



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS EMPÍRICO PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE  
UNA CARRETERA DE DOS CARRILES**

**TESIS PARA OBTENER EL  
GRADO DE LICENCIATURA EN:  
INGENIERÍA CIVIL**

**PRESENTA:**

**Bryan Arellano Hernández**

**DIRECTOR:**

**Dr. Oscar Luis Sánchez Flores**

**ASESORES:**

**M.I. José Luis Stefanoni Minutti**

**M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo**

**PUEBLA, PUE**

**OCTUBRE 2024**



**BUAP**

Oficio No. SAC/2082/2023

**C. Bryan Arellano Hernández -201731111-  
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería  
de Civil  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“ANÁLISIS EMPÍRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE UNA CARRETERA DE DOS CARRILES.”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesora de tema al Dr. Oscar Luis Sánchez Flores.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**

**“Pensar bien, para vivir mejor”**

H. Puebla de Z. a 08 de noviembre de 2023

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director**



M'ACGZ/barv  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**P r e s e n t e.**

El que suscribe: Dr. Oscar Luis Sánchez Flores, asesor del tema de tesis:

**"ANÁLISIS EMPÍRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE UNA CARRETERA DE DOS CARRILES."**

Presentada por el C. Bryan Arellano Hernández -201731111-, pasante del Colegio de Ingeniería Civil, y en atención al oficio No. SAC/2082/2023 con fecha de emisión 11 de octubre de 2023, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**Atentamente**  
**"Pensar bien, para vivir mejor"**  
**H. Puebla de Z. a 11 de octubre de 2024**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Oscar Luis Sánchez Flores', with a stylized flourish at the end.

**Dr. Oscar Luis Sánchez Flores**  
**Asesor de Tema**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres por su amor y apoyo incondicional. Sus innumerables sacrificios, su guía y su confianza en mí han sido esenciales para alcanzar este logro. Gracias por estar siempre a mi lado.

A mis hermanos, por compartir tantos momentos y por su constante apoyo. Su compañía y aliento han sido invaluable en este camino. Gracias por estar siempre ahí, por creer en mí y por hacerme sentir el amor más grande del mundo.

A mi novia, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su amor, apoyo y dedicación durante todo este proceso. Gracias por ser mi compañera de batalla, por estar a mi lado en los momentos de incertidumbre, por entenderme y apoyarme incondicionalmente. Tu aliento, motivación y compañía fueron mi mayor motivación cuando más lo necesitaba.

Por último, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Doctor Oscar Luis Sánchez Flores por su invaluable guía y apoyo durante todo este proceso. Su paciencia, conocimiento y dedicación fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Gracias por su disposición a aclarar mis dudas.



## Contenido

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....</b>	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVO GENERAL. ....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS .....</b>	<b>16</b>
<b>PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN O HIPÓTESIS .....</b>	<b>18</b>
<b>1 Marco teórico .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 El problema de la planeación de carreteras en México.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2 Teoría macroscópica de flujo vehicular .....</b>	<b>24</b>
<b>1.2.1 Variables macroscópicas. ....</b>	<b>26</b>
<b>1.2.2 Relaciones macroscópicas .....</b>	<b>27</b>
<b>1.2.3 Concepto de capacidad .....</b>	<b>31</b>
<b>1.2.4 Capacidad según el HCM.....</b>	<b>32</b>
<b>1.2.5 El concepto del nivel de Servicio (LOS).....</b>	<b>36</b>
<b>1.3 Métodos y procedimientos para el cálculo de la capacidad.....</b>	<b>38</b>
<b>1.4 Procedimiento para el cálculo del nivel de servicio.....</b>	<b>46</b>
<b>1.5 Métodos de colecta de las variables macroscópicas y disponibilidad de datos empíricos .....</b>	<b>48</b>
<b>2 Descripción del estudio de caso .....</b>	<b>50</b>
<b>2.1 Caracterización de la oferta de transporte.....</b>	<b>50</b>
<b>2.1.1 Ubicación .....</b>	<b>50</b>
<b>2.1.2 Caracterización de las condiciones de circulación prevaeciente en la carretera de estudio.....</b>	<b>53</b>



---

2.1.3	Colecta de datos.....	58
2.2	Descripción de las características del tránsito.....	60
2.2.1	TDPA.....	61
	Comparativa TPDA campo y datos viales. ....	64
2.2.2	Perfil de distribución del volumen vehicular. ....	66
2.2.3	Perfil horario de máxima demanda. ....	67
2.2.4	Efectos de la nocturnidad.....	69
3	Análisis de los diagramas de las variables macroscópicas.....	73
4	Obtención de la capacidad. ....	93
4.1	Manual de capacidad de carreteras (HCM).....	93
4.2	Método de Van Aerde (VAM).....	95
4.3	Método de límite de producto (PLM).....	96
4.4	Método del índice de flujo sostenible (SFI).....	98
5	Nivel de servicio (LOS). ....	100
6	Análisis comparativo.....	103
	Resumen de resultados .....	104
	Conclusiones. ....	106
	Referencias.....	110



## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama generalizado Velocidad-Densidad.....	28
<b>Figura 2.</b> Diagrama generalizado Flujo-Densidad.....	29
<b>Figura 3.</b> Diagrama generalizado Velocidad-Flujo. ....	31
<b>Figura 4.</b> Flujo estable, demanda menor que la oferta.....	36
<b>Figura 5.</b> Demanda vehicular cerca de la capacidad. ....	37
<b>Figura 6.</b> Flujo inestable, demanda igual o mayor que la oferta.....	37
<b>Figura 7.</b> Métodos para el cálculo de la capacidad. ....	39
<b>Figura 8.</b> Grafica velocidad-flujo para cerretas de carriles múltiples. ....	40
<b>Figura 9.</b> Relación en el diagrama de velocidad-flujo y el método VAM. ....	43
<b>Figura 10.</b> Equipo de aforo neumático. ....	48
<b>Figura 11.</b> Equipo de aforo magnético. ....	49
<b>Figura 12.</b> Mapa de ubicación carretera y estación de aforo mecánico. ....	51
<b>Figura 13.</b> Caracterización del sitio de estudio.....	53
<b>Figura 14.</b> Levantamiento de las condiciones de circulación .....	54
<b>Figura 15.</b> Resumen de las condiciones de circulación prevaleciente en la carretera de estudio. ....	55
<b>Figura 16.</b> Renders del tramo de estudio y sus principales componentes geométricos. ....	55
<b>Figura 17.</b> Esquema del tramo con particularidades del entorno. ....	57
<b>Figura 18.</b> Dispositivo de aforo automático. ....	58
<b>Figura 19.</b> Señalamiento para desvío de vehículos. ....	59
<b>Figura 20.</b> Instalación de mangueras neumáticas.....	59
<b>Figura 21.</b> Monitoreo y mantenimiento de equipos. ....	60



