículos de carga ligeros en la zona de estudio, ubicada en el centro histórico de la ciudad de Querétaro. El proyecto sigue el proceso metodológico que se muestra, en la Figura 3-1.

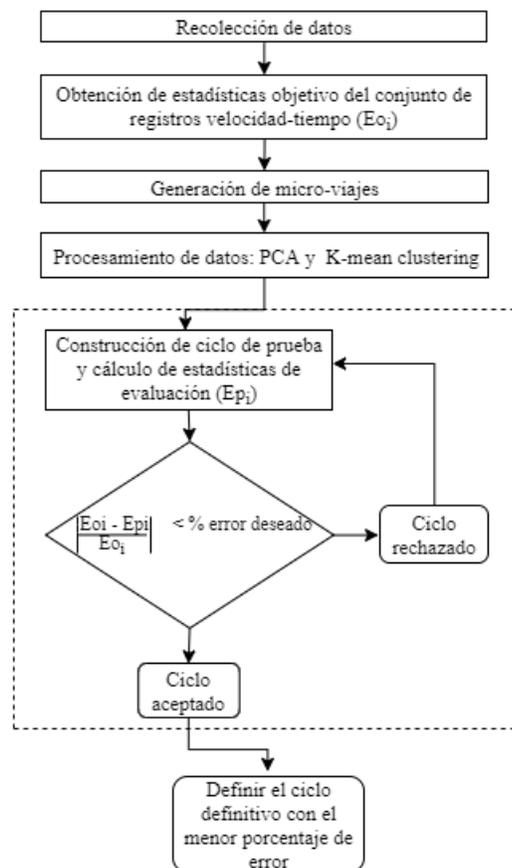


Figura 3-1. Esquema

Elaboración propia con base en Huang *et al.* (2007) y Desincedi *et al.* (2020)

De acuerdo a la Figura 3-1, el protocolo de desarrollo de un ciclo de conducción consta de cinco etapas fundamentales:

1. Recolección de datos de actividad vehicular;
2. Establecer los criterios con los que se evaluará el ciclo de conducción final y cálculo de las estadísticas objetivo;
3. Procesamiento de datos mediante la generación de micro-viajes y análisis estadísticos;
4. Construcción de ciclos de prueba; y
5. Definición del ciclo definitivo.

Empleando el ciclo de conducción obtenido, con el software *MOVES* se estimaron las emisiones contaminantes de los vehículos de carga tipo en la zona de estudio.

3.1. Área de estudio

El área de estudio de la investigación comprende la Zona de Monumentos Históricos de Santiago de Querétaro (ZMHQ); está reconocida como patrimonio histórico de la humanidad, y de acuerdo a Betanzo (2011), requiere de estrategias para mejorar el tránsito, el estado de los pavimentos y la infraestructura destinadas a las maniobras de carga y descarga. Además, la zona de estudio es relevante ambientalmente dado que, el Instituto Municipal de Planeación de Querétaro (IMPLAN) ha desarrollado un plan de manejo y conservación de la ZMHQ en donde figura la reducción de emisiones contaminantes.

La ZMHQ cuenta con una red vial de longitud total aproximada de 49.40 km. está conformada en su mayoría por calles locales, no obstante, contiene arterias colectoras como las avenidas Zaragoza y Universidad, y vías secundarias como Ezequiel Montes y Av. Circunvalación. El área tiene una extensión de 260.76 hectáreas y en ellas contiene aproximadamente 850 establecimientos comerciales de bienes de consumo perecederos, los cuales demandan una alta cantidad de transporte de carga día con día (IMPLAN, 2011; INEGI 2020). En la Figura 3-2, se muestra el área de estudio y sus establecimientos comerciales catalogados bajo los códigos 461110 – 462210 y 722320 – 722517 según el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN), correspondientes a establecimientos de abarrotes, alimentos, bebidas, tiendas de auto servicio y departamentales,

además de comercios de preparación de alimentos y bebidas. Con respecto a la operación del transporte de carga, la ZMHQ tiene horarios establecidos para realizar maniobras de carga y descarga, en el horario diurno están permitidas de 09:00 a 11:00 horas, en el vespertino de 16:00 a 18:00 horas y en el horario nocturno de 23:00 a 06:00 horas del siguiente día, sin embargo, es posible observar vehículos realizando maniobras de descarga fuera de estos horarios.

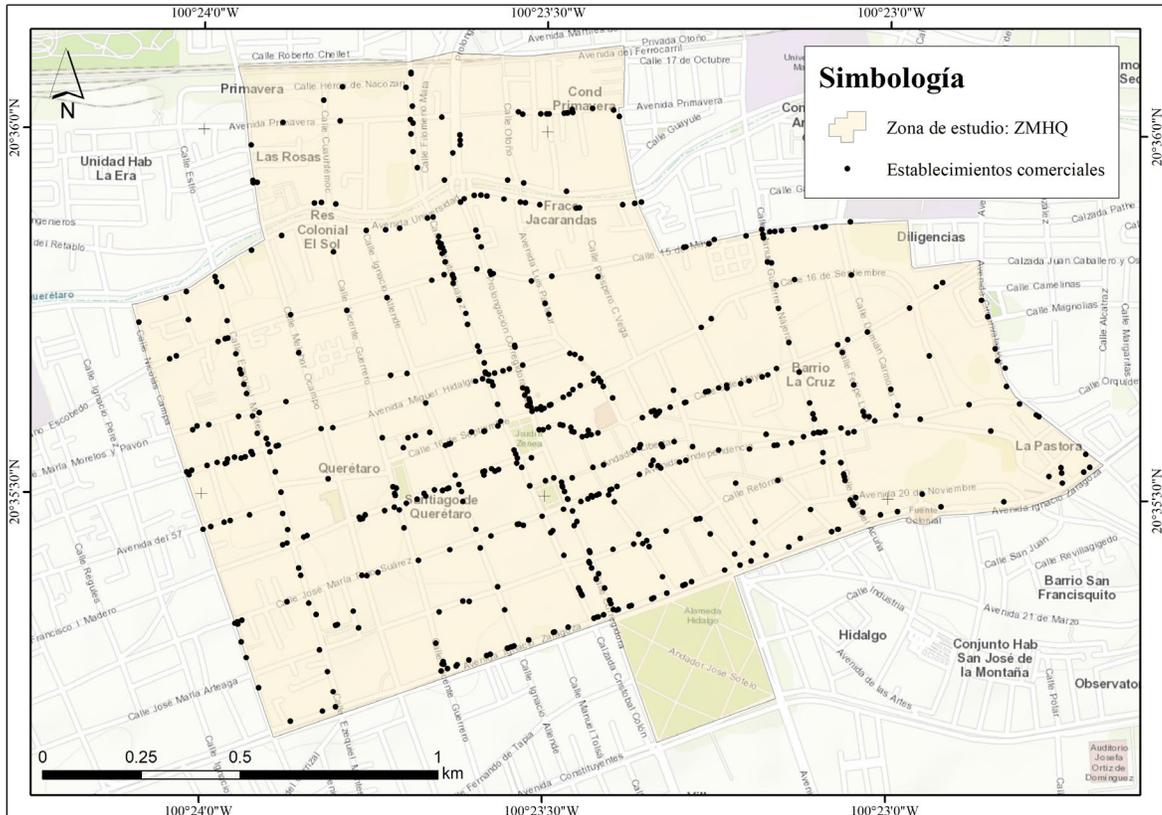


Figura 3-2. Zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2020)

3.2. Recolección de datos

3.2.1. Actividad vehicular

Para determinar los perfiles de velocidad-tiempo de los vehículos de carga dentro de la zona de estudio, se empleó la técnica de *car chase* o seguimiento de vehículo. El protocolo para la obtención de la actividad vehículos siguió los criterios establecidos por Austin *et al.*, (1993) y Morey *et al.*, (2000) señalados en el capítulo anterior.

1. El comienzo de cada viaje se realizó con el vehículo objetivo detenido dentro de la zona de interés.
2. El proceso de selección aleatoria del vehículo a seguir se mantuvo lo más simple posible, sustituyendo la preferencia de color del vehículo propuesto por Austin *et al.* (1993), por vehículos de carga ligeros.
3. El seguimiento de los vehículos se extendió la mayor cantidad de tiempo posible, intentando emular su velocidad, aceleraciones y deceleraciones. La distancia entre el vehículo objetivo y el de seguimiento fue de aproximadamente 30 m.
4. El seguimiento del vehículo objetivo paraba cuando:
 - a. Salía del área de estudio;
 - b. Se interponía un tercer vehículo entre los vehículos de seguimiento y objetivo;
 - c. Aparecía un comportamiento errático o peligroso por parte del conductor del vehículo objetivo.

La adquisición de los datos se realizó en días laborables y en horarios de 08:00 a 12:00 horas y de 15:30 a 18:00 horas, cubriendo tanto los horarios permitidos para maniobras de carga y descarga en el centro histórico de la ciudad, como los horarios adyacentes en los que se incumple esta reglamentación.

Una vez descargada la información capturada por los registradores de datos, esta fue analizada para descartar inconsistencias en los datos proporcionados por el dispositivo y con ello establecer si el recorrido registrado sería incluido en la base de datos o descartado.

3.2.2. Equipo usado para el registro de la actividad vehicular

Las velocidades, tiempos y ubicaciones fueron obtenidas por medio de un registrador de datos DG – 100 de la marca GlobalSat (Figura 3-3). Este equipo registra tiempo, fecha, velocidad, altitud y geoposicionamiento en intervalos especificados por el usuario, establecido en un segundo para los objetivos de esta investigación. El dispositivo adopta el datum WGS84 y tiene una precisión de 1.0-5.0 metros para la posición y 0.1 m/s para la velocidad.

Este dispositivo fue seleccionado debido a la facilidad de uso, precisión y costo. Además de haber sido utilizado recientemente por otros autores para investigaciones orientadas a movilidad como Krecl *et al.*, 2020 y Merritt *et al.*, 2019.



Figura 3-3. *Data Logger DG-100*

3.2.3. Obtención de las características de los vehículos observados

Para la obtención de las características de los vehículos se recurrió a la plataforma de consulta ciudadana del Registro Público Vehicular (REPUVE), en la cuál, por medio de las placas del vehículo es posible conocer su antigüedad, modelo, combustible utilizado, además de otras características.

3.3. Selección de criterios de evaluación

Con base en la revisión de la literatura se eligieron los criterios de evaluación que fueron empleados para la elección del ciclo de conducción definitivo de la investigación. Se procuró considerar los parámetros de actividad vehicular más representativos del transporte de carga, así como aquellos que influyen de manera importante en la generación de emisiones contaminantes.

3.4. Procesamiento de datos

3.4.1. Generación de micro-viajes

Los criterios propuestos para la extracción de los micro-viajes del conjunto de datos de actividad vehicular fueron establecidos con base en Farzaneh *et al.* (2014), no obstante, algunos de los puntos mencionados por los autores fueron modificados con el objetivo de

obtener una mayor representatividad de los parámetros de operación observados durante el levantamiento de datos en campo. Los criterios aplicados en el proyecto son los siguientes:

1. El primer micro-viaje comienza en el inicio de un recorrido y termina cuando:
 - a. Finaliza el recorrido.
 - b. La longitud del micro-viaje es mayor a 3 km.
2. El siguiente micro-viaje comienza en el final del anterior y termina según lo dictado en el primer punto.
3. Un micro-viaje debe tener un mínimo de 10 segundos duración.
4. Micro-viajes con velocidad promedio menor a 1 km/h son considerados estados inactivos y no se incluyen en el análisis.

3.4.2. Análisis de componentes principales

Con el objetivo de reducir la cantidad de variables empleadas durante el análisis de conglomerados y la posterior construcción del ciclo de conducción, se realizó un análisis de componentes principales (ACP). El ACP es uno de los análisis multivariantes más aplicados en el desarrollo de ciclos de manejo. Con este, el conjunto de variables o criterios de evaluación, posiblemente correlacionadas, se reduce a un grupo de variables sin correlación, reteniendo la mayor cantidad de información posible.

3.4.3. Análisis de conglomerados

Se aplicó el método de conglomerados *k-mean* para clasificar los micro-viajes en categorías homogéneas que representan los diferentes patrones de manejo que ocurren dentro de la zona de estudio, estas categorías o agrupaciones se establecieron como uno de los criterios en la construcción del ciclo de manejo.

3.5. Construcción y definición del ciclo final

El proceso para la obtención de ciclos de prueba y la posterior definición del ciclo definitivo se realizó por medio de cuatro pasos. Primero desarrollar ciclos; luego calcular las estadísticas de los parámetros de operación definidos en la etapa 3; después obtener el porcentaje de error de cada parámetro de evaluación para aceptar o rechazar el ciclo (en este caso se propone un error máximo de 5%); por último, elegir el ciclo de conducción con el menor porcentaje de error.

3.5.1. Desarrollo de ciclos candidatos

El inicio del procedimiento para el desarrollo de los ciclos de prueba consiste en seleccionar la duración o número de micro-viajes que conformarán los ciclos de conducción; en este caso, autores como Hung *et al.* (2007) recomiendan una duración de entre 10 y 20 minutos. Después, se construyeron distintos ciclos de prueba o candidatos, empleando el proceso de la Cadena de Markov.

3.5.2. Selección del ciclo de conducción definitivo

Existen distintas metodologías para evaluar y elegir el ciclo de conducción definitivo. En este estudio se empleó la ecuación 3-1 para obtener los valores de desempeño (VD) de cada ciclo de prueba y con ello establecer el ciclo de conducción definitivo.

$$VD = \sum_{i=1}^n \frac{\left(\frac{Eo_i - Ep_i}{Eo_i} \right)}{n} \quad \text{Ec. 3-1}$$

donde:

VD es el valor de desempeño

n es el número de parámetros de evaluación (i) definidos en la etapa 3,

Ep_i son las estadísticas de cada parámetro i del ciclo evaluado y

Eo_i son las estadísticas de cada parámetro i del conjunto de datos de actividad vehicular.

3.6. Estimación de emisiones contaminantes

Para la estimación de las emisiones contaminantes producidas por los vehículos de carga en la zona de estudio se utilizó MOVES en su versión 3, dada su flexibilidad para simular un amplio rango de contaminantes y en diferentes escalas, también por su creciente utilización en México, ya que, en años recientes ha sido empleada por instituciones públicas del rubro ambiental para la elaboración de inventarios de emisiones regionales, principalmente en el centro del país.

Se empleó la escala *Project Domain* para la simulación de las emisiones. Para incluir los micro-viajes obtenidos durante el trabajo de campo en el software, se utilizó la herramienta *Link Drive Schedule Importer*, para esto se reemplazaron tres tablas de la base de datos original de MOVES. Primero, la tabla *Driveschedule* la cual contienen tres columnas, ID, velocidad promedio, y nombre del ciclo; en la segunda tabla, *Drivescheduleassoc* se asignó a un tipo de camino a cada ciclo de conducción en la tabla anterior; y la tercera *Driveschedulesecond* se plasmaron las velocidades segundo a segundo de los ciclos de manejo para cada tipo de camino.

Además, para obtener una correcta adaptación del modelo MOVES al entorno de la zona de estudio, se generaron bases de datos con la siguiente información:

- Composición del combustible: describe la composición de los combustibles comercializados en el área de estudio. Los valores por defecto se modificaron de acuerdo a lo establecido por la NOM – 016 – CRE – 2016. Los combustibles soportados por el software son gasolina, diésel, gas natural, electricidad y etanol.
- Distribución por edad: distribución de la edad vehicular de las unidades en la flota vehicular modelada.
- Población por clase vehicular: contiene número de unidades por cada clase vehicular modelada. La clasificación de vehículos considerada por el software se muestra en la Tabla 3-1; en este estudio se empleó el camión ligero de uso comercial.

Tabla 3-1. Clases vehiculares contenidas en MOVES

| Agrupación general | Clasificación en <i>MOVES</i> |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Vehículos ligeros | Auto de pasajeros |
| | Camioneta de pasajeros |
| Camiones Unitarios | Camión ligero comercial |
| | Camión para recolección de residuos |
| | Camión de corto itinerario |
| | Camión de largo itinerario |
| Autobuses | Autobús interurbano |
| | Autobús urbano |
| | Autobús escolar |
| Camiones articulados | Camión articulado de corto itinerario |
| | Camión articulado de largo itinerario |

Fuente: EPA (2015)

- Distribución por tipo de camino: divide la actividad vehicular modelada en los distintos tipos de camino contenidos en el software. Los caminos disponibles en MOVES son los siguientes:
 - Fuera de camino
 - Rural con acceso restringido
 - Rural sin acceso restringido
 - Urbano con acceso restringido
 - **Urbano sin acceso restringido**
- Datos meteorológicos: contiene las características meteorológicas (temperatura y humedad) del área de estudio. Estos datos se desagregaron de forma mensual y horaria. La información se obtuvo a través de la estación hidrometeorológica “IQUERTAR6: CEA Of. Centrales” la cual es operada por la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEA).

Por último, para definir los estándares de emisión que establecen los límites máximos permitidos de emisiones contaminantes, se recurrió a las normas NOM – 042 – SEMARNAT – 2003 y NOM – 044 – SEMARNAT – 2017, la primera de ella referente a vehículos con peso bruto vehicular menor a 3,857 kg y la segunda para unidades con peso mayor al mencionado.

Resultados y Discusión

En este capítulo se exponen los hallazgos de esta investigación, alcanzados mediante el análisis e interpretación de los resultados obtenidos a través de la metodología descrita en el capítulo anterior. Se presentan resultados relativos al protocolo de obtención de datos de actividad vehicular, el procesamiento de la base de datos formada, la construcción y selección de un ciclo representativo para el transporte de carga que circula en la ZMHQ y el proceso realizado para la simulación de sus emisiones contaminantes.

4.1. Recolección de datos de actividad vehicular

Como se menciona en el capítulo 3, la zona de estudio en este proyecto fue la Zona de Monumentos Históricas de Querétaro. El trabajo de campo para obtener los patrones de conducción del transporte de carga dentro de dicha zona se desarrolló durante el período del lunes 7 septiembre al 2 de octubre del año 2020. En ese período se capturaron 37 recorridos, 6.44 horas de datos mediante la técnica de *chase car*, por medio de un *Data Logger* DG-100, configurado a una frecuencia de un segundo, para registrar información segunda a segundo. Cabe mencionar que, aunque la mayor parte de los estudios utilizando la metodología de persecución de vehículo presentan más de 15 horas de actividad vehicular registrada, autores como Yang *et al.* (2020) y Sigua, (1997) han logrado desarrollar ciclos de conducción representativos trabajando con una cantidad de tiempo similar a la que se tiene disponible en este proyecto.

Durante el proceso de obtención de datos se reformaron algunos de los puntos propuestos en la sección 3.2. Primero, dados los patrones de conducción en la zona y el nivel de congestión, la distancia entre el vehículo objetivo y de seguimiento, se redujo a lo menor posible, esto, para evitar la interposición de un tercer vehículo entre estos dos. También, se encontró que en el horario vespertino (15:30-18:00 horas), la afluencia de vehículos de reparto era escasa, por lo que se decidió establecer el horario para la recolección de datos en el periodo de 08:00

– 11:30 horas. Es importante agregar que, una cantidad considerable de rutas fueron descartadas debido a su extensión o inconsistencias en los datos registrados por los GPS.



Figura 4-1. Ejemplo de seguimiento a vehículo.

4.1.1. Limpieza de datos

Antes de iniciar el proceso para el desarrollo del ciclo de conducción, los pares obtenidos de velocidad-tiempo fueron examinados con el objetivo de eliminar potenciales errores en los registros del *data logger*. Para esto, se aplicaron cinco de los filtros propuestos por Duran y Earleywine (2012). Las correcciones realizadas se enlistan enseguida:

1. *Remoción de datos con velocidades negativas:* No se encontraron velocidades menores de cero durante el análisis de la base de datos.
2. *Reemplazar valores atípicos de velocidades altas/bajas:* Los registros de velocidad se comportan de una manera constante, por lo que en este filtro no se modificaron los datos.
3. *Remoción de errores en velocidades cero.* Según Duran y Earleywine, esto ocurre cuando el vehículo se encuentra en estado estacionario y el GPS sigue reportando pequeños movimientos, esta situación se atacó descartando *microtrips* (micro-viajes) con velocidad promedio menor a 1 km/h.
4. *Corregir huecos en los datos.* En el caso de los recorridos con pérdidas de datos ocasionados por la falta de señal del dispositivo GPS, durante la digitalización de los

recorridos, estos fueron recortados hasta la última velocidad cero antes del hueco de información.