---

<b>Figura 22.</b> Ubicación estaciones permanentes SICT. ....	62
<b>Figura 23.</b> Composición vehicular. ....	64
<b>Figura 24.</b> Ubicación estaciones. ....	64
<b>Figura 25.</b> Estación km 3+061. ....	65
<b>Figura 26.</b> Estación km 8+000. ....	66
<b>Figura 27.</b> Transito diario promedio semanal (TDPS). ....	66
<b>Figura 28.</b> Perfil de distribución del volumen vehicular promedio semanal. ....	68
<b>Figura 29.</b> Perfil de distribución del volumen vehicular el día viernes. ....	69
<b>Figura 30.</b> Efecto de nocturnidad en el flujo. ....	70
<b>Figura 31.</b> Efecto de nocturnidad en la velocidad. ....	71
<b>Figura 32.</b> Efecto de nocturnidad en la concentración. ....	72
<b>Figura 33.</b> Diagrama Flujo-Densidad en periodo de agregación de 1 hora. ....	74
<b>Figura 34.</b> Diagrama Flujo-Densidad en periodo de agregación de 30 minutos. .....	74
<b>Figura 35.</b> Diagrama Flujo-Densidad en periodo de agregación de 15 minutos. .....	74
<b>Figura 36.</b> Diagrama Velocidad-Densidad sentido Sur-Norte semanal. ....	80
<b>Figura 37.</b> Diagrama Velocidad-Densidad sentido Norte-Sur semanal. ....	80
<b>Figura 38.</b> Diagrama Flujo-Densidad sentido Sur-Norte semanal. ....	86
<b>Figura 39.</b> Diagrama Flujo-Densidad sentido Norte-Sur semanal. ....	87
<b>Figura 40.</b> Diagrama Velocidad-Flujo sentido Sur-Norte semanal. ....	92
<b>Figura 41.</b> Diagrama Velocidad-Flujo sentido Norte-Sur semanal. ....	92
<b>Figura 42.</b> Curvas Velocidad-Flujo bajo condiciones óptimas. ....	94
<b>Figura 43.</b> Curvas Velocidad-Flujo bajo condiciones óptimas. ....	94





---

<b>Figura 44.</b> Análisis de variables macroscópicas (grafica Velocidad-Flujo ambos sentidos).....	94
<b>Figura 45.</b> Curvas velocidad-flujo y el modelo de Van Aerde.....	96
<b>Figura 46.</b> Curva de supervivencia método PLM. ....	98
<b>Figura 47.</b> Distribución de Weibull.....	99
<b>Figura 48.</b> Relación flujo-velocidad del tramo de estudio.....	100
<b>Figura 49.</b> Nivel de servicio en situación actual. ....	101



## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Nivel de servicio de la red nacional de carreteras SCT, 2022. ....	15
<b>Tabla 2.</b> Nivel de servicio de la red de carreteras en el Estado de México 2022. .....	16
<b>Tabla 3.</b> Comparativa de características geométricas.....	23
<b>Tabla 4.</b> Comparación de la capacidad calculada en diferentes versiones del HCM (1965, 1985, 2000 y 2010).....	35
<b>Tabla 5.</b> Anexo 14-4. ....	47
<b>Tabla 6.</b> Clasificación vehicular. ....	61
<b>Tabla 7.</b> Datos viales SICT correspondientes a las estaciones permanentes utilizadas en la desestacionalización. ....	62
<b>Tabla 8.</b> TDPA estación de aforo mecánico km 4+000, ruta MEX-115-160. ....	63
<b>Tabla 9.</b> Transito diario promedio semanal (TDPS).....	67
<b>Tabla 10.</b> Diagramas Velocidad-Densidad (u-k) por día de la semana. ....	76
<b>Tabla 11.</b> Diagramas Flujo-Densidad (q-k) por día de la semana. ....	82
<b>Tabla 12.</b> Diagramas Velocidad-Flujo (u- q) por día de la semana.....	88
<b>Tabla 13.</b> Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con el HCM 1985.....	95
<b>Tabla 14.</b> Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con método VAM .....	95
<b>Tabla 15.</b> Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con método PLM.....	96
<b>Tabla 16.</b> Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con método SFI. ....	98
<b>Tabla 17.</b> Comparativa de limites de densidad en los niveles de servicio .....	102



---

<b>Tabla 18.</b> Ventajas y desventajas entre los métodos de estimación de capacidad. .....	103
<b>Tabla 19.</b> Resumen de resultados de las variables macroscópicas. ....	105
<b>Tabla 20.</b> Resumen de Resultados de la capacidad .....	105



## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> Ecuación fundamental del tráfico. ....	26
<b>Ecuación 2.</b> Concentración. ....	30
<b>Ecuación 3.</b> Velocidad a flujo libre FFS. ....	34
<b>Ecuación 4.</b> Método VAM. ....	41
<b>Ecuación 5.</b> Rango de velocidades. ....	41
<b>Ecuación 6.</b> Parámetro de distancia avance. ....	42
<b>Ecuación 7.</b> Primer parámetro de avance variable ....	42
<b>Ecuación 8.</b> Segundo parámetro de avance de distancia variable. ....	42
<b>Ecuación 9.</b> Método PLM. ....	44
<b>Ecuación 10.</b> Método SFI. ....	45



## **INTRODUCCIÓN.**

El análisis de la capacidad y el nivel de servicio de las carreteras es indispensable para la planeación y evaluación de las condiciones de circulación y operación. La capacidad es el máximo número de vehículos que pueden circular por la sección transversal de una carretera en un periodo de tiempo, generalmente de una hora. El nivel de servicio (LOS por Level Of Service) es una forma cualitativa y subjetiva de evaluar las condiciones de circulación de una infraestructura desde el punto de vista de comodidad del conductor.

La estimación de la capacidad y los volúmenes vehiculares en los intervalos críticos del día permiten identificar los problemas de circulación, ya sea generados por cuellos de botella o por un incremento excesivo de vehículos, lo que lleva a definir acciones para mejorar la calidad de la circulación. La aplicación de medidas para gestionar la capacidad reduce también los efectos externos del transporte: accidentes, congestión, emisión de contaminantes, consumo energético, demoras, etc.

En nuestro país se carecen de estudios o investigaciones referentes al análisis de la capacidad y el nivel de servicio en carreteras nacionales. Para subsanar esta carencia, se ha tomado como válidos los parámetros y métodos establecidos principalmente en las diferentes actualizaciones del manual de capacidad de Estados Unidos (HCM por Highway Capacity Manual) sin mayor verificación y comprobación aun cuando las características geométricas, el diseño, las normas y el comportamiento de los conductores es distinta entre ambas naciones. Por ello, es necesario realizar esta verificación y analizar las implicaciones de esta transposición de procedimientos en la planeación y operación de la red nacional de infraestructuras carreteras.

Esta tesis se orienta a aportar información sobre la deficiencia técnica señalada en el sentido de analizar la relación entre las variables macroscópicas del tránsito (flujo, velocidad y concentración), ante diversas solicitaciones de carga vehicular o niveles de saturación, para determinar la capacidad en carreteras mexicanas

de dos carriles. Para tal efecto, se analizan datos empíricos obtenidos en campo en una carretera federal de dos carriles a flujo continuo. La particularidad de los tramos de esta carretera es el alto nivel de congestión que presenta durante el día, reflejando las condiciones de circulación flujo saturado, por lo que es factible estimar la capacidad.

Para estimar la capacidad, se emplea la teoría macroscópica del flujo vehicular (e.g. May, 1990) así como métodos de estimación de capacidad paramétricos y no paramétricos. Dado que la caracterización de comportamiento entre las variables macroscópicas se ha modificado a lo largo del tiempo, se realiza un análisis comparativo entre los valores de capacidad resultantes los manuales de capacidad de Estados Unidos de 1985, 2000 y 2010 respecto a los valores obtenidos del análisis con datos empíricos.

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Las condiciones en las que operan las carreteras del país podrían haber empeorado con el paso de los años, esto se debe a varios factores:

a) *La migración de la población a las zonas urbanas* genera una alta concentración de habitantes y flujos vehiculares por lo que los movimientos interurbanos también son de mayor volumen y concentración provocando una carga vehicular importante en las carreteras. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) pronostica que para el año 2050 el 70% de la población vivirá en ciudades, complicando a gran escala la movilidad (ONU, 2007).

b) *La dependencia del vehículo particular y los modos motorizados* llevan a una saturación de la capacidad de las carreteras generando problemas recurrentes de circulación y costos externos para los ciudadanos. En efecto, hasta el día 31 de diciembre del año 2023 se tiene un registro de más de 37 millones de automóviles, 1 millón de autobuses de pasajeros y 11.6 millones de camiones de carga con una tasa de incremento anual promedio de 5.5% (INEGI, 2023).

c) La oferta en términos de *capacidad en las carreteras se ha mantenido prácticamente estable* en los últimos años a pesar del incremento de vehículos y de la movilidad (ver a y b). Por otro lado, las condiciones de estas infraestructuras se han deteriorado (SICT, 2023), ante la ausencia de mantenimiento adecuado. Estos dos factores son determinantes de las condiciones de circulación. Por lo tanto, es indispensable analizar la relación actual entre el flujo vehicular y las características de la infraestructura para determinar en qué medida interfieren en las relaciones entre las variables del flujo vehicular que inciden en la ocupación y las condiciones de circulación. Una revisión de la extensión de la red de carreteras por su capacidad permite confirmar que las de mayor capacidad son las de menor extensión y proporción respecto a la red nacional de carreteras. Para el año 2023, la Red Nacional de Caminos (IMT, 2023) tiene el siguiente inventario:

- **Red Carretera Total:** La longitud total de la red carretera, que incluye carreteras pavimentadas, vialidades/enlaces y caminos (sin pavimento), es de 875,928 km.
- **Carreteras Pavimentadas:** El 29% de la red corresponde a carreteras pavimentadas, lo que equivale a 252,155 km.
- **Carreteras Federales:** De la longitud total de carreteras pavimentadas (252,155 km), el 36% (91,390 km) corresponde a carreteras federales, estas cumplen con las características de las carreteras de flujo continuo.
- **Carreteras de 2 o más Carriles por Sentido:** Dentro de las carreteras federales (91,390 km), tan solo el 4.1% (3,733 km) corresponde a carreteras de 2 o más carriles por sentido (0.4% con respecto a la Red Carretera Total).

d) En la práctica nacional, *la planeación*, y en su caso, la toma de decisiones sobre la red de carreteras se realiza *con base a criterios metodológicos externos* (en particular el Manual de Capacidad de Estados Unidos) sin que exista evidencia de un análisis técnico que lo soporte. En efecto, las características geométricas, estado del pavimento, composición vehicular y comportamiento de los usuarios es muy distinto de las carreteras de otros países y en particular de Estados Unidos. Esta trasposición de metodologías de forma directa posiblemente esté induciendo sesgos en el análisis e interpretación de resultados que afecta directamente tanto el monitoreo, mantenimiento y planeación del sistema carretero nacional. Por lo tanto, es pertinente verificar que el comportamiento de las relaciones macroscópicas y la capacidad en la red carretera del país corresponda a los supuestos que soportan la aplicación de estos manuales de capacidad.