5. *Reemplazar valores atípicos de aceleración/deceleración*: Para este filtro, se estableció un valor límite absoluto de 2 m/s^2 de aceleración/deceleración (Tong, 2019).

4.1.2. Distribución espacial y temporal del transporte de carga en la ZMHQ

La ZMHQ cuenta con una cantidad considerable de establecimientos comerciales. Por ello, las necesidades de movimiento de bienes dentro del área son muy variables, como consecuencia, durante el trabajo de campo se identificaron principalmente cuatro tipos de vehículos de carga recorriendo la zona de estudio. El vehículo con mayor presencia es el camión de carga ligero empleado principalmente por empresas refresqueras; en segundo lugar, se encuentran las camionetas Pick-up y del tipo Van, se indican los vehículos observados durante el trabajo de campo (Figura 4-2). Por último, se observaron de manera esporádica camiones de carga mediana circulando dentro de la ZMHQ. No obstante, durante este estudio, estos últimos no fueron tomados a consideración para la construcción del ciclo de conducción representativo de los vehículos de carga en la zona.



Figura 4-2. Vehículos observados en el área de estudio.

Por lo que respecta a la distribución espacial de los recorridos de los vehículos de carga observados en la ZMHQ, la mayoría de ellos se concentra en la parte central del área de interés. Las vialidades más concurridas son las calles Ezequiel Montes, Benito Juárez, Corregidora y las Avenidas Miguel Hidalgo e Independencia. En la Figura 4-2 se muestra un mapa de calor con relación a la frecuencia de paso de los vehículos que formaron parte del proceso experimental del estudio. Además, de acuerdo a los datos obtenidos durante la etapa experimental, el 32% del tiempo se circula sobre vialidades locales, el 43% en vialidades secundarias y el restante 25% sobre arterias colectoras. Es preciso destacar que, durante el periodo de tiempo en que los datos experimentales fueron recolectados, una sección de la calle José María Pino Suarez se encontraba en reparación, por lo que el flujo natural de los vehículos objetivo de algunas de las calles, pudo haberse modificado, por ejemplo, la alta afluencia de vehículos de carga por la calle José María Arteaga.

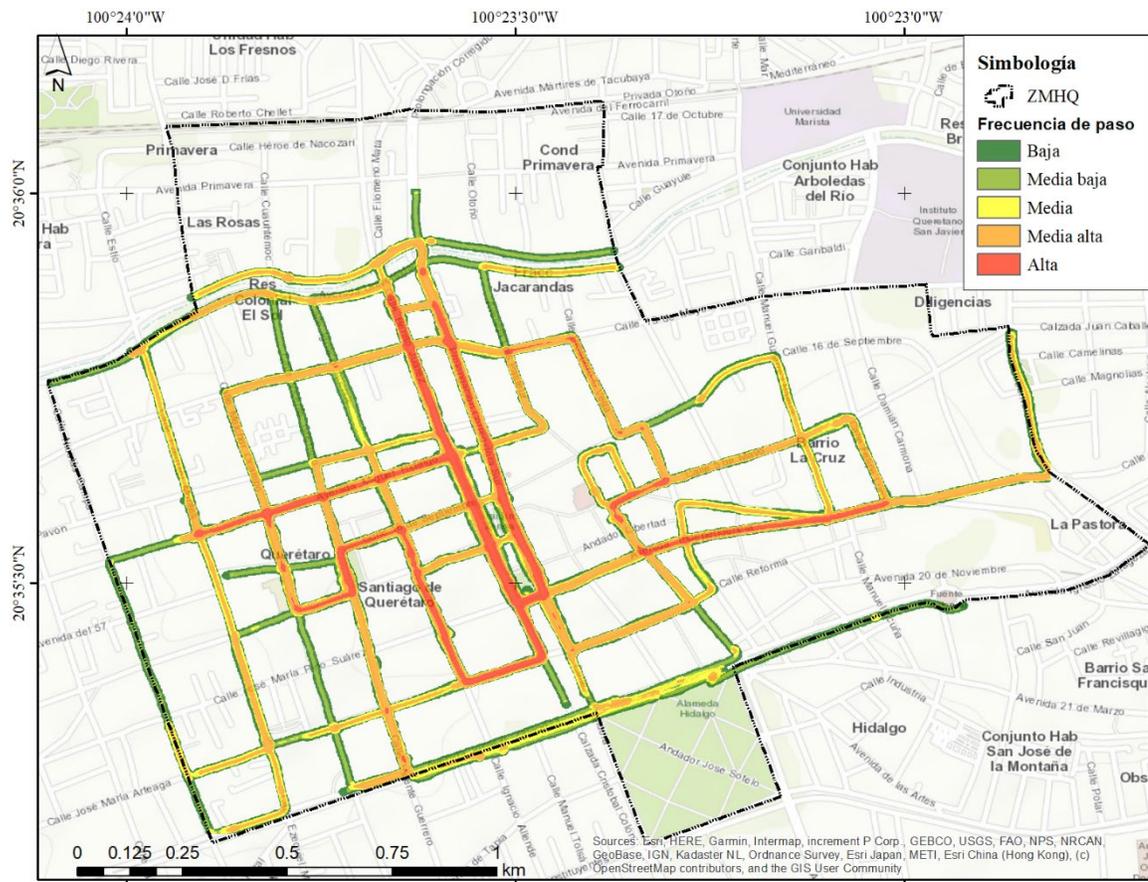


Figura 4-3. Mapa de calor de la actividad vehicular de carga observada en campo.

En lo que concierne a los horarios en los que estos vehículos realizan sus recorridos dentro de la zona, como se mencionó en el capítulo de Metodología, existe un horario regulado para realizar las maniobras de carga y descarga dentro la ZMHQ. Sin embargo, durante el proceso de levantamiento de datos en campo, se observaron vehículos infringiendo esa disposición, especialmente en los períodos de 08:00 - 09:00 y de 11:00 – 12:00 horas. Por su parte, los recorridos dentro del horario permitido se concentran principalmente en el horario matutino (9:00 – 11:00 horas), por la tarde la afluencia de camiones de carga resultó menor.



Figura 4-4. Horarios permitidos para maniobras de carga y descarga.

4.2. Selección de los criterios de evaluación

Antes de construir los ciclos de prueba, se identificaron los criterios que serían utilizados para evaluar su desempeño con respecto a los patrones de operación observados en el área de interés. De acuerdo a la revisión de la literatura, para construir los ciclos estandarizados utilizados mundialmente como el FTP 75, IMC y J 10-15 se han empleado comúnmente criterios relacionados con los cinco modos de conducción estándar, aceleración, deceleración, velocidad crucero, *creepmode* (modo lento) y el estado estacionario (ralentí). Con ellos se puede representar todo el conjunto de datos o solo algunos patrones específicos en la base de datos de actividad vehicular. Los parámetros de evaluación seleccionados para este estudio están basados en los propuestos por Huang *et al.* (2007). En la Tabla 4-1 se

presentan los criterios elegidos, sus definiciones y los indicadores estadísticos utilizados durante esta investigación.

Tabla 4-1. Indicadores aplicados para la caracterización de la actividad vehicular

| Parámetros de operación | Definición | Indicadores estadísticos |
|--|---|---|
| Duración de recorrido | Tiempo promedio de micro-viaje | Promedio (D) |
| Velocidad | - | promedio total (v) y promedio de movimiento (v_m) |
| Media cuadrática de la Aceleración | Ecuación 4-1 | |
| Energía cinética positiva | Ecuación 4-2 | |
| Cambios de aceleración-deceleración y viceversa <i>Modos de operación</i> | - | Promedio (C) |
| Aceleración | $\alpha \geq 0.1 \text{ m/s}^2$ | Promedio (a), proporción del tiempo (P_a) |
| Deceleración | $\alpha \leq 0.1 \text{ m/s}^2$ | Promedio (d), proporción del tiempo (P_d) |
| Velocidad crucero | $\alpha \leq 0.1 \text{ m/s}^2 , v > 5 \text{ km/h}$ | proporción del tiempo (P_c) |
| Modo lento | $\alpha \leq 0.1 \text{ m/s}^2 , v < 5 \text{ km/h}$ | proporción del tiempo (P_{ml}) |
| Ralentí | $v = 0$ (motor en marcha) | proporción del tiempo (P_r) |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Huang *et al* (2007), Nouri y Morency (2017).

La media cuadrática de la aceleración de los registros segundo a segundo, se calculó con la ecuación que se muestra enseguida.

$$a_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{aceleración}^2}{n}} \quad \text{Ec. 4-1}$$

Donde n es el número de registros en el conjunto de datos.

Por su parte, la energía cinética positiva, que es la energía necesaria para acelerar por unidad de distancia (m/s^2), se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$ECP = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n-1} (v_{i+1}^2 - v_i^2)$$

Ec. 4-2

Donde:

v_i es la velocidad en el instante i ($v_{i+1} > v_i$),

D es la suma de las distancias recorridas entre los instantes i e $i+1$ y

n es el número de registros de velocidad.

4.2.1. Estadísticas objetivo

Una vez definidos los criterios con los que se evaluaría el ciclo de conducción, se calcularon las “estadísticas objetivo”, las cuales son empleadas para evaluar la similitud estadística de los datos experimentales y los ciclos de manejo desarrollados. Para lograr esto, en primer lugar, se creó una base de datos a partir de los 37 recorridos que se obtuvieron durante la etapa de recolección de datos, resultando 22,365 registros de tiempo y velocidad. Para cada registro se calcularon los parámetros de aceleración y deceleración. Después, para todo el banco de datos, siguiendo las definiciones presentadas en la tabla 4-1, fueron obtenidas las proporciones de tiempo en que los vehículos están en cada uno de los cinco modos de conducción considerados (aceleración, deceleración, velocidad crucero, modo lento y ralenti). También, se calcularon la media cuadrática de la aceleración (a_{mc}) y la energía cinética positiva (ECP), con las ecuaciones 4-1 y 4-2, respectivamente. En la tabla 4-2, se exponen las estadísticas objetivo de 11 de los 13 parámetros de operación considerados, además de la velocidad máxima. También, para tener una mejor visión de las características de conducción de los vehículos de carga en la zona, se incluyen de manera desagregada los resultados para cada tipo de vialidad dentro de la ZMHQ, local, secundaria y arterias colectoras.

Como se aprecia en la Tabla 4-2, la velocidad promedio de los vehículos objetivo en la zona es de 13.93 km/h; con aceleraciones y desaceleraciones medias que rondan los 0.45 m/s²; es importante mencionar que empleando la técnica del seguimiento del vehículo, se presentan diferencias en los parámetros de aceleración y velocidad entre los vehículos de seguimiento y objetivo, sin embargo, Tong y Huang sostienen que los coeficientes de determinación entre

estos dos se encuentran alrededor del 0.97, por lo que los resultados pueden considerarse confiables. Por otro lado, se puede notar que la operación dentro de la ZMHQ está dominada por los estados de aceleración y deceleración, ocupando más del 65% de la actividad vehicular. Las proporciones de tiempo de los modos de ralenti y velocidad crucero toman el 16% del total, cada uno.

En lo que respecta a los datos por vialidad, la velocidad promedio más alta se presentó dentro de las vialidades locales, esto debido a que estas calles presentan un menor grado de congestión, por lo que el tiempo en estado estacionario se reduce, aumentando la media de velocidades. Por el contrario, la velocidad promedio en movimiento (omitiendo las velocidades iguales a cero) más alta, tiene lugar sobre las arterias colectoras. Caso contrario, las velocidades promedio menores se presentan en las vías secundarias en ambos casos. En las aceleraciones y desaceleraciones, la mayor diferencia se presenta para las arterias colectoras, siendo aproximadamente 13% mayores que para las vialidades locales y secundarias. Como resultado de esto, las ECP en las arterias colectoras, llegaron a los 0.51 m/s² reflejando una conducción más agresiva, en términos de aceleraciones y desaceleraciones, y, por lo tanto, un mayor consumo energético, que resulta en mayores emisiones contaminantes.

Tabla 4-2. Comparación parámetros de operación.

| Indicador | Datos experimentales | Vialidad Local | Vialidad Secundaria | Arteria Colectora |
|---|----------------------|----------------|---------------------|-------------------|
| Velocidad promedio (km/h) | 13.93 | 14.32 | 13.23 | 14.17 |
| Velocidad promedio en movimiento (km/h) | 16.76 | 16.22 | 16.18 | 18.73 |

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Velocidad máxima (km/h) | 63.60 | 41.30 | 49.50 | 63.60 |
| Aceleración promedio (m/s ²) | 0.45 | 0.44 | 0.44 | 0.50 |
| Deceleración promedio (m/s ²) | -0.48 | -0.47 | -0.45 | -0.54 |
| Media cuadrática de aceleración (m/s ²) | 0.55 | 0.46 | 0.44 | 0.51 |
| Energía cinética positiva (m/s ²) | 0.34 | 0.33 | 0.33 | 0.41 |
| Proporción del tiempo en ralenti (%) | 0.16 | 0.11 | 0.17 | 0.23 |
| Proporción del tiempo en velocidad crucero (%) | 0.16 | 0.18 | 0.16 | 0.11 |
| Proporción del tiempo en modo lento (%) | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 |
| Proporción del tiempo en aceleración (%) | 0.34 | 0.36 | 0.33 | 0.32 |
| Proporción del tiempo en deceleración (%) | 0.32 | 0.33 | 0.32 | 0.31 |

En relación a los modos o fases de conducción, los porcentajes en fases de aceleración y deceleración se comportan de manera muy similar, ocupando alrededor del 65% de la actividad vehicular, al igual que para el conjunto de datos experimentales. Por otro lado, las proporciones de tiempo menores están ligadas al modo lento. Por último, las diferencias más notorias se encuentran en los modos estacionario y velocidad crucero, los cuales están directamente relacionadas con los volúmenes de tráfico y la semaforización de la zona, influyendo en el tiempo que los vehículos de la zona de estudio se encuentran en estos estados de conducción.

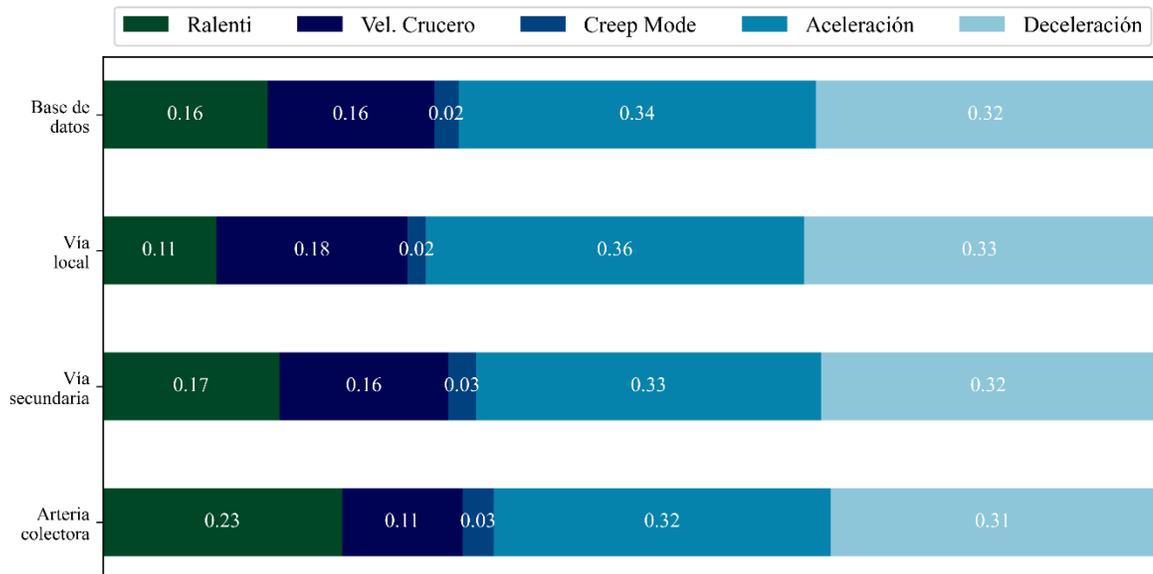


Figura 4-5. Proporción en modos de conducción

4.3. Procesamiento de los datos

4.3.1. Generación de micro-viajes

Definir los patrones promedio de conducción por medio del conjunto de datos experimentales es prácticamente imposible, por lo que es necesario dividirlo en recorridos más cortos llamados micro-viajes (*micro-trips*). De manera general, los micro-viajes son inicializados y finalizados por los dos estados de ralentí más próximos entre sí. No obstante, en este estudio se estableció el inicio de los micro-viajes al arranque del vehículo y el final del mismo en la última velocidad cero antes del próximo arranque, de esta manera se reflejan los tiempos de ralentí que los vehículos de carga presentan en la llegada a la locación de su próxima maniobra de carga o descarga. Con esto en mente, el siguiente paso fue generar micro-viajes a partir de la actividad vehicular recopilada, a través de un código desarrollado en el lenguaje de programación Python (Anexo A). La base de datos fue dividida en micro-viajes siguiendo los lineamientos establecidos en el apartado 3.4.1, comenzando cada micro-viaje en el inicio de un recorrido (velocidad cero) y terminándolo en fin del mismo. Como resultado, se obtuvieron 221 micro-viajes, los cuales son descritos con los 13 criterios de evaluación seleccionados en la sección 4.2.

Un subconjunto de los micro-trips se exponen en la tabla 4-3. Si bien, en la tabla 4-2, ya se habían presentado algunas de las estadísticas objetivo, restando la duración promedio de micro-viaje y el número de cambios de aceleración-desaceleración, de la totalidad de micro-trips se tiene que la media de duración (dmt) es de 99.83 segundos y presentan un promedio de cambios de aceleración-desaceleración y viceversa (c) de 19.64 segundos.

Tabla 4-3. Estructura de micro-viajes.

| Micro-viaje | v (km/h) | V _m (km/h) | ECP (m/s ²) | P _r (%) | P _c (%) | C | d (s) |
|-------------|----------|-----------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------|
| 1 | 18.86 | 19.02 | . . . | 0.310 | 0.003 | 0.227 | . . . 91 369 |
| 2 | 16.34 | 16.80 | . . . | 0.400 | 0.014 | 0.096 | . . . 10 72 |
| 3 | 19.57 | 19.87 | . . . | 0.311 | 0.010 | 0.212 | . . . 48 197 |
| . | . | . | . | . | . | . | |
| . | . | . | . | . | . | . | |
| . | . | . | . | . | . | . | |
| 109 | 10.87 | 26.18 | . . . | 0.500 | 0.572 | 0.044 | . . . 16 158 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-----|
| 110 | 8.07 | 17.94 | . . . | 0.372 | 0.540 | 0.070 | . . . | 7 | 99 |
| 111 | 15.86 | 16.97 | . . . | 0.304 | 0.055 | 0.246 | . . . | 49 | 198 |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| 219 | 12.76 | 16.35 | . . . | 0.270 | 0.207 | 0.183 | . . . | 14 | 81 |
| 220 | 13.32 | 14.67 | . . . | 0.351 | 0.078 | 0.220 | . . . | 38 | 140 |
| 221 | 23.83 | 25.42 | . . . | 0.466 | 0.055 | 0.117 | . . . | 17 | 127 |

4.3.2. Análisis de componentes principales

Durante este proceso se empleó el software estadístico R, específicamente su librería *pysch*. Ante todo, fue necesario establecer el número de componentes principales a utilizar, para ello, es posible recurrir a alguna de las siguientes tres reglas (Jolliffe, 2002):

1. *Proporción acumulada de la varianza total*: Para este criterio, es necesario establecer un porcentaje mínimo aceptable de la varianza explicada por las componentes, este valor se encuentra generalmente entre 70 y 90 %.
2. *Magnitud de eigenvalores*: llamado también “criterio de Kaiser-Harris”, esta técnica propone retener solo las componentes principales con eigenvalores mayores a uno.
3. *Método gráfico*: para realizar este método es necesario, graficar un número determinado de componentes principales y sus respectivos eigenvalores; una vez graficada, se retienen aquellos componentes que estén por encima del “codo” de la línea que dibuja el gráfico.