e) Las implicaciones de *un monitoreo inadecuado* de la red de carreteras tanto en capacidad como en niveles de servicio *conllevar a la pérdida de eficiencia del país* y también a *altos costos sociales* para los usuarios (tiempos de recorrido excesivos, congestión recurrente, alto índice de accidentes, alto consumo de combustibles, mayor cantidad de emisiones contaminantes, etc.). Es pertinente hacer una revisión periódica y continua del estado real de la circulación en la red carretera nacional para lograr la máxima eficiencia aminorando los costos externos. Este proceso, además de administrativo es técnico ya que se requieren de las herramientas y metodologías que permitan lograr este objetivo. Desafortunadamente en el país pocos trabajos y análisis se han reportado al respecto en particular sobre la capacidad y por consecuencia los niveles de servicio.

## **JUSTIFICACIÓN**

La capacidad de las carreteras en México requiere estimarse con las singularidades propias del país debido a que afecta las adecuaciones del diseño y las características geométricas de las carreteras, dichas adaptaciones o toma



de decisiones respecto a sus características son parte de las medidas para reducir los accidentes o hechos de tránsito. La capacidad de una carretera y el nivel de servicio reflejan las condiciones para alojar, con relativa seguridad y comodidad, un flujo de vehículos o personas. Al relacionar la oferta (por ejemplo, las características de las carreteras) con la demanda (por ejemplo, volumen vehicular), se tendrán las condiciones que definen la calidad de la circulación. Con la estimación de la capacidad y los volúmenes vehiculares en los períodos críticos del día es posible identificar los cuellos de botella y los requerimientos de intervención para mejorar la circulación y el nivel de servicio

Desde el año 2015 la SICT publica el documento “Capacidad y Niveles de Servicio en la Red Carretera”, el cual incluye alrededor del 6% de la red carretera nacional (en 2023, se presentan los resultados del análisis de 52,683 Km de carreteras federales, representando el 57.6% de la longitud total). En ese documento se indica: *“para carreteras de dos carriles, la capacidad en condiciones ideales se consideró de 2,800 vph (vehículo por hora) en ambos sentidos de circulación; para autopistas se tomó de 1,900 vph cuando la velocidad de proyecto es menor de 90 km/h (terreno montañoso) y de 2,000 vph cuando la velocidad de proyecto es mayor o igual a 90 km/h (terreno plano y lomerío)”* (SICT, 2023). Estos valores de capacidad y velocidad difieren respecto a la metodología del HCM, 2010 en la que, para carreteras de múltiples carriles, en condiciones óptimas y con velocidades a flujo libre de 96.5 km/h, la capacidad queda establecida en 2,200 vehículos particulares/h/carril. Por otra parte, también se identifica discrepancia entre metodologías con la aplicación de la velocidad de proyecto y la velocidad a flujo libre. Posiblemente, en tales evaluaciones, se esté empleando la metodología de una versión anterior del HCM sin especificar la razón y la fundamentación técnica.

En la **Tabla 1** se presenta un resumen del documento “Capacidad y Niveles de Servicio en la Red Carretera” (SICT, 2023). Se puede apreciar que, en la red federal libre, el 66.9% del total de kilómetros se encuentra operando con un nivel C o superior (A o B). El resto de la red (33.1%) tiene una operación con niveles

de servicio inadecuados (D o E). Análogamente, para la red de cuota, el 85.4% de kilómetros de carreteras tiene niveles de servicio adecuado, mientras que solo un 14.6% tiene niveles inadecuados. En principio la diferencia de las condiciones de operación entre ambas redes de carreteras se encuentra en las velocidades permitidas, las condiciones físicas, operacionales y geométricas entre ambos tipos de carreteras.

**Tabla 1.** Nivel de servicio de la red nacional de carreteras SCT, 2022.

Nivel de Servicio (LOS)	Red Libre		Red Cuota		Ambas Redes	
	Long. (Km)	Long. (%)	Long. (Km)	Long. (%)	Long. (Km)	Long. (%)
<b>A</b>	8,304.16	19.15%	3,073.89	32.98%	11,378.05	21.60%
<b>B</b>	9,964.53	22.98%	3,563.49	38.23%	13,528.02	25.68%
<b>C</b>	10,749.81	24.79%	1,326.82	14.23%	12,076.62	22.92%
<b>D</b>	7,432.43	17.14%	471.37	5.06%	7,903.80	15.00%
<b>E</b>	5,801.84	13.38%	662.66	7.11%	6,464.50	12.27%
<b>F</b>	1,109.09	2.56%	223.20	2.39%	1,332.29	2.53%
<b>Total</b>	<b>43,361.85</b>	<b>100%</b>	<b>9,321.42</b>	<b>100%</b>	<b>52,683.27</b>	<b>100%</b>

Fuente: Datos viales SICT.

Como ya se mencionó, para que sea factible estimar la capacidad, se debe contar con datos que describan el régimen de congestión fluido y congestionado. Para el análisis del comportamiento de una carretera que cumpla con la condición anterior, se seleccionó una carretera próxima a la zona metropolitana del Valle de México dado que es donde se tiene una concentración más importante de la movilidad. Por ello, se seleccionó un tramo de carretera federal localizada en el Estado de México libre de peaje. En la **Tabla 2** se presenta un resumen de la composición de la red carretera en el Estado de México. Destaca que, la mitad (50.6%) de la longitud de las carreteras libres de peaje se encuentra en niveles de servicio inadecuados (D, E o F) lo que implica tiempos de traslado de los usuarios elevados, altas emisiones de contaminantes, accidentes y mayores costos en lo traslados. El caso opuesto se tiene en la red de carreteras de cuota en la que la mayor parte de la longitud (88.4%) se encuentra en condiciones de circulación satisfactorias (A, B o C). Es por esta razón que se eligió un tramo de una carretera libre para realizar el análisis de capacidad.