En este caso, para seleccionar las variables a utilizar, se siguió el criterio de Kaiser-Harris. Este método propone retener las primeras tres componentes, con eigenvalores de 4.47, 4.23 y 1.44. Se puede decir que, los resultados concuerdan con las dos técnicas restantes para elegir el número de componentes consideradas, ya que la componente número tres se encuentra en el codo de la gráfica componentes-eigenvalores (Figura 4-3). Además, las componentes contienen el 33, 23 y 22% de la varianza total, para las componentes dos, uno y tres, respectivamente, sumando una varianza total acumulada del 78%.

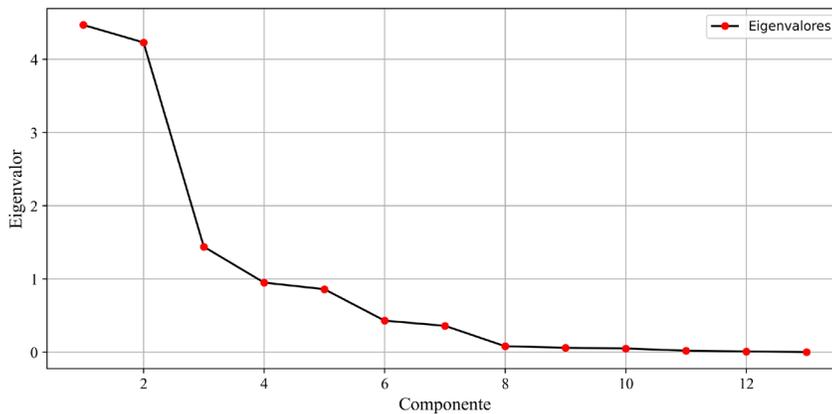


Figura 4-6. Gráfico componente-eigenvalor

Antes de extraer las cuatro componentes principales, el *dataframe* de variables y los microviajes fueron estandarizados, debido a la variación de las magnitudes entre ellas, por la diferencia de sus unidades. Después, se aplicó la función *principal()* en R, los coeficientes resultantes para los 13 parámetros con respecto a las componentes extraídas, fueron analizadas e interpretadas. En los resultados, un coeficiente alto indica una fuerte correlación variable-componente, y de acuerdo a Matsunaga (2010), una práctica conservadora es relacionar las variables con los coeficientes mayores a 0.60-0.70. En la Tabla 4-4, se muestran los coeficientes para las componentes extraídas en relación a los indicadores de actividad vehicular. Se puede notar que, la componente C1 está relacionada con la velocidad del vehículo, ya que tiene altos coeficientes para la velocidad promedio, velocidad promedio en movimiento, los cambios de aceleración-deceleración y la duración promedio por microviaje. La componente C2 se puede interpretar como una medida de la aceleración, debido a que se correlaciona con la aceleración y deceleración media, la energía cinética positiva y la media cuadrática de la aceleración. Por último, la componente C3 se atribuye a la dinámica del vehículo ya que refleja la proporción en tiempo de ralenti, aceleración y desaceleración.

Tabla 4-4. Matriz de relaciones componentes principales-parámetros de evaluación.

| Parámetro | C2 | C1 | C3 |
|----------------------------------|------|-------|-------|
| Velocidad promedio | 0.21 | 0.71 | 0.56 |
| Velocidad promedio en movimiento | 0.40 | 0.76 | 0.24 |
| Aceleración promedio | 0.85 | -0.12 | -0.02 |

| | | | |
|--|-------|-------|-------|
| Deceleración promedio | -0.89 | -0.16 | -0.02 |
| Media cuadrática de aceleración | 0.96 | 0.13 | -0.02 |
| Energía cinética positiva | 0.94 | -0.01 | 0.01 |
| Proporción del tiempo en ralentí | 0.29 | -0.16 | -0.92 |
| Proporción del tiempo en velocidad crucero | -0.51 | 0.50 | 0.22 |
| Proporción del tiempo en creep | -0.29 | -0.60 | -0.02 |
| Proporción del tiempo en aceleración | 0.18 | 0.38 | 0.82 |
| Proporción del tiempo en deceleración | -0.01 | 0.06 | 0.88 |
| Cambios aceleración-deceleración | -0.42 | 0.68 | 0.26 |
| Duración de micro-viaje | -0.34 | 0.80 | 0.10 |

4.3.3. Análisis de conglomerados

Con el fin de mejorar la representatividad del ciclo desarrollado, se realizó un análisis de conglomerados (AC). Las componentes principales obtenidas durante el ACP, fueron tomadas como las variables para el análisis de conglomerados (AC) en los micro-viajes. El AC es aplicado para categorizar un conjunto de elementos, en varios subconjuntos, en donde cada individuo es similar a los otros en ese mismo subconjunto o conglomerado y distinto a los elementos en los otros grupos. En el ámbito de los ciclos de conducción, el AC es utilizado para clasificar los micro-viajes similares en diferentes categorías, las cuales representan distintos patrones de conducción.

Durante la elaboración del marco de referencia se encontró que, el método comúnmente empleado para la clasificación de micro-viajes es el método de k-medias. En esta técnica, la ecuación de la distancia Euclídea (Ecuación 4-3) es generalmente aplicada, para obtener las distancias entre los centroides y los elementos en los conglomerados.

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}$$

Ec. 4-3

donde:

d_{ij} es la distancia de cada micro-viaje al centroide en turno,

p es el número de parámetros que definen a cada elemento, en este caso el número de componentes principales retenidas durante el ACP,

x_{ik} es el valor del micro-viaje i en el parámetro k , y

x_{jk} es el centroide j en el parámetro k .

El proceso general para realizar un análisis por conglomerados por el método de k-medias es el siguiente:

1. Elegir el número de conglomerados ‘k’;
2. Seleccionar ‘k’ objetos al azar (centroides iniciales), dentro del conjunto de elementos;
3. Asignar cada elemento al conglomerado cuyo centroide esté más cerca.
4. Cada vez que se asigna un elemento más a algún conglomerado, se recalcula su centroide con base en los elementos dentro de ese subconjunto; y
5. Regresar al paso 2 e iterar hasta la convergencia.

Primero, para elegir el número óptimo de conglomerados, se utilizó la técnica del valor promedio de Silhouette, este está basado en la distancia relativa entre un ente i y los elementos de cada conglomerado. El índice de Silhouette está definido por:

$$s_i = \frac{\min(b_i) - a_i}{\max(a_i, \min(b_i))} \quad \text{Ec. 4-4}$$

Donde a_i es la distancia promedio entre el micro-viaje i respecto a los otros micro-viajes en ese mismo grupo, b es un vector, en donde se encuentran las distancias promedio entre el micro-viaje i y los micro-viajes en los otros conglomerados.

El rango del índice de Silhouette (S) va de -1 a 1, cuanto mayor sea S mejor se aproxima el micro-viaje a los elementos en su grupo y la similitud con los entes en los otros conglomerados es menor. En la Figura 4-6 se muestran los índices promedio de Silhouette para un rango de 2 a 10 conglomerados. El mayor valor obtenido fue de 0.34 correspondiente a cuatro conglomerados, por lo tanto, los micro-viajes se dividieron en cuatro grupos.

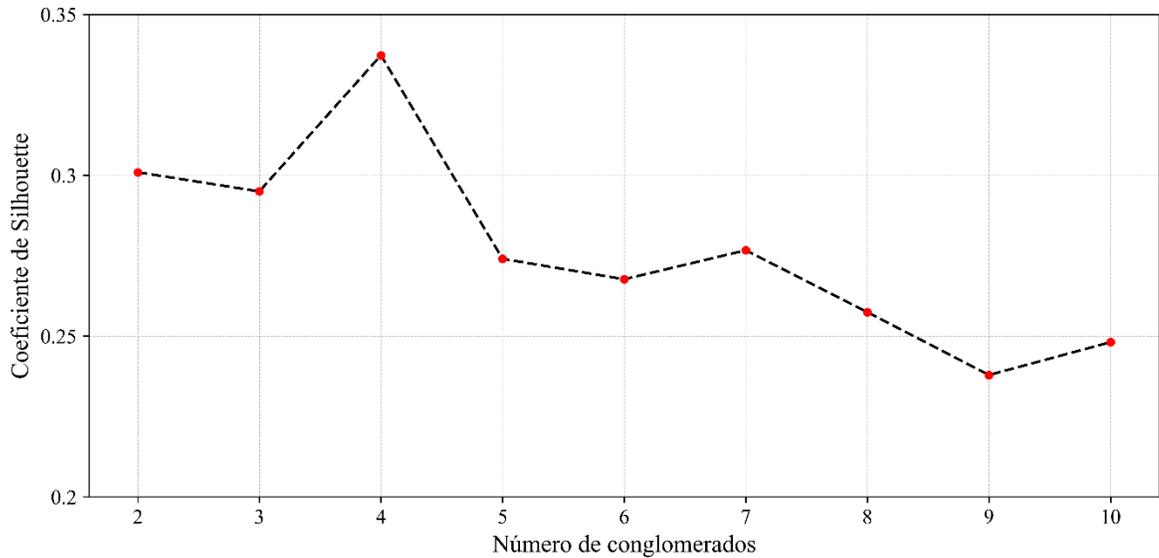


Figura 4-7. Promedios del índice de Silhouette.

La categorización en grupos se realizó por medio de un algoritmo en Python, usando el módulo *sklearn*. Como resultado, los 221 micro-viajes se subdividieron en 96 micro-viajes en el grupo uno, 48 para el dos, 43 para el tres y 34 en el cuatro. En la Tabla 4-5, se exponen características promedio de cada conglomerado. Los grupos se pueden describir de la siguiente manera:

- Grupo 1: Con patrones de operación que se aproximan a los promedios del conjunto de datos original y recorridos largos, este conglomerado contiene las características de conducción que se presentan sobre las vías locales
- Grupo 2: En esta categoría se presentan recorridos con condiciones de tráfico medio, sin embargo, su alto porcentaje de tiempo en ralentí indica una posible representación de las características de conducción de la zona central del área de estudio, en donde los estados estacionarios son recurrentes resultado del nivel de congestión, además de las intersecciones semaforizadas, las cuales aumentarían los tiempos en ralentí.
- Grupo 3: Los micro-viajes en este grupo representan los recorridos en áreas en donde el nivel de congestión es alto, pero se tiene un flujo del tráfico medianamente constante.

- Grupo 4: En este conglomerado se presentan las velocidades, aceleraciones y deceleraciones máximas. Además, contiene poco tiempo en estado estacionario. Este grupo contendría las características de conducción propias de las arterias colectoras que limitan el área de estudio.

Tabla 4-5. Caracterización de conglomerados.

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

En la tabla anterior se observa que los cuatro grupos tienen características únicas y bien definidas, siendo la velocidad, el tiempo en ralentí y la duración promedio de los micro-viajes, los principales diferenciadores. Yang *et al.* (2019) indican que para lograr la mayor aproximación entre el ciclo desarrollado y las condiciones de operación reales, el número óptimo de conglomerados deberá ser igual al número de tipo de vialidades dentro de la zona de estudio, sin embargo, esta aseveración no tendría en cuenta las variaciones que las condiciones de operación pudiera llegar a sufrir en un mismo tipo de vialidad, ya sea a través del tiempo por el aumento o disminución del tráfico o por medio del espacio, ya que diferentes vialidades, del mismo tipo pueden llegar a tener distintos grados de congestión. Por lo que, a consideración del autor, la definición del número de conglomerados deberá tener sus bases en los métodos matemáticos propios de las técnicas de conglomerados.

4.4. Construcción del ciclo de conducción

4.4.1. Desarrollo de ciclos prueba

La Cadena de Markov ha sido empleada recurrentemente para la construcción de ciclos de conducción representativos. Esta técnica emplea una matriz de probabilidades de transición de estado a estado, en donde los estados representan cada conglomerado. En este método el primer estado es elegido de manera aleatoria, después, el siguiente es elegido con base en la

matriz de probabilidad de transiciones, dependiendo solamente del estado actual y no de los conglomerados anteriores. En la Cadena de Markov la probabilidad (P) de pasar de un estado x_i a uno x_j está dada por (Zhao, 2020):

$$P_{ij} = P(X_{k+1} = x_j, |X_k = x_i) \quad \text{Ec. 4-5}$$

Para conseguir la matriz de probabilidad de transiciones, el primer paso fue identificar el número de micro-viajes en cada uno de los 37 recorridos disponibles en la base de datos de actividad vehicular, así como las transiciones de conglomerado que ocurren entre ellos. En el proyecto se tuvieron 16 posibles transiciones derivadas de las permutaciones entre cada uno de los cuatro conglomerados disponibles. Los valores de la matriz de probabilidades fueron calculados con la ecuación 4-6.

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{j=1}^l N_{ij}} \quad \text{Ec. 4-6}$$

donde N_{ij} es el número de transiciones del conglomerado i al conglomerado j y el denominador representa la suma de cambios del estado i a los otros estados, incluyéndose a sí mismo.

Las probabilidades P_{ij} deberán ser mayores o iguales a cero, además de que la suma de las transiciones de un estado a los demás, deberá ser igual a uno. A continuación, se muestra la matriz de ocurrencias (O), en donde se plasma el número de veces que se cambia de un estado a otro y la matriz de probabilidad de transiciones (P), en donde se exponen las probabilidades de cambio entre conglomerado y conglomerado.

$$O = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & O_{13} & O_{14} \\ O_{21} & O_{22} & O_{23} & O_{24} \\ O_{31} & O_{32} & O_{33} & O_{34} \\ O_{41} & O_{42} & O_{43} & O_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 42 & 14 & 13 & 9 \\ 14 & 7 & 12 & 10 \\ 13 & 9 & 20 & 4 \\ 6 & 3 & 1 & 7 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.538 & 0.179 & 0.166 & 0.115 \\ 0.325 & 0.163 & 0.279 & 0.232 \\ 0.282 & 0.195 & 0.435 & 0.087 \\ 0.352 & 0.176 & 0.059 & 0.412 \end{bmatrix}$$

Las matrices de ocurrencias y de probabilidades de transición reflejan los resultados del análisis de conglomerados. La transición al grupo 1, siendo este el conglomerado que contiene más micro-viajes, tiene mayores probabilidades de ser elegida durante el proceso de la Cadena de Markov. Los ciclos construidos por el algoritmo desarrollado, tenderán a contener una mayor cantidad de micro-viajes del conglomerado número uno, aportando mayor tiempo de características de conducción sobre vías locales, situación que concuerda con las condiciones reales de operación observadas durante el levantamiento de los datos.

La construcción y selección de ciclos representativos fue realizada por medio de un proceso iterativo en un código elaborado en Python, que se expone en el anexo B. El algoritmo cuenta con dos condiciones especiales, primero, dado que la duración promedio de los micro-viajes obtenidos es de 99 segundos, el algoritmo concatena 12 de ellos, basado en un protocolo de la Cadena de Markov, de tal forma que la duración del ciclo representativo esté alrededor de los 1,200 segundos, duración comúnmente utilizada para el desarrollo de ciclos de conducción (Huang, 2007). Después, las características del ciclo resultante (velocidad promedio, velocidad promedio en movimiento, aceleración y deceleración promedio, media cuadrática de la aceleración, energía cinética positiva, cambios de aceleración-deceleración y viceversa, duración promedio de micro-viajes y la proporción de tiempo en ralentí, aceleración y deceleración), son comparadas con las estadísticas objetivo presentadas en la sección 4.2.1, si cada una de ellas presentan un error relativo (ER) menor a un porcentaje predeterminado, el ciclo es considerado aceptable y se toma en cuenta para su posterior evaluación (ecuación 4-7). En la literatura se pueden encontrar porcentajes de error aceptable desde el 5% hasta el 15%, no obstante, para lograr la mayor similitud en las características de operación del ciclo sintetizado y los datos obtenidos en campo, se optó por definir el error relativo aceptable al 5%. El ciclo de iteración termina cuando se encuentran 10 ciclos que cumplen con el porcentaje de error máximo establecido. El porcentaje de error aceptable establecido, así como la cantidad de micro-viajes disponibles, repercuten directamente en el

tiempo del procesamiento del algoritmo para encontrar los 10 ciclos, en este caso, el tiempo de búsqueda fue de aproximadamente 200 minutos.

$$ER = \left| \frac{\theta_t - \theta_i}{\theta_t} \right| \quad \text{Ec. 4-7}$$

donde θ_t son los valores de las estadísticas objetivo y θ_i las estadísticas del ciclo en evaluación.

Tabla 4-6. Criterios de evaluación de 10 ciclos aceptables.

| Ciclo | v (km/h) | vm (km/h) | a (m/s ²) | d (m/s ²) | amc (m/s ²) | eCP (m/s ²) | pr (%) | pa (%) | pd (%) | c | dmt (s) | Duración (s) |
|-------|-------------|--------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|-------|------------|-----------------|
| 1 | 13.86 | 16.88 | 0.45 | -0.49 | 0.56 | 0.34 | 0.15 | 0.34 | 0.31 | 18.92 | 97.25 | 1167 |
| 2 | 13.46 | 16.17 | 0.46 | -0.47 | 0.57 | 0.35 | 0.14 | 0.34 | 0.33 | 20.58 | 98.33 | 1180 |
| 3 | 13.59 | 16.34 | 0.45 | -0.49 | 0.57 | 0.33 | 0.15 | 0.34 | 0.32 | 18.83 | 96.58 | 1159 |
| 4 | 13.80 | 16.43 | 0.46 | -0.47 | 0.57 | 0.35 | 0.14 | 0.34 | 0.33 | 19.08 | 101.17 | 1214 |
| 5 | 13.35 | 15.99 | 0.45 | -0.47 | 0.55 | 0.36 | 0.14 | 0.35 | 0.34 | 18.83 | 96.08 | 1153 |
| 6 | 13.61 | 16.54 | 0.45 | -0.50 | 0.57 | 0.34 | 0.15 | 0.35 | 0.32 | 18.75 | 97.08 | 1165 |
| 7 | 13.63 | 16.43 | 0.43 | -0.47 | 0.54 | 0.33 | 0.14 | 0.34 | 0.32 | 20.08 | 100.42 | 1205 |
| 8 | 13.68 | 16.58 | 0.46 | -0.47 | 0.56 | 0.33 | 0.15 | 0.33 | 0.33 | 19.33 | 96.08 | 1153 |
| 9 | 13.27 | 16.18 | 0.45 | -0.46 | 0.54 | 0.34 | 0.15 | 0.33 | 0.32 | 18.83 | 96.33 | 1156 |
| 10 | 13.99 | 17.02 | 0.44 | -0.47 | 0.55 | 0.34 | 0.15 | 0.34 | 0.32 | 20.25 | 95.00 | 1140 |

En la Tabla 4-6, se muestran los 10 ciclos obtenidos a través del proceso de la Cadena de Markov.

4.4.2. Selección del ciclo definitivo

Para elegir el ciclo de conducción definitivo se analizaron los valores de desempeño (VD), los cuales reflejan la media del error relativo para 11 de los 13 criterios de evaluación, dejando de lado el tiempo en velocidad crucero y *creepmode*, ya que estas variables no presentaron alguna relación importante con algunas de las componentes retenidas durante el PCA. Por lo tanto, el ciclo seleccionado fue aquel con el menor VD, ya que cuanto menor sea el valor de desempeño, mejor es el ajuste del ciclo de conducción con respecto a los datos obtenidos durante la recolección de información. Los valores de desempeño se obtuvieron mediante la Ecuación 4-7, en donde P es el número de parámetros evaluados, en este caso 11 y ER_i es el error relativo del criterio P .

$$VD = \frac{1}{11} \sum_{i=0}^P ER_i$$

Ec. 4-7

Con base en la ecuación anterior, el ciclo seleccionado fue el número siete (anexo C), el cual resultó con un valor de desempeño de 0.0206, es decir 2.06% de error en comparación con las características de operación de la actividad vehicular observada en el área de estudio y duración de 1,205 segundos, apenas 5 segundos por debajo de la duración objetivo.