**Tabla 2.** Nivel de servicio de la red de carreteras en el Estado de México 2022.

Nivel de Servicio (LOS)	Red Libre		Red Cuota		Ambas Redes	
	Long. (Km)	Long. (%)	Long. (Km)	Long. (%)	Long. (Km)	Long. (%)
A	101.04	12.22%	65.20	16.73%	166.24	13.66%
B	115.47	13.96%	237.87	61.03%	353.34	29.04%
C	191.63	23.17%	41.31	10.60%	232.94	19.14%
D	95.67	11.57%	9.51	2.44%	105.18	8.64%
E	195.51	23.64%	-	-	195.51	16.07%
F	127.61	15.43%	35.90	9.21%	163.51	13.44%
<b>Total</b>	<b>826.93</b>	<b>100%</b>	<b>389.79</b>	<b>100%</b>	<b>1,216.72</b>	<b>100%</b>

Fuente: Datos viales SICT.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL.

Analizar, con datos empíricos, el comportamiento de las variables macroscópicas del tránsito en una carretera de dos carriles por sentido a flujo continuo en condiciones de saturación para estimar la capacidad y su relación con los niveles de servicio con una doble finalidad: a) identificar las diferencias tanto de comportamiento de las relaciones macroscópicas como de valores capacidad entre los resultados empíricos de las carreteras nacionales respecto a los parámetros teóricos de los instrumentos de planeación utilizados en México (HCM en específico); b) describir las consecuencias de transferir, a los procesos de planeación de carreteras, parámetros de capacidad distintos a los de las carreteras nacionales.

### OBJETIVOS ESPECIFICOS

**Establecer el marco de referencia** mediante la revisión de los procedimientos y métodos de análisis de las variables macroscópicas del tránsito orientados a la estimación de la capacidad de carreteras y el análisis de los niveles de servicio.

**Analizar el comportamiento de las relaciones macroscópicas** a partir de datos empíricos de una carretera de dos carriles por sentido para determinar la variación de las relaciones flujo-velocidad, velocidad-concentración y flujo-concentración respecto a varios factores: geometría, restricciones de circulación,



nocturnidad y nivel de saturación. Analizar el entorno del tramo de la carretera en estudio para identificar los efectos potenciales sobre la circulación y sus efectos en la relación de las variables macroscópicas del tránsito.

**Comparar las relaciones macroscópicas** establecidas en las versiones de los manuales HCM con las del análisis empírico para identificar las diferencias relevantes y explicar su relación con la capacidad.

**Estimar la capacidad** del caso de estudio a partir de diversos métodos establecidos en el marco de referencia. Realizar un análisis comparativo de las estimaciones de capacidad y analizar las implicaciones respecto al cálculo del nivel de servicio. Finalmente,

**Determinar** las implicaciones de utilizar los manuales de capacidad externos a la realidad de las carreteras nacionales respecto al análisis empírico del caso nacional y proponer medidas para atenderlas.



## **PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN O HIPÓTESIS.**

A partir de aforos individuales de vehículos en carreteras mexicanas con altos niveles de saturación y a través de la teoría macroscópica del flujo vehicular es factible estimar la capacidad y los niveles de servicio que refleje la realidad de la circulación en el país y a su vez mostrar que existen diferencias e implicaciones importantes respecto a la práctica nacional en la que se utilizan las versiones del manual de capacidad de Estados Unidos sin previo análisis.

Con base en este análisis, responder las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuál es la capacidad de una carretera de dos carriles de la red nacional?,

¿Qué factores influyen de manera importante en la capacidad de una carretera nacional?

¿Qué implicaciones tendría en la planeación de carreteras mexicanas que el comportamiento de las variables macroscópicas del tránsito, los niveles de servicio y la capacidad difieran de la práctica nacional basada en los manuales de capacidad de Estados Unidos?

## **METODOLOGÍA.**

Se presentan las actividades principales que conforman la metodología del análisis empírico para la determinación de la capacidad en una carretera de dos carriles.

**Establecer el marco de referencia.** Proporciona la base teórico - conceptual necesaria para facilitar la comprensión del análisis realizado.

**Seleccionar el tramo de estudio.** Búsqueda y selección de información de datos de aforos individuales para carreteras de 2 carriles por sentido.

**Integración y validación de bases de datos.** La información existente de aforos con registros individuales en carreteras de dos carriles será integrada en bases de datos para facilitar el análisis. Se diseñará la base de datos y se validarán los registros discriminando valores aberrantes.

**Caracterización de las condiciones de circulación prevaleciente en la carretera de estudio.** Se obtendrán las características geométricas del tramo carretero aforado incluyendo los elementos que pudieran afectar la circulación: estado de la superficie de rodamiento, entradas y salidas, bases de taxis, paraderos de autobuses, maniobras de operación en el tramo, señalamiento vertical y horizontal, visibilidad, obstrucciones visuales entre otras. Se describirá de forma general la composición vehicular y la operación de modos de transporte no convencionales: motocicletas, mototaxis, entre otros.

**Análisis de los diagramas de las variables macroscópicas.** A partir de las bases de datos de aforos, se obtendrán las variables macroscópico del tránsito (flujo, velocidad y concentración) a diferentes niveles de agregación temporal y se elaborará: a) un análisis de los factores exógenos que inciden en el comportamiento de las variables macroscópicas (nocturnidad, condiciones climáticas, visibilidad), b) un análisis comparativo respecto a los diagramas teóricos y los empleados en el HCM, 2010 con a la finalidad de poner en evidencia las diferencias para el caso mexicano.



**Obtención de la capacidad.** Se utilizarán diversos métodos de estimación de la capacidad vehicular a través de los diagramas de las relaciones macroscópicas y en particular la relación flujo-velocidad. Se aplicarán los métodos seleccionados en el marco de referencia.

**Obtención de los niveles de servicio.** Se determinará el del nivel de servicio en el que se encuentra operando la carretera de estudio y se caracterizará el nivel de servicio en carreteras similares.

**Análisis comparativo.** Se visibilizarán las relaciones e inconsistencias entre las metodologías empleadas para la evaluación de la capacidad de carreteras, incluyendo las del HCM, y los resultados obtenidos del caso de estudio.

**Resultados y conclusiones.** Se sintetizan los hallazgos, resultados y recomendaciones que resultan después de llevar a cabo el estudio de caso.

## 1 Marco teórico

En este capítulo se abordan algunos de los conceptos que conforman la base de conocimientos sobre la teoría macroscópica del flujo vehicular:

- Se presentan los principales problemas en la planeación de carreteras en México, existen diversos factores que afectan la eficiencia y seguridad de operación.
- Se aborda la teoría macroscópica de flujo vehicular, es un enfoque que estudia el comportamiento general del tránsito en las carreteras.
- Se describen las variables macroscópicas en el contexto del flujo vehicular. Estas variables ayudarán a comprender y modelar el comportamiento general del tránsito en las carreteras.
- Se describen los diagramas que ilustran la relación entre las variables macroscópicas: velocidad media, concentración y flujo vehicular.
- Se describen los conceptos de capacidad y nivel de servicio. Por último,
- Se presentan los métodos y procedimientos para el cálculo de la capacidad, nivel de servicio y colecta de las variables macroscópicas.

### 1.1 El problema de la planeación de carreteras en México

Uno de los principales problemas que presenta la red nacional de carreteras es la falta de planeación integral entre el diseño geométrico y el análisis de la capacidad. El análisis de la capacidad y el nivel de servicio son determinantes en la toma de decisiones que den solución a problemas de congestión vehicular, pues, a partir de estas evaluaciones, se determina la necesidad de realizar proyectos de infraestructura carretera.

A partir de una revisión de la literatura nacional, se identificó que los estudios e información generada, respecto al análisis de la capacidad de carreteras mexicanas, son limitados o prácticamente inexistentes. En cuanto a las universidades en México, existe poca evidencia de investigaciones o tesis que





aborden esta temática. Dicho vacío explica por qué el monitoreo, la planeación, construcción y la toma de decisiones se basa en instrumentos de diseño (manuales o normativas) que no representan las características del país en la composición vehicular, geométricas y flujos vehiculares propios de nuestras carreteras.

La Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT) del Gobierno Federal publica, desde el año 2004, el reporte anual de datos viales de la red carretera nacional (SICT, 2023). Este documento incluye información proveniente de estaciones permanentes y temporales. Se reporta el Tránsito Diario Promedio Anual (TPDA), la composición vehicular, los factores de hora pico (K) y distribución direccional (D). A partir del año 2015, publica el reporte anual sobre la capacidad y nivel de servicio. Sin embargo, la información generada referente a la metodología empleada en el análisis de la capacidad de una carretera es limitada. Para la estimación de la capacidad y el nivel de servicio generalmente la SICT emplea el HCM sin ningún ajuste o consideración indicado de forma explícita.

Por ejemplo, la SICT en el documento “Capacidad y Niveles de Servicio en la Red Carretera 2022” (SICT, 2023) refiere: *“La información presentada en este documento se generó mediante la metodología presentada en la publicación: Manual de Capacidad Vial, editado por esta Secretaría en 1991”*. Este manual se encuentra en la publicación técnica 17 “Manual de capacidad vial 1985. Una visión ejecutiva.” publicado en el año 1991 por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y que, a su vez, es una traducción parcial del Manual de Capacidad (HCM) publicado en el año 1985 (Vázquez, 1991).

Más recientemente Torres et al. (2021) aplican el HCM 2010 para estimar el nivel de servicio en carreteras de dos carriles (uno por sentido). Es decir, se cambia el método y el criterio de evaluación sin un análisis técnico que lo justifique y considere las implicaciones de los resultados ya que las metodologías en el HCM de 1985 y 2010 son distintas. Justamente, una de las razones de esta

investigación es verificar si, en efecto, esta transferencia “directa” o “inocente” carece de implicaciones técnicas para el caso de las carreteras mexicanas de 2 carriles por sentido.

Una comparativa de algunas características geométricas entre las carreteras de Estados Unidos y las de México muestran diferencias importantes. En **Tabla 3** se indican las condiciones estándar o que por default se toman en cuenta en las carreteras de Estados Unidos según (AASHTO, 2018) y HCM y las que prevalecen en las carreteras mexicanas según el “Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018” (SICT, 2018).

**Tabla 3.** Comparativa de características geométricas.

Características Geométricas mínimas	AASHTO	SICT
Ancho de carril (m)	3.75	3.50
Ancho de acotamiento (m)	1-3	0-3
Pendiente gobernadora (%)	1-6	2-9
Bombeo (%)	2-6	2-3
Velocidad de diseño (km/h) (depende de las condiciones del terreno)	20-140	30-120
Accesos controlado	En áreas urbanas deben estar espaciados al menos a 1.6 km	Sin información

Fuente: Elaboración propia a partir de A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2018 (AASHTO, 2018) y Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018 (SICT, 2018).

De esta tabla comparativa podemos notar:

Primero, la geometría para carreteras de Estados Unidos refleja mejores condiciones operativas, un ancho de carril más amplio, el cual contribuye a una percepción de conducción más segura, cómoda y fluida para los usuarios de la carretera así mismo facilita la circulación de vehículos grandes dimensiones como son los autobuses y camiones de carga.

Segundo, las carreteras mexicanas además de permitir dimensiones más reducidas que las homólogas de Estados Unidos, difieren en geometría por la normativa existente para su construcción ya que, es posible reducir el ancho mínimo del carril solo si esta reducción está justificada realizando ajustes a las

velocidades permitidas (SICT, 2018). Sin tomar en cuenta que la superficie de rodamiento y el estado de la carretera puede ser muy distinta debido a los problemas de mantenimiento que se han citado previamente.