A continuación, se presenta una comparativa de las estadísticas objetivo y las estadísticas del ciclo de conducción para la zona de monumentos históricos de Querétaro (CCZMHQ). Al contrastar las características promedio de operación, la mayoría de los parámetros presentan un porcentaje de error menor al 3%, este es superado tan solo por la proporción en tiempo en ralentí, la energía cinética positiva y la media de la aceleración. Por otro lado, las proporciones en tiempo de aceleración y deceleración, son los que muestran una mayor similitud con las velocidades obtenidas durante del trabajo de campo.

Tabla 4-7. Comparación ciclo de conducción y datos experimentales.

| Parámetro | Datos de campo | Ciclo de conducción | Error relativo |
|---|----------------|---------------------|----------------|
| Velocidad promedio (km/h) | 13.932 | 13.633 | 2.15% |
| Velocidad promedio en movimiento (km/h) | 16.764 | 16.426 | 2.02% |
| Aceleración promedio (m/s ²) | 0.454 | 0.434 | 4.46% |
| Deceleración promedio (m/s ²) | -0.479 | -0.468 | 2.48% |
| Media cuadrática de aceleración (m/s ²) | 0.547 | 0.544 | 0.52% |
| Energía cinética positiva (m/s ²) | 0.345 | 0.329 | 4.38% |
| Proporción del tiempo en ralentí (%) | 0.147 | 0.152 | 3.41% |
| Proporción del tiempo en aceleración (%) | 0.340 | 0.339 | 0.36% |
| Proporción del tiempo en desaceleración (%) | 0.322 | 0.321 | 0.36% |
| Cambios de aceleración - desaceleración y viceversa | 19.643 | 20.083 | 2.24% |
| Duración promedio de micro-viajes (s) | 99.833 | 100.417 | 0.59% |

Con el fin de comparar de mejor manera la similitud entre los comportamientos de conducción en los datos experimentales y el CCZMHQ, se construyeron gráficas de distribución de probabilidades de velocidad-aceleración (DPVA). Las DPVA fueron

desarrolladas con una precisión de 0.20 m/s^2 y 5 km/h y, rangos de $-2 \text{ m/s}^2 - 2 \text{ m/s}^2$ y $0 \text{ km/h} - 65 \text{ km/h}$ para la aceleración y velocidad respectivamente. En la Figura 4-7, se puede ver que los patrones de operación son muy similares, concentrando gran parte de su actividad con velocidades menores a los 30 km/h y con aceleraciones de entre -1 m/s^2 y 1 m/s^2 . No obstante, es posible notar que en los datos de actividad vehicular originales se encuentra una mejor dispersión de los pares velocidad-aceleración, mientras que en el CCZMHQ se aprecia una mayor tendencia a las aceleraciones entre -0.5 m/s^2 y 0.5 m/s^2 . De igual forma, los dos gráficos hacen notoria la recurrencia de los estados de inactividad o ralenti que se presentan la zona de estudio.

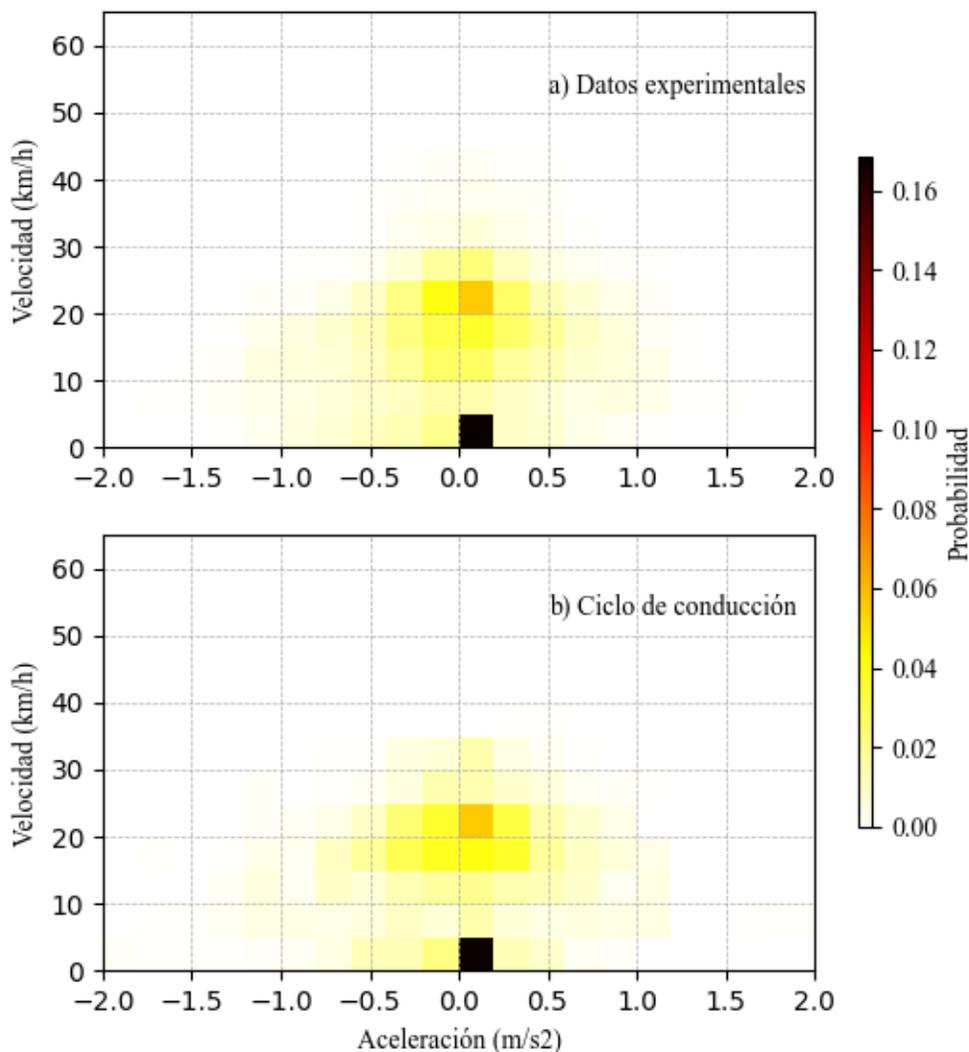


Figura 4-8. DPVA para datos experimentales y ciclo sintetizado.

Por último, en la Figura 4-8, se presenta el ciclo de conducción sintetizado de manera gráfica como un perfil velocidad-tiempo. El ciclo tiene una duración de 1,205 segundos, con velocidad media de 13.63 km/h y máxima de 35.4 km/h. Además, alrededor de ocho períodos de inactividad se presentan, reflejando comportamientos típicos de la zona, con aproximadamente 1.75 paradas por km. Este ciclo será empleado posteriormente para la simulación de las emisiones móviles a través de MOVES.

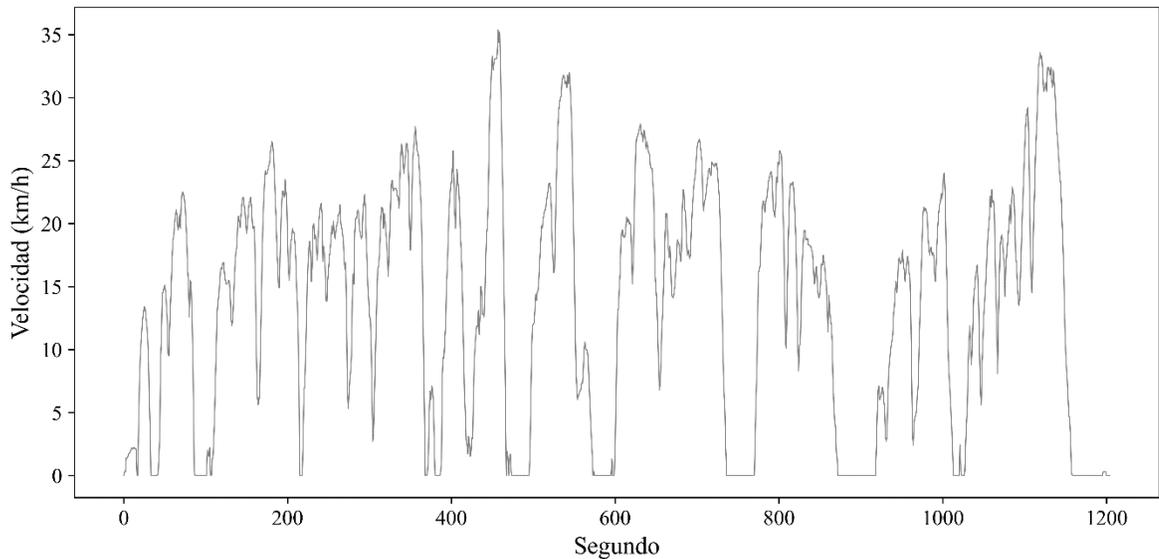


Figura 4-9. Ciclo de conducción para la ZMHQ.

4.5. Comparación con ciclos de conducción establecidos en las normas mexicanas

En México, los límites máximos permisibles de emisiones móviles están establecidos en la NOM – 044- SEMARNAT- 2017. Esta norma, incluye dos ciclos de conducción para emplearlos como herramienta para la certificación de los vehículos comercializados en el país: el Federal Test Procedure 75 (FTP75) y el Nuevo Ciclo Europeo de Prueba (NEDC, por sus siglas en inglés). El primero de ellos es un ciclo transitorio estadounidense desarrollado para reproducir las características de operación de los vehículos ligeros en Los Ángeles. Por su parte, el NEDC, es un ciclo sintetizado mediante la concatenación artificial de períodos de aceleración, deceleración, velocidad crucero y ralentí. Tomando esto en cuenta, los ciclos mencionados carecen de representatividad con respecto de las condiciones de operación

dentro de la zona de estudio y presumiblemente de manera generalizada dentro de las ciudades mexicanas, especialmente para la actividad vehicular del transporte urbano de carga. Para comparar las principales características de estos y el ciclo desarrollado durante esta investigación, en la Tabla 4-8 se exponen 12 parámetros de operación que describen a cada uno de los ciclos.

Tabla 4-8. Comparación con ciclos en normativa mexicana.

| Parámetro | ZMHQ | FTP75 | NEDC | Error relativo (FTP75) | Error relativo (NEDC) |
|---|--------|--------|--------|------------------------|-----------------------|
| Velocidad promedio (km/h) | 13.66 | 34.12 | 33.60 | -1.50 | -1.46 |
| Velocidad promedio en movimiento (km/h) | 16.43 | 42.17 | 44.75 | -1.57 | -1.72 |
| Velocidad máxima (km/h) | 35.40 | 91.25 | 120.00 | -1.58 | -2.39 |
| Aceleración promedio (m/s ²) | 0.434 | 0.609 | 0.53 | -0.40 | -0.22 |
| Deceleración promedio (m/s ²) | -0.468 | -0.701 | -0.82 | -0.50 | -0.76 |
| Media cuadrática de aceleración (m/s ²) | 0.544 | 0.761 | 0.57 | -0.40 | -0.06 |
| Energía cinética positiva (m/s ²) | 0.329 | 0.348 | 0.22 | -0.06 | 0.32 |
| Proporción del tiempo en ralentí | 0.152 | 0.179 | 0.237 | -0.18 | -0.56 |
| Proporción del tiempo en velocidad crucero | 0.154 | 0.212 | 0.377 | -0.38 | -1.46 |
| Proporción del tiempo en creep mode | 0.035 | 0.004 | 0.000 | 0.88 | 1.00 |
| Proporción del tiempo en aceleración | 0.339 | 0.323 | 0.234 | 0.05 | 0.31 |
| Proporción del tiempo en deceleración | 0.321 | 0.281 | 0.151 | 0.12 | 0.53 |

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se pueden hacer las siguientes observaciones: las mayores discrepancias se encuentran en las velocidades, mientras que los ciclos FTP75 y NEDC tienen velocidades promedio y velocidades promedio en movimiento alrededor de los 33 y 43 km/h respectivamente, el CCZMHQ no supera los 20 km/h en ninguno de los dos casos. Además, las velocidades máximas de los ciclos en comparación se encuentran por arriba de la mayoría de los límites de velocidad en zonas urbanas en México. Las aceleraciones y desaceleraciones medias indican conducciones más agresivas en los ciclos estadounidense y europeo. En lo que concierne a los modos de operación, el ciclo FTP75 logra tener un grado de similitud aceptable, especialmente en los tiempos de ralentí, aceleración y desaceleración, en donde los errores relativos no superan el 20%. Por otra parte, para el NEDC, como era de esperarse por ser un ciclo de conducción modal, los porcentajes del tiempo en cada fase de conducción difieren en gran medida. De manera general, los ciclos FTP75 y NEDC presentan porcentajes

de error promedio de 64% y 90%, exponiendo que estos están alejados de la realidad de las condiciones de operación de la zona de estudio.

4.6. Comparación con otros ciclos internacionales

Para reducir la incertidumbre del comportamiento de los vehículos de carga ligeros en la zona de estudio, el ciclo construido se comparó también, con otros de los ciclos de conducción estandarizados disponibles. Entre ellos están los ciclos estadounidenses *Urban Driving Schedule* (UDDS) y el *New York City Cycle* (NYCC) el cual se caracteriza por condiciones de congestión severa. Se incluye también el ciclo UN/ECE parte uno, de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. El ciclo japonés J 10-15 empleado para la cuantificación de emisiones y consumo de energía en aquel país. Y por último, el *Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle* (WLTC), este ciclo se clasifica para tres distintos tipos de vehículos de acuerdo a su relación potencia – peso (RPP), la clase 1 para vehículos con $RPP \leq 22$ kW/ton, la clase 2 para vehículos con $22 < RPP \leq 34$ kW/ton y la clase 3 corresponde a $RPP > 34$ kW/ton, debido al tipo de vehículos observados en campo, se consideran solo las clases 2 y 3 (Tutuianu *et al.*, 2015); además, las clases del WLTC están divididas en fases de velocidad, puesto que las velocidades dentro de la zona de estudio son consideradas bajas, el CCZMHQ se compara con las fases de velocidad baja de estos dos ciclos.

Tabla 4-9. Comparación con ciclos estandarizados

| Parámetro | CCZMHQ | UDDS | NYCC | UN/ECE | J1015 | WLTC C2 | WLTC C3 |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| v (km/h) | 13.66 | 31.51 | 11.41 | 18.26 | 25.58 | 19.11 | 18.88 |
| v _m (km/h) | 16.43 | 38.85 | 17.57 | 27.11 | 37.97 | 25.92 | 25.32 |
| v _{max} (km/h) | 35.40 | 91.25 | 44.58 | 50.00 | 70.00 | 51.40 | 56.50 |
| a (m/s ²) | 0.434 | 0.599 | 0.717 | 0.642 | 0.525 | 0.388 | 0.565 |
| d (m/s ²) | -0.468 | -0.697 | -0.709 | -0.748 | -0.643 | -0.444 | -0.502 |
| a _{mc} (m/s ²) | 0.544 | 0.746 | 0.912 | 0.661 | 0.575 | 0.443 | 0.671 |
| ECP (m/s ²) | 0.329 | 0.350 | 0.617 | 0.291 | 0.316 | 0.325 | 0.413 |
| P _r | 0.152 | 0.176 | 0.319 | 0.306 | 0.316 | 0.253 | 0.244 |
| P _c | 0.154 | 0.209 | 0.063 | 0.291 | 0.209 | 0.134 | 0.131 |
| P _{mi} | 0.035 | 0.006 | 0.042 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 |
| P _a | 0.339 | 0.326 | 0.277 | 0.214 | 0.261 | 0.329 | 0.290 |

| | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P _d | 0.321 | 0.282 | 0.280 | 0.184 | 0.213 | 0.283 | 0.327 |
| Error relativo promedio | 0.589 | 0.450 | 0.543 | 0.571 | 0.310 | 0.346 | |

Las estadísticas comparativas de los ciclos mencionadas se muestran en la Tabla 4-9. La duración de estos ciclos varía desde los 195 segundos para el UN/ECE hasta los 1,370 segundos para el ciclo LA4. Con base en las estadísticas mostradas de cada ciclo se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

1. De entre los ciclos mostrados, el UDDS es el que muestra una menor aproximación a las características de operación del CCZMHQ, se tienen propiedades similares a las del ciclo FTP7.
2. Las velocidades más parecidas se encuentran en la comparación con el ciclo para la ciudad de New York, sin embargo, este ciclo presenta aceleraciones y desaceleraciones más agresivas, indicando un mayor grado de congestión.
3. Los ciclos UN/ECE y J10-15, dado que son ciclos de conducción modales, presentan comportamientos parecidos, los dos ciclos difieren de gran manera en los porcentajes para cada modo de conducción con respecto al CCZMHQ.
4. La clase 2 del WLTC, es el ciclo de conducción que tiene una mayor aproximación a los comportamientos de manejo que muestra el CCZMHQ, con un porcentaje de error del 31%; las similitudes se presentan particularmente para los indicadores de aceleración positiva y negativa, características importantes en la producción de emisiones contaminantes.
5. Por último, el ciclo del WLTC para vehículos clase 3, tiene características similares a lo observado en la zona de estudio, no obstante, debido a que este ciclo está pensado para vehículos ligeros, presenta un comportamiento de conducción más agresivo en cuanto a sus aceleraciones y desaceleraciones.

La totalidad de los ciclos comparados en esta sección tienen mayor semejanza a los parámetros de operación del ciclo obtenido con esta investigación. La similitud que hay para los ciclos WLTC clase 2 y 3, indican la necesidad de distinguir entre ciclos de conducción para representar a las distintas clases vehiculares, así como para los diferentes sistemas de transporte.

4.7. Simulación de emisiones móviles

En la sección anterior se observaron las diferencias de operación que hay entre los ciclos internacionales adoptados por la NOM – 044 – SEMARNAT – 2017 y el CCZMHQ. Para plasmar estas diferencias en términos de emisiones contaminantes, cuatro ciclos de conducción fueron simulados en el software MOVES; el ciclo desarrollado durante este proyecto, los ciclos establecidos en la normativa mexicana FTP75 y NCEP, y el ciclo de manejo WLTC clase dos, ya que fue el ciclo internacional que mayores similitudes presenta con respecto al CCZMHQ.

4.7.1. Configuración del software MOVES

MOVES tiene la capacidad de estimar emisiones contaminantes a nivel nacional, estatal o de proyecto. Dado que el objetivo de este proyecto fue evaluar las variaciones entre distintos ciclos de conducción, se aplicó la escala de proyecto. Este nivel de simulación permite obtener índices de emisión, es decir masa de contaminantes por unidad de actividad, en este caso g/km. Durante el proceso se simuló la actividad vehicular equivalente a los 37 recorridos obtenidos durante el trabajo de campo.

La adaptación de MOVES al entorno local se logró mediante la integración de las características de una flota vehicular, características meteorológicas de Querétaro, composición del combustible comercializado en México y la inclusión de los patrones de manejo a través de los ciclos de conducción.

La flota simulada se categorizó de acuerdo a la clasificación de MOVES. Se consideraron “camiones comerciales ligeros” (sourceTypeID = 32) que incluyen camionetas de hasta 3.8 toneladas y camiones de carga con peso bruto vehicular mayor a 3.8 ton y menor de 6.3 ton. Por otro lado, las vialidades fueron categorizadas como “urbanas sin restricción de acceso”(roadTypeID = 5), las cuales consideran vialidades locales, secundarias y arterias colectoras.

Respecto a las emisiones contaminantes, durante la simulación se estimaron los gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Además, se evaluaron también otros contaminantes como el óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y el material particulado (PM 2.5 y PM10), ya que se ha comprobado que los vehículos de carga son fuertes contribuyentes a la liberación de este tipo de contaminantes (Dablanc, 2008; Yang *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2016).

4.7.2. Preparación de archivos de entrada

El ajuste a las características de flota vehicular y ambientales en el software fue realizado por medio del *Project Data Manager*, para ello se elaboraron e importaron los siguientes archivos en formato “csv”:

sourceTypeAgeDistribution. En él se especifica la proporción de autos por edad vehicular. Durante el trabajo experimental se observaron vehículos con modelos desde 2004 hasta 2020 (Tabla 4-10).

zoneMonthHour. Se definen datos meteorológicos de temperatura y humedad correspondientes al medio local. Se utilizaron valores de 19.69 C° y 56% de humedad, correspondientes al promedio anual del 2020 de la estación meteorológica “CEA-Área central-IQUETAR6”.

driveScheduleSecondLink. Este documento contiene el ciclo de conducción a replicar durante la simulación.

linkSourceTypeHour. Se indican la proporción de tipo de vehículo que recorre cada vialidad simulada. Dado que sólo se consideran camiones comerciales ligeros, las proporciones son uno para todas las vialidades.

linkData. Se establecen las características de las calles simuladas, incluyendo tipo de vialidad, longitud, volumen vehicular por hora, velocidad media y pendiente para cada uno de las vías consideradas.

fuelFormulation. Describe la composición química de los combustibles comercializados en la ciudad de Querétaro. De acuerdo a la NOM – 016 – CRE – 2016 las características de los petrolíferos son:

- Gasolina: nivel de azufre de 80 ppm, 32% de aromáticos, 12.5% de olefinas, 2% de benceno, 48.1% E200, 81.8% de E300, temperatura de destilación del 50% 190 °C y temperatura máxima de destilación del 90% 225 °C.
- Diésel: nivel de azufre de 500 ppm

AVFTdata: Se indican las proporciones de uso de cada combustible (gasolina y diésel), para cada edad vehicular.

Tabla 4-10. Flota vehicular modelada

| Año modelo | Combustible | Marca | Línea | Tipo de vehículo |
|------------|-------------|--------------|-------------|------------------|
| 2020 | Diésel | Isuzu | Forward 800 | Camión |
| 2019 | Gasolina | Renault | Kangoo | Van |
| 2019 | Gasolina | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2019 | Gasolina | Ram | Promaster | Van |
| 2018 | Diésel | Isuzu | ELF300 | Camión |
| 2018 | Diésel | Isuzu | ELF400 | Camión |
| 2018 | Diésel | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2017 | Diésel | Hino | Hino 300 | Camión |
| 2017 | Gasolina | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2017 | Gasolina | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2017 | Gasolina | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2016 | Diésel | Hino | Hino 300 | Camión |
| 2016 | Diésel | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2016 | Diésel | Isuzu | ELF300 | Camión |
| 2016 | Diésel | Hino | Hino 300 | Camión |
| 2015 | Diésel | Isuzu | ELF300 | Camión |
| 2014 | Gasolina | Renault | Kangoo | Van |
| 2013 | Diésel | Isuzu | ELF200 | Camión |
| 2012 | Diésel | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2012 | Diésel | Freightliner | FL360 | Camión |
| 2012 | Diésel | Freightliner | FL360 | Camión |
| 2012 | Gasolina | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2011 | Diésel | Hino | Hino 300 | Camión |
| 2011 | Diésel | Nissan | NP300 | Pickup |

| | | | | |
|------|----------|------------|-------------|--------|
| 2010 | Diésel | Isuzu | ELF300 | Camión |
| 2010 | Diésel | Volkswagen | Transporter | Van |
| 2009 | Diésel | | | Pickup |
| 2008 | Diésel | Isuzu | ELF300 | Camión |
| 2008 | Diésel | | | Camión |
| 2008 | Gasolina | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2008 | Gasolina | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2007 | Diésel | Nissan | Frontier | Pickup |
| 2007 | Diésel | Ford | Ranger | Pickup |
| 2007 | Diésel | | | Camión |
| 2006 | Gasolina | Volkswagen | Eurovan | Van |
| 2006 | Diésel | Nissan | NP300 | Pickup |
| 2004 | Diésel | Mercedes | Sprinter | Van |

Nota: Los registros con datos faltantes no presentaron información en el REPUVE.

4.7.3. Estimación de emisiones

Gases reactivos

Aun cuando este tipo de gases no contribuyen de manera directa al calentamiento global, lo hacen de forma indirecta, potenciando la formación de GEI como el ozono. Los factores de emisión límite de estos gases están plasmados en la NOM – 044 – SEMARNAT – 2017, siendo un máximo de 0.74 g/km para el CO y 0.125 g/km para NOx

Los factores de emisión estimados para los vehículos de diésel, en CO y NOx se muestran en la Figura 4-9. Los resultados muestran que, con la flota vehicular considerada, se superan los valores límite para todos los ciclos de conducción modelados. En particular, con el ciclo desarrollado en la investigación, los límites se ven rebasados en un 142% y 1332% para el CO y NOx, respectivamente. Por otro lado, resulta evidente que, la adopción de los ciclos internacionales produce una subestimación de las potenciales emisiones de los vehículos evaluados, considerando el NCEP la subestimación sería de aproximadamente el 22%, en el caso del ciclo FTP75 las emisiones estimadas son alrededor de 48% menores que para el ciclo de conducción local.

Las diferencias de emisiones simuladas entre cada ciclo están relacionadas con los patrones de operación que contienen los ciclos de conducción. Tong (2000) encontró que velocidades bajas y los estados de aceleración y desaceleración potencializan la producción de emisiones

contaminantes. En relación a las bajas velocidades, de los ciclos comparados el correspondiente a la ZMHQ, presenta velocidades promedio por debajo de los 20 km/h, incluso considerando solo los periodos con velocidades mayor a cero, mientras que los ciclos legislativos aplicados en México tienen medias de velocidad mayores a los 30 km/h. En lo que refiere a las aceleraciones y deceleraciones, las diferencias son notorias, principalmente en el número de cambios entre un estado y otro. Por un lado, los ciclos ZMHQ y WLTC C2, contienen variaciones abruptas de aceleración positivas y negativas; de manera paralela, contienen un número importante de transiciones de aceleración a desaceleración y viceversa. Por otro lado, el NCEP tiene la particularidad de ser un ciclo “artificial”, por lo que está formado por aceleraciones y deceleraciones agresivas, constantes y con una duración prolongada. Por último, el ciclo FTP75 contiene una menor cantidad de transiciones de estado y sus períodos de aceleración y desaceleración son más largos. Lo anterior confirma lo mostrado en la Figura 4-9, en donde el ciclo para la ZMHQ tiene los mayores factores de emisión y el FTP75 los menores.

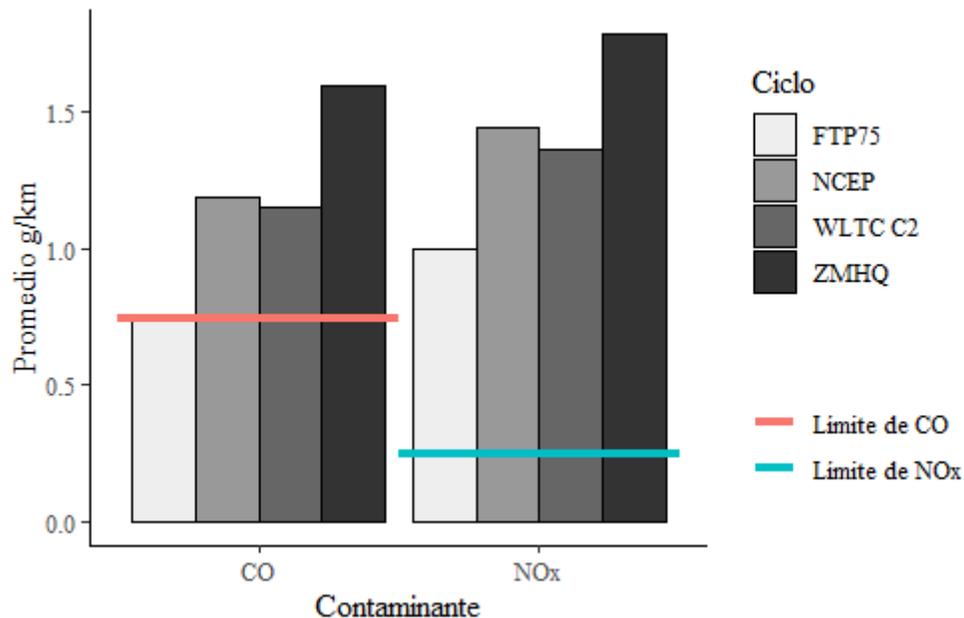


Figura 4-10. Factores de emisión obtenidos para CO y NOx

Material Particulado

En términos de salud humana, el material particulado es uno de los contaminantes más peligrosos, ya que puede llegar hasta regiones sensibles del sistema respiratorio. En la Tabla

4-11 se muestran los resultados obtenidos en la simulación. Al igual que para los gases reactivos, los mayores factores de emisión corresponden al ciclo desarrollado en este proyecto y los menores para el ciclo americano. Los valores de emisión para cada contaminante son similares entre sí, siendo 8.7% mayor en promedio los factores de emisión para las partículas menores a 10 micras. Respecto a los factores por tipo de combustible, los correspondientes a vehículos de gasolina, representarían apenas el 1% de del material particulado producido.

Tabla 4-11. Factores de emisión para PM10 y PM2.5

| Contaminante | Ciclo | Combustible | |
|--------------|-------|-------------|----------|
| | | Diésel | Gasolina |
| PM10 | ZMHQ | 0.1803 | 0.0014 |
| | FTP75 | 0.0967 | 0.0013 |
| | NCEP | 0.1520 | 0.0011 |
| | WLTC | 0.1390 | 0.0011 |
| PM2.5 | ZMHQ | 0.1659 | 0.0013 |
| | FTP75 | 0.0890 | 0.0011 |
| | NCEP | 0.1398 | 0.0010 |
| | WLTC | 0.1279 | 0.0010 |

De acuerdo a los resultados logrados por Holguín et al. (2018), los factores de emisión para la zona de estudio estarían por encima de los correspondientes a ciudades como Nueva York y Sao Pablo, y por debajo de los obtenidos para la ciudad de Bogotá.

Gases de efecto invernadero

Los GEI son los principales causantes del cambio climático. A través de MOVES y con la información recabada durante el trabajo de campo, se estimaron los factores de emisión para CO₂, CH₄ y N₂O (Tabla 4-12). Adicionalmente, en la tabla se muestran valores para dióxido de carbono equivalente, el cual representa en términos de CO₂ la suma de los tres contaminantes y es calculado considerando el potencial de calentamiento global de cada uno.

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

En general, dentro de todos los contaminantes modelados, existe una tendencia de superioridad por parte de los factores de emisión correspondientes al diésel. Las razones de lo anterior, serían 1) la composición de los combustibles y 2) la edad vehicular de la flota simulada, ya que, en el caso de los vehículos a gasolina, más del 50% de los vehículos observados tienen tres años o menos de antigüedad.

Tabla 4-12. Factores de emisión para GEI.

| Combustible | Gasolina | | | | Diesel | | | |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|
| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ -e | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ -e |
| g/km | 452.08 | 0.0221 | 0.0067 | 454.64 | 600.83 | 0.0391 | 0.0053 | 603.39 |
| ton-año | 10.79 | 0.0005 | 0.0002 | 10.85 | 14.34 | 0.0009 | 0.0001 | 14.40 |

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

Fuente: Elaboración propia.

En el entorno del cambio climático, el Gobierno de México se ha propuesto reducir en 22% los GEI durante el periodo 2020 – 2030. Del total de emisiones de GEI el 26% del total es producido por el sector transporte (GM, 2015). Por lo anterior, el desarrollo de políticas públicas para la minimización de las emisiones móviles es primordial, en particular estrategias orientadas al transporte de carga.

4.7.4. Escenarios de mitigación

Como parte de los compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático, México estableció cinco metas de reducción de emisiones contaminantes para el sector transporte para el periodo 2020 – 2030 (GM, 2015), 1) regular la normatividad ambiental para vehículos nuevos y en circulación; 2) abastecer de gasolinas y diésel de ultra bajo azufre; 3) incrementar la flota vehicular a gas natural y disponer de combustibles limpios; 4) modernizar el parque vehicular en el país; y 5) impulsar el transporte multimodal de carga y pasajeros.

Renovación de flotas vehiculares

México cuenta con el programa de financiamiento de autotransporte SCT – NAFIN, cuyo objetivo es promover la modernización del parque vehicular federal de carga y pasaje. Otorgando financiamientos a quienes adquieran vehículos nuevos o seminuevos con no más de seis años de antigüedad.

Trasladando este programa al ámbito del transporte urbano de carga, en la Figura 4-10 se muestran los factores de emisión promedio para CO y NOx, en vehículos con edades vehiculares desde 0 a 10 años. Según los resultados obtenidos, la renovación de un vehículo, podría implicar que en promedio se reduzcan sus emisiones de CO en alrededor del 36% y del 71% para gases NOx. Con ello los factores de emisión quedarían cerca de los límites establecidos por la normativa mexicana para este tipo de gases vistos en la sección anterior, incluso quedando por debajo de ellos en el caso del CO.

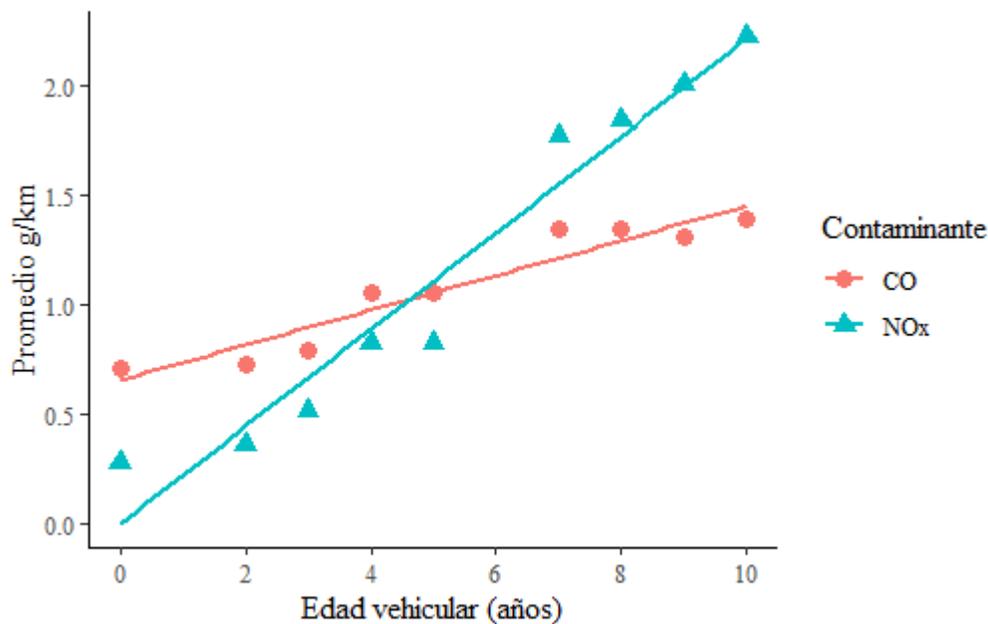


Figura 4-11. Factor de emisión promedio por edad vehicular para CO y NOx.

Nota: El año base de simulación fue el 2020

Referente a los GEI, un vehículo con edad vehicular mayor a seis años tiene un índice de emisión promedio de 604 g/km. Por otro lado, uno con menos de seis años de antigüedad presenta un factor de emisión de aproximadamente 470 g/km. Esto representa una reducción del 22%, alrededor de 3.20 toneladas de CO₂e al año por vehículo.

Diésel de ultra bajo azufre

De acuerdo a Yang *et al.* (2015) y Singh *et al.* (2016), los vehículos de distribución pueden generar más del 35% de contaminantes como PM y NOx, dentro de las zonas urbanas. Dentro

de la composición química del diésel, el contenido de azufre se ve reflejado en la producción de emisiones. Aunque para contaminantes como HC, CO y NOx, el impacto es bajo, la proporción de azufre tiene un papel importante en la emisión de partículas materiales (Xie *et al.*, 2020).

La Comisión Reguladora de Energía a través de la norma NOM – 016 – CRE – 2016, indica los valores máximos de contenido de azufre en partes por millón (ppm) para el diésel comercializado en México. Esta norma establece que, para las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara, Monterrey y la zona fronteriza norte el diésel deberá contar con un máximo de 15 ppm de azufre. No obstante, para el resto del país este límite asciende a 500 ppm.

Reducir el contenido de azufre en el diésel pudiera tener reducciones sustanciales en la producción de material particulado. Aplicando este escenario de reajuste del contenido de azufre en el diésel, a la flota vehicular y recorridos empleados durante esta investigación, se tienen reducciones del 92.6% para PM2.5 y PM10 (Tabla 4-13). Lo anterior traería beneficios a la sociedad, ya que está comprobado que la exposición ante este tipo de contaminantes está relacionada con enfermedades como la diabetes, cáncer de pulmón y problemas cardiovasculares y respiratorios.

Tabla 4-13. Comparación factores de emisión para distintos contenidos de azufre en el diésel.

| Contaminante | FE Diésel (g/km) | FE Diésel bajo en azufre (g/km) |
|--------------|------------------|---------------------------------|
| PM10 | 0.1329 | 0.0098 |
| PM2.5 | 0.1223 | 0.0090 |

Gas Natural

MOVES en sus versiones actuales no permite la modelación de emisiones de vehículos de carga que utilicen gas natural como combustible, por lo que el análisis con los datos de campo no fue posible. No obstante, está comprobado que la utilización del gas natural en los vehículos de carga implica beneficios tanto ambientales como económicos. Desde el punto de vista ambiental, la ampliación de este combustible pudiese significar una reducción de alrededor del 20% de las emisiones producidas en comparación con otros combustibles fósiles (Hagos y Ahlgren, 2018; McJeon *et al.*, 2014); además, este combustible cuenta con

un alto octanaje de manera natural, por lo que no es necesaria la aplicación de aditivos, los cuales suelen ser tóxicos (Hosseini et al., 2018). En materia económica, Ozbilen et al. (2018) sostienen que el gas natural tiene una significativa relación costo/beneficio, por lo que las empresas de reparto pueden utilizar este combustible para reducir de manera considerable su costo por kilómetro.

En México, la utilización del gas natural ha sido tema de investigación por instituciones como el Centro Mario Molina, quienes promueven la transición al gas natural para el transporte público y de carga, con el objetivo de disminuir la liberación de NOx, PM2.5 y compuestos volátiles orgánicos (CMM, 2019).

Conclusiones

En esta investigación se desarrolló un ciclo de conducción representativo de los vehículos urbanos de carga en la Zona de Monumentos Históricos de Querétaro, con el fin de conocer las condiciones de operación, en una zona congestionada típica del país, y así, contrastarlas con las características de operación reflejadas por los ciclos de manejo utilizados en México para la certificación de emisiones vehiculares.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los ciclos internacionales FTP75 y el NEDC carecen de representatividad con respecto de las condiciones de conducción observadas en el CCZMHQ. Al realizar la comparación, se encontraron velocidades notablemente mayores para los ciclos de conducción legislativos aplicados en México, mostrando que estos tendrían una mejor empleabilidad en zonas o ciudades con vías rápidas, en donde los límites de velocidad son mayores o son menores los niveles de congestionamiento vial. De manera similar, se tienen aceleraciones significativamente superiores para los ciclos internacionales, cabe destacar que sus valores de aceleración indican una marcada orientación a los vehículos de pasajeros, ya que sus relaciones de peso/potencia permiten acelerar de manera agresiva con mayor facilidad. Con esto se demuestra que la adopción utilización de estos ciclos internacionales no constituye una opción representativa de los comportamientos vehiculares en la zona de estudio y posiblemente en otras zonas o ciudades el país, validando así, la hipótesis de esta investigación.