Finalmente, la relación entre las características de la infraestructura, su estado físico y la percepción de comodidad, seguridad y los hábitos o costumbre de los conductores también generan diferencias las cuales deben reflejarse en la estimación del nivel de servicio.

## 1.2 Teoría macroscópica de flujo vehicular

El estudio del tránsito resulta esencial para optimizar la movilidad además de ser un pilar fundamental en la planificación y diseño de infraestructuras carreteras.

Los modelos del flujo vehicular permiten comprender y pronosticar las características actuales y futuras del flujo vehicular a través de relaciones que simulan el comportamiento del tránsito. A partir del nivel de conceptualización y agregación de las variables que explican la circulación se identifican tres tipos de modelos que permiten caracterizar las condiciones del flujo vehicular: macroscópico, microscópico y mesoscópico.

*Modelo macroscópico:* aborda el flujo vehicular como un comportamiento promedio entre las conductas de circulación. En este enfoque se analiza el tráfico considerando un flujo laminar o colectivo que se mantiene en grupúsculos de vehículos (pelotón). Es decir, los vehículos se desplazan con una velocidad y separación uniformes (espacio intervehicular). Los cálculos y la complejidad son relativamente sencillos, ya que contempla al flujo como un conjunto sin detallar las interacciones individuales entre los vehículos (González, 2023).

*Modelo microscópico:* considera cada vehículo como una unidad independiente, dirigida por el conductor, que interactúa con otros vehículos y con los elementos circundantes (infraestructura). En este enfoque, los vehículos difieren de los demás en velocidad, aceleración y dimensiones. Aunque esto aumenta la complejidad y el tiempo de cálculo, en comparación con los modelos macroscópicos, la ventaja radica en que representa de manera más detallada la

interacción conductor-vehículo-infraestructura además que este enfoque permite generar animaciones de la simulación (González, 2023).

*Modelo mesoscópico:* tiene como objetivo moderar la simplicidad de los cálculos macroscópicos con la precisión del modelo microscópico. En este enfoque, se contemplan los flujos como un conjunto global incorporando distintos comportamientos de grupos de vehículos. De esta manera, se logra una representación más completa y realista del tráfico, considerando tanto los comportamientos agregados del flujo vehicular como las interacciones individuales entre vehículos (González, 2023).

El modelo macroscópico considera que el flujo vehicular está compuesto por un grupúsculo de vehículos que cumplen con una serie de supuestos:

- Los vehículos se desplazan en un tramo de carretera uniforme en el que el movimiento de los vehículos es a flujo continuo lo que implica la inexistencia de obstáculos y dispositivos físicos de regulación de tránsito.
- Los vehículos se desplazan en una sola dirección y disponen de un carril para circular,
- Se tiene un vehículo líder cuyas características de operación (velocidad, tiempo inter vehicular) son imitadas por los seguidores,
- Las condiciones de circulación para el grupo de vehículos (pelotón) corresponde a un régimen laminar o estable,
- La velocidad del conjunto de vehículos es uniforme. Por ello, los rebases son inviables y la capacidad de aceleración/desaceleración de los vehículos es nula,
- La separación entre los vehículos que conforman el pelotón es uniforme (espacio y tiempo inter vehicular constante) por lo que su interacción es nula.
- Los vehículos son de una misma clase y adimensionales. El flujo se conforma generalmente por vehículos particulares.

### 1.2.1 Variables macroscópicas.

A partir de los supuestos de la teoría macroscópicas del flujo vehicular, se consideran tres variables que permiten describir el comportamiento macroscópico del tráfico en una sección carretera uniforme a flujo continuo:

**Velocidad media (u):** Es el promedio de las velocidades individuales de un conjunto de vehículos. Se mide en kilometro/hora. Se interpreta como la tasa con la que el conjunto de vehículos avanza respecto a la unidad de tiempo.

**Densidad o concentración (k):** es el número de vehículos (n) que se encuentra en un segmento de longitud (l) en un instante determinado. Se mide en vehículos/kilometro.

**Flujo (q):** es el número de vehículos (n) que cruzan la sección transversal de una carretera en un intervalo de tiempo (t) determinado. Se mide en vehículos/hora.

Las variables descritas anteriormente son relevantes en el análisis de las propiedades del tránsito vehicular. Es a partir de este análisis que se deriva la **Ecuación Fundamental** del tránsito (e.g. TRB, 1985; May, 1990) que establece la relación entre el flujo vehicular, la velocidad media y la concentración vehicular (ver **Ecuación 1**).

**Ecuación 1.** Ecuación fundamental del tráfico.

$$q = u * k$$

La relación entre las tres variables principales de flujo vehicular (u, k y q) se basa en el procesamiento de datos y la conceptualización de su comportamiento a partir de una representación visual simplificando la complejidad de estudiar grandes conjuntos de datos. El procesamiento de estas tres variables nos permite inferir conclusiones específicas a partir de comparaciones o analogías físicas entre los fenómenos observados en el flujo vehicular y las condiciones límite o de frontera de sus gráficos. No obstante, es crucial recordar que esta fórmula supone el tránsito es uniforme y constante. En la realidad, este supuesto es simplificado, por lo que conviene entender el marco teórico usado para analizar

datos empíricos. Por ende, la ecuación básica del tráfico ofrece un primer acercamiento para comprender la dinámica del tráfico, pero puede necesitar modificaciones para representar con exactitud las condiciones reales del tráfico.

### 1.2.2 Relaciones macroscópicas

A partir del entendimiento y la interacción de las tres variables macroscópicas del tránsito ( $u$ ,  $k$  y  $q$ ), se representan tres gráficos que ayudan a comprender, en planos cartesianos, la relación entre dos de estas variables: velocidad-densidad ( $u$ - $k$ ), flujo-densidad ( $q$ - $k$ ) y velocidad-flujo ( $u$ - $q$ ). Las descripciones que se incluyen a continuación son teóricas conformando el paradigma dominante hace décadas. Estas relaciones se han ido modificando con el tiempo lo que afecta el tipo de funciones que se emplean para caracterizarlas. No obstante, el fundamento de estas relaciones permanece siendo válido.