La comparación con otros ciclos internacionales reveló que existen ciclos que se asemejan de mejor manera a las características de manejo de los vehículos de carga urbano en la zona de estudio. La proximidad en los parámetros de operación resultante para el ciclo WLTC clase 2, con respecto a las características del CCZMHQ, obedece principalmente a dos factores: 1) la desagregación de clases vehiculares y fases de conducción, y 2) al ser un ciclo de manejo con apenas cinco años de antigüedad, reflejan patrones de operación actuales, ya que estos pueden cambiar a través de los años debido al crecimiento urbano, innovaciones en tecnología vehicular y el crecimiento de las flotas vehiculares.

En relación a las emisiones simuladas, se notaron también los eventuales problemas al adoptar ciclos de conducción internacionales. Los resultados permiten observar una subestimación de alrededor del 22% aplicando el NCEP y 48% con el FTP75, con respecto a los resultados obtenidos para el ciclo de conducción de la zona de estudio. Esto lleva a conflictos en la formulación de políticas públicas para la reducción de emisiones móviles, ya que, desde la raíz del desarrollo de la estrategia se consideran mediciones imprecisas, orientando a establecer una solución menor que la realmente necesaria. Cabe mencionar que esta situación además de obstruir la lucha contra el cambio climático en el país, puede representar un problema de salud pública en el largo plazo, exponiendo a la población a concentraciones de PM2.5 y PM10 mayores a las proyectadas.

Los resultados de la investigación pueden fungir como un llamado a instituciones la SEMARNAT, el INECC y otras instituciones reguladoras, a poner especial atención a dos de los temas principales de este proyecto. Primero, la necesidad de un ciclo de conducción que sea representativo de la movilidad urbana en las ciudades mexicanas, tanto del transporte de personas como de mercancías; para con ello lograr inventarios de emisiones con un mayor grado de precisión que permitan elaborar planes de acción efectivos para los problemas de calidad del aire en el país. Como segundo punto, evaluar las potenciales áreas de oportunidad existentes para aminorar las externalidades ocasionadas por el transporte urbano de carga, desde medidas legales como los estándares de emisión hasta estrategias técnicas como la gestión del tráfico; para ello ya existen herramientas como RATUC V2.0 (Betanzo, 2017), que permiten realizar un diagnóstico de la situación actual e identificar las posibles propuestas de solución.

Como línea de investigación futura se propone llevar el proyecto a una escala mayor, como podría ser una ciudad. Con ello se generaría un mejor panorama del comportamiento de los vehículos urbanos de carga en el entorno de las ciudades mexicanas. Para esto, lo ideal sería construir una base de datos de actividad vehicular robusta, para lo cual debe ser considerada la aplicación un proceso adquisición de datos híbrido, en donde se utilice la técnica de seguimiento de vehículo en conjunto con la metodología del vehículo instrumentado, teniendo en cuenta las dificultades existentes para lograr la participación de la iniciativa privada, así como la intervención de sindicatos de trabajadores que pudieran obstaculizar el

proceso de obtención de datos. Además, dado que, se ha demostrado que la construcción de ciclos de conducción necesita de una desagregación de sistemas de transporte, así como de clases vehiculares, es importante considerar características mecánicas de los vehículos, de manera similar a lo realizado por Tutuianu *et al.*, (2015) para el desarrollo del ciclo WLTC o Abas *et al.*, (2018) para la construcción de un ciclo local en Malasia.

Referencias

- Abas, M. A., Rajoo, S., & Zainal Abidin, S. F. (2018). Development of Malaysian urban drive cycle using vehicle and engine parameters. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 388–403. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.05.015>
- Allen, J., Thorne, G., & Browne, M. (2007). Good practice guide on urban freight transport. *Bestufs Administration Centre*, 84. Retrieved from www.bestufs.net
- Amirjamshidi, G. (2015). Assessment of Commercial Vehicle Emissions and Vehicle Routing of Fleets using Simulated Driving Cycles. *ProQuest Dissertations and Theses*, 193. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/1710111864?accountid=188395>
- Amirjamshidi, G., & Roorda, M. J. (2015). Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.11.010>
- Arun, N. H., Mahesh, S., Ramadurai, G., & Shiva Nagendra, S. M. (2017). Development of driving cycles for passenger cars and motorcycles in Chennai, India. *Sustainable Cities and Society*, 32, 508–512. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.001>
- Austin, T. C., DiGenova, F. J., Carlson, T. R., Joy, R. W., Gianolini, K. A., & Lee, J. M. (1993). Characterization of Driving Patterns and Emissions from Light-Duty Vehicles in California. *California Environmental Protection Agency*, p. null.
- Bai, Y., & Bai, Q. (2014). Subsea Pipeline Integrity and Risk Management. In *Environmental Impact Assessment*.
- Ballantyne, E. E. F., Lindholm, M., & Whiteing, A. (2013). A comparative study of urban freight transport planning: Addressing stakeholder needs. *Journal of Transport Geography*, 32, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.08.013>
- Betanzo, E. (2017). *De la logística urbana a las políticas en materia ambiental*. Santiago de Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Betanzo Quezada, E. (2015). Perspectivas del crecimiento urbano, la actividad comercial minorista y el transporte de bienes en la Zona Metropolitana de Querétaro (México). *CIENCIA Ergo-Sum*, 22(1), 63–74.
- Bishop, J. D. K., Axon, C. J., & McCulloch, M. D. (2012). A robust, data-driven methodology for real-world driving cycle development. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(5), 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.003>
- Browne, M., Allen, J., Nemoto, T., Patier, D., & Visser, J. (2012). Reducing Social and Environmental Impacts of Urban Freight Transport: A Review of Some Major Cities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.088>

- Chindamo, D., & Gadola, M. (2018). What is the Most Representative Standard Driving Cycle to Estimate Diesel Emissions of a Light Commercial Vehicle? *IFAC-PapersOnLine*, 51(5), 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.213>
- Choudhary, A., & Gokhale, S. (2018). SC. *Atmospheric Pollution Research*. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.008>
- CONAPO. (2018). La situación demográfica de México. In *Conapo* (Vol. 53).
- Coulombel, N., Dablanç, L., Gardrat, M., & Koning, M. (2018). The environmental social cost of urban road freight: Evidence from the Paris region. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 514–532. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.002>
- Czégé, L., Vámosi, A., & Kocsis, I. (2020). Review on Construction Procedures of Driving Cycles. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 5(2), 266–285. <https://doi.org/10.21791/ijems.2020.2.31>.
- Dablanç, L. (2008). Urban goods movement and air quality policy and regulation issues in European Cities. *Journal of Environmental Law*, 20(2), 245–266. <https://doi.org/10.1093/jel/eqn005>
- Dablanç, L., Giuliano, G., Holliday, K., & O'Brien, T. (2013). Best practices in urban freight management. *Transportation Research Record*, (2379), 29–38. <https://doi.org/10.3141/2379-04>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(5), 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.01.011>
- Duran, A., & Earleywine, M. (2012). GPS data filtration method for drive cycle analysis applications. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0743>
- Farzaneh, M., Zietsman, J., Lee, D.-W., Johnson, J., Wood, N., Ramani, T., & Gu, C. (2014). *TEXAS-SPECIFIC DRIVE CYCLES AND IDLE EMISSIONS RATES FOR USING WITH EPA'S MOVES MODEL-FINAL REPORT 5. Report Date 13. Type of Report and Period Covered Project performed in cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Ad.* 7(2).
- Galgamuwa, U., Perera, L., & Bandara, S. (2015). Developing a General Methodology for Driving Cycle Construction: Comparison of Various Established Driving Cycles in the World to Propose a General Approach. *Journal of Transportation Technologies*, 05(04), 191–203. <https://doi.org/10.4236/jtts.2015.54018>
- Hagos, D. A., & Ahlgren, E. O. (2018). Well-to-wheel assessment of natural gas vehicles and their fuel supply infrastructures – Perspectives on gas in transport in Denmark. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65(August), 14–35. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.07.018>
- Hammond, W., Axsen, J., & Kjeang, E. (2019). How to slash greenhouse gas emissions in the freight sector : Policy insights from a technology-adoption model of Canada. *Energy*

- Policy*, (June), 111093. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111093>
- Hickman, J. (1999). *Methodology for Calculating Transport Emissions*. Berkshire: TRL.
- Holguín-Veras, J., Encarnación, T., González-Calderón, C. A., Winebrake, J., Wang, C., Kyle, S., ... Garrido, R. (2018). Direct impacts of off-hour deliveries on urban freight emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 84–103. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.013>
- Holguín-Veras, J., Sánchez-Díaz, I., & Browne, M. (2016). Sustainable Urban Freight Systems and Freight Demand Management. *Transportation Research Procedia*, 12(June 2015), 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.024>
- Hosseini, M., Dincer, I., & Ozbilen, A. (2018). Expert Opinions on Natural Gas Vehicles Research Needs for Energy Policy Development. In *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00041-X>
- Huertas, J. I., Díaz, J., Cordero, D., & Cedillo, K. (2018). A new methodology to determine typical driving cycles for the design of vehicles power trains. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 12(1), 319–326. <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0379-y>
- Hung, W. T., Tong, H. Y., Lee, C. P., Ha, K., & Pao, L. Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(2), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.01.002>
- Hurtado Diaz, M. (2015). *La Salud Ambiental en México*. Instituto Nacional de Salud Pública.
- IMPLAN. (2011). *Plan de manejo y conservación de la zona de monumentos históricos de Santiago de Querétaro*. Querétaro, México.
- INEGI. (2010). Población rural y urbana. Retrieved October 19, 2020, from http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P#:~:text=De acuerdo con el INEGI,más de 2 500 personas.&text=El porcentaje de personas que habitan en comunidades rurales ha disminuido.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Querétaro 2017*. Retrieved from https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/QRO_ANUARIO_PDF.pdf
- INEGI. (2020). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Retrieved April 10, 2020, from DENUE website: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>
- INSP. (2017). Estimación de impactos en salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de control. In *NECC* (Vol. 1). Cd. México, México.
- IPCC. (2014). Summary for policymakers. In *The Fifth Assessment Report of IPCC*. (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>
- ISSRC. (2008). *IVE Model Users Manual*.

- ITF. (2019). Disruptions in freight transport. Retrieved June 15, 2020, from https://www.oecd-ilibrary.org/sites/transp_outlook-en-2019-en/1/2/5/index.html?itemId=/content/publication/transp_outlook-en-2019-en&_csp_=1b3375008054c148f41fef71cd42b552&itemIGO=oecd&itemContentType=book
- Jiménez-Palacios, J. L. (1999). Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge*, (1993), 361. [https://doi.org/10.1016/S0006-291X\(02\)00320-0](https://doi.org/10.1016/S0006-291X(02)00320-0) [pii]
- Jolliffe, I. T. (2002). Principal Component Analysis, Second Edition. *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*, 30(3), 487. <https://doi.org/10.2307/1270093>
- Kabacoff, R. I. (2011). Advanced Methods for missing data. In *R IN ACTION: Data analysis and graphics with R*. Retrieved from <http://m.friendfeed-media.com/36d8ab666d485a984e441fd9d0f606c8c8553061>
- Kinnear, S., Rose, A., & Rolfe, J. (2015). Emissions Reporting in the Australian Road Freight Transport Sector: Is There a Better Method than the Default Option? *International Journal of Sustainable Transportation*, 9(2), 93–102. <https://doi.org/10.1080/15568318.2012.738777>
- Knez, M., Muneer, T., Jereb, B., & Cullinane, K. (2014). The estimation of a driving cycle for Celje and a comparison to other European cities. *Sustainable Cities and Society*, 11, 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.11.010>
- Krecl, P., Cipoli, Y. A., Targino, A. C., Castro, L. B., Gidhagen, L., Malucelli, F., & Wolf, A. (2020). Cyclists' exposure to air pollution under different traffic management strategies. *Science of the Total Environment*, 723, 138043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138043>
- Kruse, R. E., & Huls, T. A. (1973). Development of the federal urban driving schedule. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/730553>
- Liu, H., Chen, X., Wang, Y., & Han, S. (2013). Vehicle emission and near-road air quality modeling for shanghai, China. *Transportation Research Record*, (2340), 38–48. <https://doi.org/10.3141/2340-05>
- Liu, H., Xu, Y. (Ann), Rodgers, M. O., & Guensler, R. (2015). Developing Vehicle Classification Inputs for Project-Level MOVES Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2503(1), 81–90. <https://doi.org/10.3141/2503-09>
- Mahesh, S., & Ramadurai, G. (2017). Analysis of driving characteristics and estimation of pollutant emissions from intra-city buses. *Transportation Research Procedia*, 27, 1211–1218. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.071>
- Mahesh, S., Ramadurai, G., & Nagendra, S. M. S. (2019). On-board measurement of emissions from freight trucks in urban arterials: Effect of operating conditions, emission

- standards, and truck size. *Atmospheric Environment*, 212(May), 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.030>
- Malik, L., Tiwari, G., Thakur, S., & Kumar, A. (2019). Assessment of freight vehicle characteristics and impact of future policy interventions on their emissions in Delhi. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67(January), 610–627. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.007>
- Mathew, T. V, & Velaga, N. R. (2019). Transportation Research: Proceedings of CTRG 2017. In *Springer Nature* (Vol. 45). <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9042-6>
- Matsunaga, M. (2010). How to Factor-Analyze Your data Right. *International Journal of Psychological Research*, 3(1), 97–110. Retrieved from <https://www.ders.es/Dialnet-HowToFactoranalyzeYourDataRight-3296455.pdf>
- McJeon, H., Edmonds, J., Bauer, N., Clarke, L., Fisher, B., Flannery, B. P., ... Tavoni, M. (2014). Limited impact on decadal-scale climate change from increased use of natural gas. *Nature*, 514(7253), 482–485. <https://doi.org/10.1038/nature13837>
- Merritt, A. S., Georgellis, A., Andersson, N., Bero Bedada, G., Bellander, T., & Johansson, C. (2019). Personal exposure to black carbon in Stockholm, using different intra-urban transport modes. *Science of the Total Environment*, 674, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.100>
- Morey, J., Limanond, T., & Niemeier, D. (2000). Validity of Chase Car Data Used in Developing Emissions Cycles. *Journal of Transportation and Statistics*, 3(2), 15–28.
- Muñoz-villamizar, A., Santos, J., & Montoya-torres, J. (2020). Measuring environmental performance of urban freight transport systems : A case study. *Sustainable Cities and Society*, 52(September 2019), 101844. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101844>
- Nouri, P., & Morency, C. (2017). Evaluating microtrip definitions for developing driving cycles. *Transportation Research Record*, 2627, 86–92. <https://doi.org/10.3141/2627-10>
- OMS. (2018). *Contaminación atmosférica y salud infantil*. Retrieved from <http://www.who.int/archives/inf-pr-1997/en/pr97-47.html>
- Ozbilen, A., Dincer, I., & Hosseini, M. (2018). Comparative Life Cycle Environmental Impact Assessment of Natural Gas and Conventional Vehicles. In *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00052-4>
- Peng, Y., Zhuang, Y., & Yang, Y. (2019). A driving cycle construction methodology combining k-means clustering and Markov model for urban mixed roads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. <https://doi.org/10.1177/0954407019848873>
- Perugu, H. (2019). Emission modelling of light-duty vehicles in India using the revamped VSP-based MOVES model: The case study of Hyderabad. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 68(January), 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.031>

- Quezada, E. B. (2011). Una aproximación metodológica al estudio integrado del transporte urbano de carga: El caso de la Zona Metropolitana de Querétaro en México. *Eure*, 37(112), 63–87. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612011000300004>
- Requia, W. J., Higgins, C. D., Adams, M. D., Mohamed, M., & Koutrakis, P. (2018). The health impacts of weekday traffic: A health risk assessment of PM_{2.5} emissions during congested periods. *Environment International*, 111(November 2017), 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.11.025>
- Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). The geography of transport systems. *The Geography of Transport Systems*, 1–440. <https://doi.org/10.4324/9781315618159>
- Romero, C. A., Mejía, L. A., & Acosta, R. (2017). Registro de información en motores de automóviles y desarrollo de un ciclo de conducción piloto para la ciudad de Pereira usando herramientas de diagnóstico de bajo costo. *Ingeniería Y Competitividad*, 19(2), 11–24. <https://doi.org/10.25100/iyc.v19i2.5287>
- Schifter, I., Díaz, L., Rodríguez, R., & López-Salinas, E. (2005). A driving cycle for vehicle emissions estimation in the metropolitan area of Mexico City. *Environmental Technology*, 26(2), 145–154. <https://doi.org/10.1080/09593332608618578>
- Seers, P., Nachin, G., & Glaus, M. (2015). Development of two driving cycles for utility vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.013>
- SEGOB. (2018). NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017. Retrieved October 28, 2019, from Diario Oficial de la Federación website: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018
- Shi, Q., Zheng, Y. B., Wang, R. S., & Li, Y. W. (2011). The study of a new method of driving cycles construction. *Procedia Engineering*, 16, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1055>
- Sigua, R. (1997). Development of a driving cycle for Metro Manila. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportations Studies*, 2(6).
- Singh, D., Shukla, S. P., Sharma, M., Behera, S. N., Mohan, D., Singh, N. B., & Pandey, G. (2016). GIS-based on-road vehicular emission inventory for Lucknow, India. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 20(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000244)
- Stelling, P. (2014). Research in Transportation Business & Management Policy instruments for reducing CO₂ -emissions from the Swedish freight transport sector. *RTBM*, 12, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.08.004>
- Sun, D. (Jian), Zhang, Y., Xue, R., & Zhang, Y. (2017). Modeling carbon emissions from urban traffic system using mobile monitoring. *Science of the Total Environment*, 599–600, 944–951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.186>
- Talebian, H., Herrera, O. E., Tran, M., & Mérida, W. (2018). Electrification of road freight transport: Policy implications in British Columbia. *Energy Policy*, 115(September

- 2017), 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.004>
- Taniguchi, E. (2014). Concepts of City Logistics for Sustainable and Liveable Cities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 151, 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.029>
- Tavasszy, L. A. (2019). Predicting the effects of logistics innovations on freight systems : Directions for research. *Transport Policy*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.11.004>
- Tong, H. Y. (2019). Development of a driving cycle for a supercapacitor electric bus route in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, 48(February), 101588. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101588>
- Tong, H. Y., & Hung, W. T. (2010). A framework for developing driving cycles with on-road driving data. *Transport Reviews*, 30(5), 589–615. <https://doi.org/10.1080/01441640903286134>
- Tutuianu, M., Bonnel, P., Ciuffo, B., Haniu, T., Ichikawa, N., Marotta, A., ... Steven, H. (2015). Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.011>
- Ugarte, G. M., Golden, J. S., & Dooley, K. J. (2016). Lean versus green: The impact of lean logistics on greenhouse gas emissions in consumer goods supply chains. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 22(2), 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2015.09.002>
- Wessler, J., & Smart, R. (2014). Assessing Environmental impacts. *Socio-Economic Considerations in Biotechnology Regulation*, 81–95. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9440-9_6
- Xie, Y., Posada, F., & Minjares, R. (2020). Diesel sulfur content impacts on Euro VI soot-free vehicles: Considerations for emerging markets. *International Council on Clean Transportation*, (April), 1–15. Retrieved from <https://theicct.org/publications/diesel-sulfur-content-soot-free-emerging-markets#:~:text=As the major vehicle markets,known as ultralow-sulfur diesel.>
- Yang, X. F., Liu, H., Man, H. Y., & He, K. B. (2015). Characterization of road freight transportation and its impact on the national emission inventory in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(4), 2105–2118. <https://doi.org/10.5194/acp-15-2105-2015>
- Yang, Y., Li, T., Zhang, T., & Yu, Q. (2020). Time dimension analysis: Comparison of Nanjing local driving cycles in 2009 and 2017. *Sustainable Cities and Society*, 53(November 2019), 101949. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101949>
- Yao, Z., Wei, H., Perugu, H., Liu, H., & Li, Z. (2014). Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(2), 81–96.

[https://doi.org/10.1016/S2095-7564\(15\)30092-1](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30092-1)

- Yuhui, P., Yuan, Z., & Huibao, Y. (2019). Development of a representative driving cycle for urban buses based on the K-means cluster method. *Cluster Computing*, 22, 6871–6880. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1673-y>
- Zhang, X., Zhao, D. J., & Shen, J. M. (2011). A synthesis of methodologies and practices for developing driving cycles. *Energy Procedia*, 16(PART C), 1868–1873. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.286>
- Zhao, X., Zhao, X., Yu, Q., Ye, Y., & Yu, M. (2020). Development of a representative urban driving cycle construction methodology for electric vehicles: A case study in Xi'an. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 81, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102279>
- Zulvia, F. E., Kuo, R. J., & Nugroho, D. Y. (2020). A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle routing problem with time windows and time dependency for perishable products. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118428. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118428>

Anexos

ANEXO A: Código desarrollado en Python para la segmentación de la base de datos en micro-viajes.

```
import pandas as pd, math, numpy as np

data_base = pd.read_csv('data_base.csv') #Acceso a base de datos
vel_cero = data_base[data_base['vms']== 0]
sec = vel_cero['seg'].tolist().copy() #Lista de segundo en velocidades 0
idx = vel_cero.index[vel_cero['vms']==0].tolist().copy() #Lista de índices en velocidades 0
for i in idx: #Union en una lista segundos e índices cuando v=0
    sec.append(i)
seg_mt = []
for i,s in enumerate(sec[:3779]): #Bucle para obtener las filas en las que inicia y terminan
los micro viajes, además de sus índices
    if s == 0 or ((s)+9 < sec[i+1]) or (sec[i+1] == 0):
        seg_mt.append([s,sec[i+3779]])
pares = []
for i,s in enumerate(seg_mt[:-1]): #Crea los rangos de cada microviaje de acuerdo a sus
índices de la base de datos
    if (seg_mt[i+1][0]) > 0: #para que el microtrip termine en el fin del recorrido
        pares.append([seg_mt[i][1], seg_mt[i+1][1]])
micro_trips = []
for par in pares:
    n_mt = data_base[par[0]:(par[1]+1)]
    co_nmt = n_mt.copy()
    co_nmt.loc[co_nmt['ams2'] > 0, 'sum_dist'] = co_nmt['dist2']
    sum_dis = co_nmt['sum_dist'].sum()
    duracion = par[1]-par[0]
    vell = n_mt['vkh'].mean()
    if sum_dis > 0 and (duracion>=10) and vell > 1:
        micro_trips.append(n_mt) # Lista con database en micro-viajes
```

ANEXO B: Código desarrollado en Python para la aplicación de la Cadena de Markov

```
def mt_x_re():
    data_base = pd.read_csv('data_base.csv') #Acceso a base de datos
    vel_cero = data_base[data_base['vms']== 0]
    sec = vel_cero['seg'].tolist().copy() #Lista de segundo en velocidades 0
    idx = vel_cero.index[vel_cero['vms']==0].tolist().copy() #Lista de índices en
    velocidades 0
    for i in idx: #Union en una lista segundos e índices cuando v=0
        sec.append(i)
    seg_mt = []
    for i,s in enumerate(sec[:3779]): #Bucle para obtener las filas en las que inicia y
    terminan los micro viajes, además de sus índices
        if s == 0 or ((s)+9 < sec[i+1]) or (sec[i+1] == 0):
            seg_mt.append([s,sec[i+3779]])
    pares = []
    pares_s = []
    for i,s in enumerate(seg_mt[:-1]): #Crea los rangos de cada microviaje de acuerdo a
    sus índices de la base de datos
        if (seg_mt[i+1][0]) > 0: #para que el microtermine en el fin del recorrido
            pares.append([seg_mt[i][1], seg_mt[i+1][1]])
            pares_s.append([seg_mt[i][0], seg_mt[i+1][0]])
    mvxs = []
    for ind,par in enumerate(pares):
        n_mt = data_base[par[0]:(par[1]+1)]
        del n_mt['Unnamed: 0']
        del n_mt['Unnamed: 0.1']
        co_nmt = n_mt.copy()
        #co_nmt.loc[co_nmt['ams2'] > 0, 'sum_vel'] = -(co_nmt['vms'].shift() ** 2) +
        (co_nmt['vms'] ** 2)
        #sum_vel = co_nmt['sum_vel'].sum()
        co_nmt.loc[co_nmt['ams2'] > 0, 'sum_dist'] = co_nmt['dist2']
        sum_dis = co_nmt['sum_dist'].sum()
        duracion = par[1]-par[0]
        vell = n_mt['vkh'].mean()
        if sum_dis > 0 and (duracion>=10) and vell > 1:
            mvxs.append(pares_s[ind])
    in_fr=[]
    for i,j in enumerate(mvxs[:-1]):
        if j[1] > mvxs[i+1][0]:
            in_fr.append(i+1)
    mxr=[2]
    for l in range(1,len(in_fr)):
        mxr.append(in_fr[l]-in_fr[l-1])
    suma_parcial = np.sum(np.array(mxr))
```

```

    mxr.append(len(micro_trips)-suma_parcial)
return mxr #Devuelve el número de microtrips por recorrido

```

```

def rec_mt():
    clrs = clusters()
    mxr = mt_x_re()
    transitions = []
    index = 0
    index_list = []
    for i,j in enumerate(mxr):
        lista_rango = []
        if i == 0:
            index += j-1
        else:
            index += j
        index_list.append(index) #lista de indices donde termina el rango
        for l,k in enumerate(index_list):
            if len(index_list) == 1:
                rango = np.arange(0,k+1,1)
            else:
                rango = np.arange(index_list[l-1]+1,k+1,1)
            for n in rango:
                lista_rango.append(clrs[n])
            transitions.append(lista_rango)
    return transitions #Transiciones en cda microtrip

```

```

nclu = 4 #NUMERO DE CLUSTERS
clus = np.arange(0,nclu,1)

```

```

def permutaciones():
    list_perm = []
    for i in clus:
        for j in clus:
            list_perm.append([i,j])
    return list_perm

```

```

def mat_ocu():
    m_ocurrencias = np.zeros((nclu,nclu))
    trans = rec_mt()
    lper = permutaciones()
    for i,j in enumerate(trans):
        dim = len(j)
        rango = np.arange(0,dim-1,1)
        for l,k in enumerate(rango):
            for n in lper:
                if j[k] == n[0] and j[k+1] == n[1]:

```

```

        m_ocurrencias[n[0],n[1]] +=1
    return m_ocurrencias #Matriz de ocurrencias

def prob_mat():
    mo = mat_ocu()
    mp = np.zeros((nclu,nclu))
    denominadores = np.sum(mo,axis=1).tolist()
    rango = np.arange(0,nclu,1)
    for i in rango:
        for j in rango:
            mp[i,j] = (mo[i,j] / denominadores[i])
    return mp #Matriz de probabilidades

def get_mt():
    n=12
    mat_prob = prob_mat()
    init_state = np.random.choice(clus)
    clust_mt = []
    clust_mt.append(init_state)
    j=1
    while j < n:
        for i in clus:
            if i == clust_mt[len(clust_mt)-1]:
                p = mat_prob[i,:]
                next_state = np.random.choice(clus, p=p)
            j += 1
            clust_mt.append(next_state)
    mt_by_cl = ind_cluster()
    rango = np.arange(0,nclu,1)
    index_mt = []
    for i in clust_mt:
        for j in rango:
            if i == j:
                add = np.random.choice(mt_by_cl[j])
            index_mt.append(add)
    return index_mt #indices de microviajes de acuerdo a matriz de probabilidades
list_mv = micro_trips

def ciclo_prueba():
    import pandas as pd
    imt = get_mt()
    ccp = []
    for i in imt:
        ccp.append(list_mv[i])
    db = pd.concat(ccp)
    ciclo_prueba=db.reset_index(drop=True)

```

```

vp = ciclo_prueba['vkh'].mean()
vm = ciclo_prueba.loc[ciclo_prueba['vkh']>0]
vpm = vm['vkh'].mean()
ac = ciclo_prueba.loc[ciclo_prueba['ams2'] > 0.1]
ap = ac['ams2'].mean()
dc = ciclo_prueba.loc[ciclo_prueba['ams2'] < -0.1]
dp = dc['ams2'].mean()
torme = ciclo_prueba.loc[abs(ciclo_prueba['ams2'])>0.1]
RME = math.sqrt(sum(torme['ams2']**2)/len(torme))
velo= np.array(ciclo_prueba['vms'].tolist().copy())
v2=0
for m, n in enumerate(velo[:-1]):
    if n < velo[m+1]:
        v2 += -n**2 + velo[m+1]**2
PKE = v2/velo.sum()
pr = ciclo_prueba['idle'].mean()
pc = ciclo_prueba['vc'].mean()
pcm = ciclo_prueba['vb'].mean()
pa = ciclo_prueba['ac'].mean()
pd = ciclo_prueba['dc'].mean()
cambios = ciclo_prueba.loc[ciclo_prueba['cambios'] == 1]
c = len(cambios)/12
d = 0
for j in ccp:
    d += len(j)
dpmt = d/12
est_mt = [vp, vpm, ap, dp, RME, PKE, pr, pa, pd, c, dpmt, d]
return ciclo_prueba, est_mt #Estadísticas de ciclo de prueba

```

```

t_stats = est_objetivo.copy()
t_stats.remove(t_stats[7])
t_stats.remove(t_stats[7])

```

```

def rec_ciclos():
    import pandas as pd
    estadisticas = []
    #t_stats = est_objetivo
    c = 0
    while c < 10:
        ciclo_p = ciclo_prueba()
        ciclo = ciclo_p[0]
        stats = ciclo_p[1]
        conteo = []
        for i,j in enumerate(t_stats):
            if abs((j-stats[i])/(j)) <= 0.05:

```

```

        conteo.append(True)
    if len(conteo) == 11:
        estadisticas.append(stats)
        c += 1
        ciclo.to_csv(r'C:\Users\Oscar Salazar\OneDrive\Tesis\Python and
R\Clustering\microprueba\dc'+str(c)+'.csv')
    return estadisticas #Estadísticas de ciclo revisado

def resumen_ciclos():
    est = rec_ciclos()
    columnas = ['vp', 'vpm', 'ap', 'dp', 'RME', 'PKE', 'pr', 'pa', 'pd', 'c', 'dpmt', 'd']
    filas = []
    for i in est:
        filas.append(i)
    tablas = pd.DataFrame(filas, columns=columnas)
    tablas.to_csv('resumen_ciclos.csv') #Regresa tabla de estadísticas de 10 ciclos

resumen_ciclos() #Corre el código

```

ANEXO C: Datos tiempo – velocidad del ciclo de conducción seleccionado.

| S | V (km/h) | S | V (km/h) | S | V (km/h) | S | V (km/h) | S | V (km/h) | S | V (km/h) |
|----|-------------|----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|
| 0 | 0 | 36 | 0 | 72 | 22.5 | 108 | 1.3 | 144 | 21.4 | 180 | 26.1 |
| 1 | 0.3 | 37 | 0 | 73 | 22.3 | 109 | 1.6 | 145 | 22 | 181 | 26.5 |
| 2 | 0.3 | 38 | 0 | 74 | 21.9 | 110 | 3.2 | 146 | 22.1 | 182 | 26.2 |
| 3 | 1.4 | 39 | 0 | 75 | 21.2 | 111 | 5.09 | 147 | 21.5 | 183 | 25.3 |
| 4 | 1.4 | 40 | 0 | 76 | 19.89 | 112 | 7.8 | 148 | 21 | 184 | 23.8 |
| 5 | 1.5 | 41 | 0 | 77 | 18.5 | 113 | 10.19 | 149 | 20 | 185 | 21.8 |
| 6 | 1.7 | 42 | 0.3 | 78 | 16.3 | 114 | 12.9 | 150 | 19.2 | 186 | 20.2 |
| 7 | 1.8 | 43 | 1.7 | 79 | 15.3 | 115 | 13.8 | 151 | 20 | 187 | 18 |
| 8 | 1.9 | 44 | 3.3 | 80 | 12.6 | 116 | 14.3 | 152 | 20.9 | 188 | 16.6 |
| 9 | 2.1 | 45 | 9.19 | 81 | 15.5 | 117 | 15.3 | 153 | 21.6 | 189 | 15 |
| 10 | 2.2 | 46 | 11 | 82 | 15.3 | 118 | 16.3 | 154 | 21.8 | 190 | 14.9 |
| 11 | 2.1 | 47 | 14.4 | 83 | 13.4 | 119 | 16.5 | 155 | 22.1 | 191 | 17.89 |
| 12 | 2.2 | 48 | 14.6 | 84 | 10.4 | 120 | 16.39 | 156 | 21.3 | 192 | 20.3 |
| 13 | 2.2 | 49 | 14.9 | 85 | 6.3 | 121 | 16.89 | 157 | 20 | 193 | 21.9 |
| 14 | 2.1 | 50 | 15.1 | 86 | 0.3 | 122 | 16.89 | 158 | 19.6 | 194 | 22.6 |
| 15 | 2.1 | 51 | 14.6 | 87 | 0 | 123 | 16 | 159 | 19.8 | 195 | 22.3 |
| 16 | 0 | 52 | 13.6 | 88 | 0 | 124 | 15.5 | 160 | 18.3 | 196 | 22.1 |
| 17 | 0 | 53 | 12.5 | 89 | 0 | 125 | 15.2 | 161 | 14.3 | 197 | 23.5 |
| 18 | 3.5 | 54 | 9.69 | 90 | 0 | 126 | 15.2 | 162 | 9.5 | 198 | 22.6 |
| 19 | 7 | 55 | 9.5 | 91 | 0 | 127 | 15.3 | 163 | 6.3 | 199 | 21.7 |
| 20 | 9.19 | 56 | 11.8 | 92 | 0 | 128 | 15.5 | 164 | 5.6 | 200 | 18.39 |
| 21 | 10.5 | 57 | 13.7 | 93 | 0 | 129 | 15.4 | 165 | 5.9 | 201 | 16.39 |
| 22 | 11.5 | 58 | 15.4 | 94 | 0 | 130 | 14.4 | 166 | 6.6 | 202 | 15.5 |
| 23 | 12.4 | 59 | 17.39 | 95 | 0 | 131 | 12.5 | 167 | 10.9 | 203 | 17 |
| 24 | 13 | 60 | 18.7 | 96 | 0 | 132 | 11.9 | 168 | 13.9 | 204 | 18.7 |
| 25 | 13.4 | 61 | 19 | 97 | 0 | 133 | 12.4 | 169 | 17.8 | 205 | 18.7 |
| 26 | 13.3 | 62 | 20 | 98 | 0 | 134 | 14.1 | 170 | 20.3 | 206 | 19.6 |
| 27 | 12.6 | 63 | 20.6 | 99 | 0 | 135 | 15.6 | 171 | 22 | 207 | 19.3 |
| 28 | 12 | 64 | 21.1 | 100 | 0 | 136 | 17 | 172 | 23.3 | 208 | 19.3 |
| 29 | 11.1 | 65 | 20.6 | 101 | 0 | 137 | 17.8 | 173 | 24.2 | 209 | 18.39 |
| 30 | 9.8 | 66 | 19.5 | 102 | 2 | 138 | 18.1 | 174 | 23.9 | 210 | 17.2 |
| 31 | 6.4 | 67 | 19.8 | 103 | 1.8 | 139 | 19.7 | 175 | 24 | 211 | 14.9 |
| 32 | 4 | 68 | 20.7 | 104 | 1.5 | 140 | 20.6 | 176 | 24.3 | 212 | 13.6 |
| 33 | 0 | 69 | 19.6 | 105 | 2.2 | 141 | 20.2 | 177 | 24.6 | 213 | 11.1 |
| 34 | 0 | 70 | 21.3 | 106 | 0 | 142 | 19.7 | 178 | 24.8 | 214 | 6.5 |
| 35 | 0 | 71 | 22.3 | 107 | 0 | 143 | 20.6 | 179 | 25.7 | 215 | 0 |

| S | V (km/h) |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 216 | 0 | 261 | 20.1 | 306 | 6 | 351 | 19.6 | 396 | 18.5 | 441 | 14.4 |
| 217 | 0 | 262 | 20.7 | 307 | 8.8 | 352 | 22.9 | 397 | 20.7 | 442 | 17.2 |
| 218 | 0 | 263 | 20.8 | 308 | 11.6 | 353 | 25.3 | 398 | 22 | 443 | 19.2 |
| 219 | 3.2 | 264 | 21.5 | 309 | 14.2 | 354 | 26 | 399 | 22.8 | 444 | 19.8 |
| 220 | 6.8 | 265 | 20 | 310 | 16.39 | 355 | 26.8 | 400 | 23.3 | 445 | 22 |
| 221 | 7.1 | 266 | 19.7 | 311 | 16.6 | 356 | 27.7 | 401 | 24.2 | 446 | 26 |
| 222 | 9.5 | 267 | 19.2 | 312 | 17.39 | 357 | 26.9 | 402 | 25.8 | 447 | 29.4 |
| 223 | 12.1 | 268 | 18.7 | 313 | 18.8 | 358 | 25.8 | 403 | 23.5 | 448 | 30.5 |
| 224 | 15.3 | 269 | 17.1 | 314 | 20.6 | 359 | 25.7 | 404 | 20.9 | 449 | 32.2 |
| 225 | 16.8 | 270 | 16.39 | 315 | 21.3 | 360 | 25.2 | 405 | 19.6 | 450 | 33.29 |
| 226 | 18.1 | 271 | 16.89 | 316 | 21.2 | 361 | 24 | 406 | 22.4 | 451 | 32.2 |
| 227 | 18.6 | 272 | 13.1 | 317 | 19.6 | 362 | 22.8 | 407 | 24.3 | 452 | 32.79 |
| 228 | 17.7 | 273 | 7.2 | 318 | 20.8 | 363 | 21.5 | 408 | 23.3 | 453 | 33.1 |
| 229 | 15.4 | 274 | 5.3 | 319 | 20.2 | 364 | 19 | 409 | 22.8 | 454 | 33.1 |
| 230 | 16.5 | 275 | 6.5 | 320 | 19.3 | 365 | 14.8 | 410 | 21.3 | 455 | 33.1 |
| 231 | 19.8 | 276 | 7.7 | 321 | 18.6 | 366 | 10.1 | 411 | 19.1 | 456 | 33.4 |
| 232 | 20 | 277 | 8.3 | 322 | 17.3 | 367 | 5.4 | 412 | 17.8 | 457 | 35.4 |
| 233 | 18.8 | 278 | 9.5 | 323 | 15.8 | 368 | 0 | 413 | 15.9 | 458 | 34.4 |
| 234 | 19.1 | 279 | 13.7 | 324 | 18 | 369 | 0 | 414 | 13 | 459 | 35.2 |
| 235 | 18.39 | 280 | 16 | 325 | 19.89 | 370 | 0 | 415 | 9.69 | 460 | 32.4 |
| 236 | 17.1 | 281 | 15.2 | 326 | 22.3 | 371 | 0.3 | 416 | 6.6 | 461 | 28.7 |
| 237 | 18.2 | 282 | 19.3 | 327 | 23.4 | 372 | 1.5 | 417 | 5.09 | 462 | 25 |
| 238 | 20 | 283 | 20.39 | 328 | 23.4 | 373 | 5 | 418 | 2.8 | 463 | 22 |
| 239 | 20.8 | 284 | 20.39 | 329 | 22.6 | 374 | 6.7 | 419 | 2.5 | 464 | 16.2 |
| 240 | 21.4 | 285 | 20.9 | 330 | 22.7 | 375 | 6 | 420 | 1.7 | 465 | 11.9 |
| 241 | 21.6 | 286 | 21.1 | 331 | 22.8 | 376 | 7.1 | 421 | 3.1 | 466 | 6.6 |
| 242 | 20.8 | 287 | 20.5 | 332 | 22.8 | 377 | 6.8 | 422 | 2.6 | 467 | 0 |
| 243 | 17 | 288 | 19.5 | 333 | 22.7 | 378 | 5.9 | 423 | 1.5 | 468 | 1.9 |
| 244 | 18.2 | 289 | 19.2 | 334 | 22.2 | 379 | 2.9 | 424 | 1.8 | 469 | 1.4 |
| 245 | 17.5 | 290 | 18.8 | 335 | 22.1 | 380 | 0 | 425 | 3 | 470 | 0 |
| 246 | 16.39 | 291 | 19 | 336 | 21.2 | 381 | 0 | 426 | 2.9 | 471 | 1.3 |
| 247 | 13.9 | 292 | 21.1 | 337 | 23.4 | 382 | 0 | 427 | 6.6 | 472 | 1.7 |
| 248 | 13.8 | 293 | 21.7 | 338 | 25.2 | 383 | 0 | 428 | 9.19 | 473 | 0.3 |
| 249 | 15.5 | 294 | 22.3 | 339 | 26.3 | 384 | 0 | 429 | 10.3 | 474 | 0 |
| 250 | 16.39 | 295 | 21.3 | 340 | 26.1 | 385 | 0 | 430 | 11.3 | 475 | 0 |
| 251 | 17.39 | 296 | 18.8 | 341 | 24.9 | 386 | 0 | 431 | 11.9 | 476 | 0 |
| 252 | 17.89 | 297 | 17.2 | 342 | 24 | 387 | 0.3 | 432 | 11.8 | 477 | 0 |
| 253 | 18.8 | 298 | 15.1 | 343 | 24.9 | 388 | 1.3 | 433 | 13.1 | 478 | 0 |
| 254 | 19.8 | 299 | 14 | 344 | 25.5 | 389 | 8 | 434 | 11.2 | 479 | 0 |
| 255 | 19.2 | 300 | 12.6 | 345 | 26.4 | 390 | 9.4 | 435 | 12.6 | 480 | 0 |
| 256 | 20.2 | 301 | 12.5 | 346 | 26.3 | 391 | 9.3 | 436 | 15 | 481 | 0 |
| 257 | 19.2 | 302 | 10.5 | 347 | 25.7 | 392 | 10.8 | 437 | 14.6 | 482 | 0 |
| 258 | 18.8 | 303 | 6.6 | 348 | 23.4 | 393 | 12 | 438 | 12.8 | 483 | 0 |
| 259 | 19.5 | 304 | 2.7 | 349 | 19.7 | 394 | 15.1 | 439 | 12.8 | 484 | 0 |
| 260 | 19.89 | 305 | 3.2 | 350 | 17.89 | 395 | 16.5 | 440 | 12.6 | 485 | 0 |

| S | V (km/h) |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 486 | 0 | 531 | 28.9 | 576 | 0 | 621 | 15.2 | 666 | 17.3 | 711 | 22.4 |
| 487 | 0 | 532 | 29.5 | 577 | 0 | 622 | 16.8 | 667 | 18.2 | 712 | 23.1 |
| 488 | 0 | 533 | 30 | 578 | 0 | 623 | 19.7 | 668 | 16.39 | 713 | 23.6 |
| 489 | 0 | 534 | 30.1 | 579 | 0 | 624 | 22.8 | 669 | 14.3 | 714 | 24.2 |
| 490 | 0 | 535 | 31.3 | 580 | 0 | 625 | 25.4 | 670 | 14.2 | 715 | 24.4 |
| 491 | 0 | 536 | 31.6 | 581 | 0 | 626 | 26.7 | 671 | 14.1 | 716 | 24 |
| 492 | 0 | 537 | 31.8 | 582 | 0 | 627 | 26.9 | 672 | 14.6 | 717 | 23.8 |
| 493 | 0 | 538 | 31.6 | 583 | 0 | 628 | 27.1 | 673 | 15.1 | 718 | 24.9 |
| 494 | 0 | 539 | 31.1 | 584 | 0 | 629 | 27.4 | 674 | 16.39 | 719 | 24.7 |
| 495 | 0 | 540 | 31.3 | 585 | 0 | 630 | 27.7 | 675 | 17.39 | 720 | 24.7 |
| 496 | 1.7 | 541 | 30.8 | 586 | 0 | 631 | 27.9 | 676 | 18.7 | 721 | 24.5 |
| 497 | 5.7 | 542 | 31.8 | 587 | 0 | 632 | 27.1 | 677 | 18.5 | 722 | 24.8 |
| 498 | 9.69 | 543 | 31.1 | 588 | 0 | 633 | 27.2 | 678 | 18.39 | 723 | 24.6 |
| 499 | 11.9 | 544 | 32 | 589 | 0 | 634 | 26.5 | 679 | 17.6 | 724 | 24.8 |
| 500 | 12 | 545 | 31 | 590 | 0 | 635 | 27.4 | 680 | 17 | 725 | 24.1 |
| 501 | 12.1 | 546 | 29.5 | 591 | 0 | 636 | 27.3 | 681 | 17.8 | 726 | 23.1 |
| 502 | 13.2 | 547 | 27.8 | 592 | 0 | 637 | 26.5 | 682 | 21.1 | 727 | 22.2 |
| 503 | 14.4 | 548 | 24.2 | 593 | 0 | 638 | 25.9 | 683 | 22.7 | 728 | 20.39 |
| 504 | 13.9 | 549 | 20.7 | 594 | 0 | 639 | 26.5 | 684 | 22.5 | 729 | 17.7 |
| 505 | 14.6 | 550 | 17.1 | 595 | 0 | 640 | 26 | 685 | 21.1 | 730 | 14.9 |
| 506 | 14.7 | 551 | 12.3 | 596 | 1.3 | 641 | 25.6 | 686 | 20.9 | 731 | 12.4 |
| 507 | 15.7 | 552 | 8.69 | 597 | 0 | 642 | 25.5 | 687 | 18.7 | 732 | 8.8 |
| 508 | 17.2 | 553 | 7 | 598 | 0 | 643 | 24.6 | 688 | 17.5 | 733 | 6.5 |
| 509 | 18.5 | 554 | 6 | 599 | 0 | 644 | 24.4 | 689 | 17.7 | 734 | 5.2 |
| 510 | 19.8 | 555 | 6.3 | 600 | 2.1 | 645 | 24.4 | 690 | 17.89 | 735 | 2.2 |
| 511 | 19.6 | 556 | 6.5 | 601 | 5.9 | 646 | 23.2 | 691 | 17.2 | 736 | 0 |
| 512 | 20.39 | 557 | 6.7 | 602 | 9.5 | 647 | 22.3 | 692 | 17.5 | 737 | 0 |
| 513 | 20.7 | 558 | 6.8 | 603 | 13.2 | 648 | 18.89 | 693 | 19.5 | 738 | 0 |
| 514 | 21.1 | 559 | 7.3 | 604 | 13.2 | 649 | 15.8 | 694 | 20.9 | 739 | 0 |
| 515 | 21.1 | 560 | 7.3 | 605 | 14.9 | 650 | 14.7 | 695 | 22 | 740 | 0 |
| 516 | 21.7 | 561 | 8.3 | 606 | 16 | 651 | 13.7 | 696 | 23 | 741 | 0 |
| 517 | 22.2 | 562 | 10 | 607 | 18.3 | 652 | 11.1 | 697 | 23.5 | 742 | 0 |
| 518 | 22.6 | 563 | 10.6 | 608 | 19.3 | 653 | 8.8 | 698 | 24 | 743 | 0 |
| 519 | 23.2 | 564 | 10 | 609 | 19.5 | 654 | 6.8 | 699 | 25 | 744 | 0 |
| 520 | 23.2 | 565 | 10 | 610 | 19 | 655 | 7.3 | 700 | 26 | 745 | 0 |
| 521 | 22.8 | 566 | 9.9 | 611 | 18.89 | 656 | 9.1 | 701 | 26.4 | 746 | 0 |
| 522 | 21.3 | 567 | 9.4 | 612 | 19 | 657 | 11.7 | 702 | 26.6 | 747 | 0 |
| 523 | 18.7 | 568 | 7.4 | 613 | 19.7 | 658 | 12.8 | 703 | 26.7 | 748 | 0 |
| 524 | 17.3 | 569 | 6 | 614 | 20.5 | 659 | 14.9 | 704 | 26.2 | 749 | 0 |
| 525 | 16.1 | 570 | 4.3 | 615 | 20.1 | 660 | 16.89 | 705 | 25.5 | 750 | 0 |
| 526 | 16.39 | 571 | 2.9 | 616 | 20.39 | 661 | 19.3 | 706 | 24.8 | 751 | 0 |
| 527 | 19.8 | 572 | 1.7 | 617 | 20 | 662 | 20.8 | 707 | 22.1 | 752 | 0 |
| 528 | 23.2 | 573 | 0 | 618 | 20.1 | 663 | 20.8 | 708 | 21 | 753 | 0 |
| 529 | 25.4 | 574 | 0.3 | 619 | 19.8 | 664 | 19.39 | 709 | 21.8 | 754 | 0 |
| 530 | 27.4 | 575 | 0 | 620 | 17.7 | 665 | 18.1 | 710 | 21.9 | 755 | 0 |

| S | V (km/h) | S | V (km/h) |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|------|----------|
| 756 | 0 | 801 | 25.8 | 846 | 16.6 | 891 | 0 | 936 | 9.69 | 981 | 20.7 |
| 757 | 0 | 802 | 25.6 | 847 | 15 | 892 | 0 | 937 | 10.3 | 982 | 19 |
| 758 | 0 | 803 | 25.4 | 848 | 14.3 | 893 | 0 | 938 | 10.7 | 983 | 18.1 |
| 759 | 0 | 804 | 23.7 | 849 | 14.1 | 894 | 0 | 939 | 11.2 | 984 | 17.5 |
| 760 | 0 | 805 | 20.8 | 850 | 14.4 | 895 | 0 | 940 | 12.9 | 985 | 18.1 |
| 761 | 0 | 806 | 18.89 | 851 | 15.3 | 896 | 0 | 941 | 13.4 | 986 | 18.1 |
| 762 | 0 | 807 | 14.4 | 852 | 16.8 | 897 | 0 | 942 | 14.7 | 987 | 17.5 |
| 763 | 0 | 808 | 10.5 | 853 | 16.7 | 898 | 0 | 943 | 15.4 | 988 | 17.7 |
| 764 | 0 | 809 | 10.1 | 854 | 17.5 | 899 | 0 | 944 | 14.5 | 989 | 17.5 |
| 765 | 0 | 810 | 13.8 | 855 | 17 | 900 | 0 | 945 | 15.6 | 990 | 16 |
| 766 | 0 | 811 | 17.6 | 856 | 16.5 | 901 | 0 | 946 | 17.1 | 991 | 15.4 |
| 767 | 0 | 812 | 20.3 | 857 | 15.5 | 902 | 0 | 947 | 17.3 | 992 | 16.8 |
| 768 | 0 | 813 | 22.4 | 858 | 15.3 | 903 | 0 | 948 | 16.8 | 993 | 18.39 |
| 769 | 0 | 814 | 23.2 | 859 | 13.2 | 904 | 0 | 949 | 16.89 | 994 | 19.8 |
| 770 | 0 | 815 | 23.1 | 860 | 11.4 | 905 | 0 | 950 | 17.1 | 995 | 20.8 |
| 771 | 3.3 | 816 | 23.1 | 861 | 14.3 | 906 | 0 | 951 | 17.89 | 996 | 21.5 |
| 772 | 6.2 | 817 | 23.3 | 862 | 13.1 | 907 | 0 | 952 | 16.7 | 997 | 21.6 |
| 773 | 8.19 | 818 | 22.8 | 863 | 12.4 | 908 | 0 | 953 | 16.3 | 998 | 22.4 |
| 774 | 12.1 | 819 | 21.4 | 864 | 11.9 | 909 | 0 | 954 | 15.4 | 999 | 22 |
| 775 | 16.1 | 820 | 19.8 | 865 | 10.6 | 910 | 0 | 955 | 16.2 | 1000 | 22.6 |
| 776 | 16.3 | 821 | 17.7 | 866 | 7.6 | 911 | 0 | 956 | 16.89 | 1001 | 23.9 |
| 777 | 16.7 | 822 | 14.5 | 867 | 5.7 | 912 | 0 | 957 | 17.39 | 1002 | 24 |
| 778 | 18.7 | 823 | 10.5 | 868 | 4.4 | 913 | 0 | 958 | 17 | 1003 | 22.4 |
| 779 | 20.2 | 824 | 8.3 | 869 | 3.9 | 914 | 0 | 959 | 16.1 | 1004 | 18.2 |
| 780 | 21.6 | 825 | 10.3 | 870 | 1.9 | 915 | 0 | 960 | 15.7 | 1005 | 15.5 |
| 781 | 21.8 | 826 | 10.4 | 871 | 1.4 | 916 | 0 | 961 | 13.1 | 1006 | 11.8 |
| 782 | 21.5 | 827 | 12.8 | 872 | 0 | 917 | 0 | 962 | 8.1 | 1007 | 9.1 |
| 783 | 20.9 | 828 | 16.5 | 873 | 0 | 918 | 0 | 963 | 3.2 | 1008 | 7.7 |
| 784 | 21.8 | 829 | 17.7 | 874 | 0 | 919 | 2.2 | 964 | 2.4 | 1009 | 6.6 |
| 785 | 22 | 830 | 19 | 875 | 0 | 920 | 5 | 965 | 4.09 | 1010 | 5.09 |
| 786 | 22.5 | 831 | 19.5 | 876 | 0 | 921 | 6.8 | 966 | 4.7 | 1011 | 3.8 |
| 787 | 23.3 | 832 | 19.39 | 877 | 0 | 922 | 7.1 | 967 | 4.7 | 1012 | 1.9 |
| 788 | 23.6 | 833 | 18.7 | 878 | 0 | 923 | 6 | 968 | 5.2 | 1013 | 0 |
| 789 | 23.9 | 834 | 18.7 | 879 | 0 | 924 | 6.2 | 969 | 6.4 | 1014 | 0 |
| 790 | 24.1 | 835 | 18.8 | 880 | 0 | 925 | 6.4 | 970 | 7.1 | 1015 | 0 |
| 791 | 24.1 | 836 | 18.3 | 881 | 0 | 926 | 7 | 971 | 10 | 1016 | 0 |
| 792 | 23.2 | 837 | 18.3 | 882 | 0 | 927 | 6.9 | 972 | 12.4 | 1017 | 0 |
| 793 | 21 | 838 | 18.2 | 883 | 0 | 928 | 5.9 | 973 | 14.4 | 1018 | 0 |
| 794 | 21 | 839 | 18.2 | 884 | 0 | 929 | 5.4 | 974 | 16.8 | 1019 | 0 |
| 795 | 20.5 | 840 | 17.89 | 885 | 0 | 930 | 3.1 | 975 | 19 | 1020 | 0 |
| 796 | 21.7 | 841 | 17.7 | 886 | 0 | 931 | 2.7 | 976 | 20.9 | 1021 | 2.4 |
| 797 | 23.7 | 842 | 16.8 | 887 | 0 | 932 | 3.1 | 977 | 21.3 | 1022 | 0.3 |
| 798 | 23.3 | 843 | 15.2 | 888 | 0 | 933 | 6.1 | 978 | 21 | 1023 | 0 |
| 799 | 24.9 | 844 | 15.3 | 889 | 0 | 934 | 8.1 | 979 | 21.2 | 1024 | 0 |
| 800 | 24.7 | 845 | 16.5 | 890 | 0 | 935 | 9 | 980 | 21 | 1025 | 0 |

| S | V (km/h) | S | V (km/h) | S | V (km/h) | S | V (km/h) |
|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| 1026 | 0 | 1071 | 18.8 | 1116 | 30.3 | 1161 | 0 |
| 1027 | 0.3 | 1072 | 19.1 | 1117 | 32.5 | 1162 | 0 |
| 1028 | 2.6 | 1073 | 18.7 | 1118 | 33 | 1163 | 0 |
| 1029 | 4.2 | 1074 | 17.6 | 1119 | 33.6 | 1164 | 0 |
| 1030 | 5.5 | 1075 | 17 | 1120 | 33.1 | 1165 | 0 |
| 1031 | 8.8 | 1076 | 14.2 | 1121 | 33.29 | 1166 | 0 |
| 1032 | 10.6 | 1077 | 16.39 | 1122 | 32.1 | 1167 | 0 |
| 1033 | 11.9 | 1078 | 17.39 | 1123 | 30.5 | 1168 | 0 |
| 1034 | 10.5 | 1079 | 18.3 | 1124 | 30.6 | 1169 | 0 |
| 1035 | 8.8 | 1080 | 19.2 | 1125 | 30.9 | 1170 | 0 |
| 1036 | 10.19 | 1081 | 20.2 | 1126 | 31.2 | 1171 | 0 |
| 1037 | 12.5 | 1082 | 21.5 | 1127 | 30.5 | 1172 | 0 |
| 1038 | 14.6 | 1083 | 20 | 1128 | 32.4 | 1173 | 0 |
| 1039 | 14.9 | 1084 | 21.4 | 1129 | 32.4 | 1174 | 0 |
| 1040 | 15.9 | 1085 | 22.9 | 1130 | 32.2 | 1175 | 0 |
| 1041 | 16.2 | 1086 | 22.4 | 1131 | 31.8 | 1176 | 0 |
| 1042 | 16.7 | 1087 | 22.3 | 1132 | 32.4 | 1177 | 0 |
| 1043 | 15.7 | 1088 | 20.2 | 1133 | 31.4 | 1178 | 0 |
| 1044 | 13.4 | 1089 | 17.3 | 1134 | 30.8 | 1179 | 0 |
| 1045 | 9.5 | 1090 | 16.89 | 1135 | 32.2 | 1180 | 0 |
| 1046 | 6.6 | 1091 | 15.4 | 1136 | 31.4 | 1181 | 0 |
| 1047 | 5.6 | 1092 | 14.3 | 1137 | 30.5 | 1182 | 0 |
| 1048 | 8.9 | 1093 | 13.5 | 1138 | 29.3 | 1183 | 0 |
| 1049 | 10.6 | 1094 | 14 | 1139 | 27.4 | 1184 | 0 |
| 1050 | 12.6 | 1095 | 16 | 1140 | 26.9 | 1185 | 0 |
| 1051 | 13.5 | 1096 | 18.2 | 1141 | 25.8 | 1186 | 0 |
| 1052 | 14.7 | 1097 | 20.39 | 1142 | 24.8 | 1187 | 0 |
| 1053 | 15.9 | 1098 | 22.1 | 1143 | 23.8 | 1188 | 0 |
| 1054 | 17.6 | 1099 | 24.1 | 1144 | 23.2 | 1189 | 0 |
| 1055 | 18.89 | 1100 | 25.8 | 1145 | 21.6 | 1190 | 0 |
| 1056 | 19.7 | 1101 | 27.5 | 1146 | 19.7 | 1191 | 0 |
| 1057 | 20.6 | 1102 | 28.4 | 1147 | 17.8 | 1192 | 0 |
| 1058 | 22.2 | 1103 | 29 | 1148 | 15.3 | 1193 | 0 |
| 1059 | 21.3 | 1104 | 29.2 | 1149 | 12.1 | 1194 | 0 |
| 1060 | 22.7 | 1105 | 26.5 | 1150 | 10.1 | 1195 | 0 |
| 1061 | 21.7 | 1106 | 22.5 | 1151 | 8.69 | 1196 | 0.3 |
| 1062 | 21.8 | 1107 | 17.89 | 1152 | 7.7 | 1197 | 0.3 |
| 1063 | 20.8 | 1108 | 15.5 | 1153 | 6.3 | 1198 | 0.3 |
| 1064 | 17 | 1109 | 14.5 | 1154 | 4.8 | 1199 | 0.3 |
| 1065 | 14.3 | 1110 | 16.7 | 1155 | 4.5 | 1200 | 0 |
| 1066 | 11.9 | 1111 | 20 | 1156 | 3 | 1201 | 0 |
| 1067 | 8.1 | 1112 | 22.2 | 1157 | 0.3 | 1202 | 0 |
| 1068 | 12.1 | 1113 | 25.1 | 1158 | 0 | 1203 | 0 |
| 1069 | 15.2 | 1114 | 26.7 | 1159 | 0 | 1204 | 0 |
| 1070 | 18 | 1115 | 28.3 | 1160 | 0 | | |