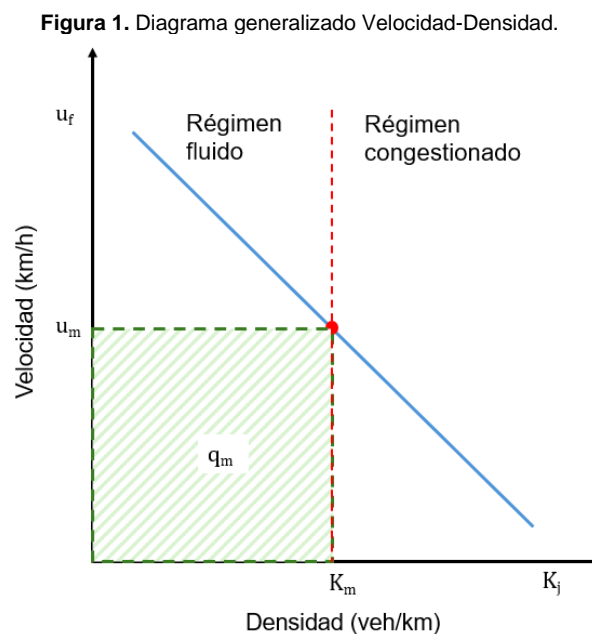
#### Velocidad-Densidad ( $u$ - $k$ ):

Esta relación macroscópica se caracteriza por (ver **Figura 1**):

- Se tiene una velocidad máxima permitida de circulación denominada velocidad a flujo libre ( $u_f$ ), una concentración máxima ( $k_j$ ) y una concentración y velocidades óptimas ( $u_m$ ,  $k_m$ ).
- Los vehículos pueden circular a la velocidad máxima cuando tienen un amplio espacio inter vehicular. Es decir, la concentración es muy baja o cercana a cero. Por el contrario, cuando prácticamente no existe espacio inter vehicular, los vehículos están detenidos, la velocidad tiende a cero y la concentración es máxima o crítica ( $k_j$ ).
- La relación entre la velocidad media y la concentración es inversa, no necesariamente lineal, distinguiéndose un valor de concentración ( $k_m$ ) y de velocidad ( $u_m$ ) en el que se alcanza el mayor volumen vehicular o capacidad de la infraestructura.
- En efecto, de la ecuación fundamental (ver **Ecuación 1**), se tiene que el flujo es el producto de la velocidad media por la concentración lo que equivale a la superficie formada debajo de la función que relaciona  $u$ - $k$ .

Por ello, cuando la velocidad media alta y la concentración es baja esa superficie es reducida y se incrementa en la medida que aumenta  $u$  y  $k$  (régimen fluido). No obstante, en cierto momento esa superficie (el flujo) empieza a reducirse porque la velocidad media se reduce, aunque la concentración aumente (régimen congestionado) hasta el punto donde la velocidad casi es cero y la concentración es máxima.

- Por consiguiente, la capacidad de la infraestructura se alcanza cuando el área bajo la curva es máxima o se tiene el mayor flujo vehicular. En la gráfica se representa con las coordenadas  $u_m$  y  $k_m$ .



Fuente: Elaboración propia.

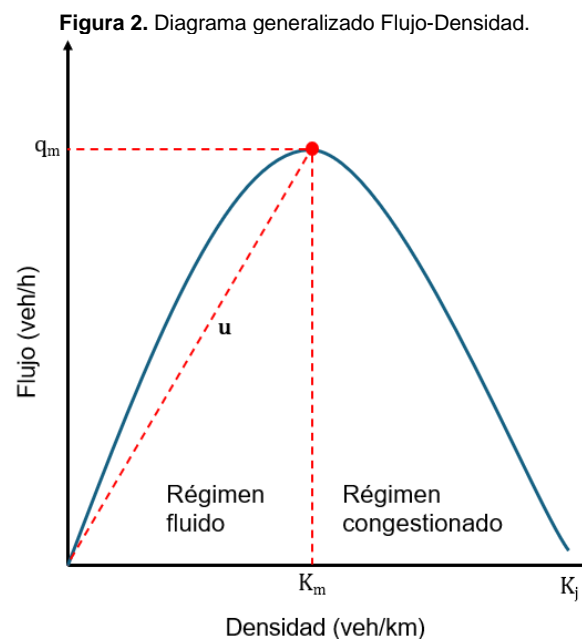
### Flujo-Densidad ( $q$ - $k$ ):

Esta relación macroscópica se caracteriza por (ver **Figura 2**):

- Una concentración óptima ( $k_m$ ) y una concentración máxima ( $k_j$ ).
- La velocidad media corresponde a la relación del flujo entre la concentración. Se representa por la pendiente formada desde el origen a cada par (densidad, velocidad) de la curva  $k$ - $u$ . En el régimen fluido las pendientes son elevadas hasta llegar al punto correspondiente a la concentración crítica, capacidad o velocidad óptima. En el régimen

congestionado las pendientes siempre serán menores a la de punto crítico ya citado. Esta pendiente menor se debe a una interacción más intensa entre vehículos ocasionada por un aumento en la concentración vehicular.

- El flujo incide en la concentración, en medida que la concentración aumenta el flujo aumenta proporcionalmente hasta que se alcanza la concentración crítica ( $k_j$ ) o la capacidad de la carretera. Al presentarse concentraciones vehiculares mayores a la crítica el flujo empieza a disminuir respecto al máximo debido a las condiciones de circulación con mayor congestión (régimen congestionado).
- Por consiguiente, la capacidad de la infraestructura se alcanza en el mayor flujo observado ( $q_m$ ).



Fuente: Elaboración propia.

### Velocidad-Flujo ( $u-q$ ):

Esta relación macroscópica se caracteriza por (ver **Figura 3**):

- Se tiene una velocidad máxima permitida de circulación denominada velocidad a flujo libre ( $u_f$ ) y una velocidad óptima ( $u_m$ ) que permite el flujo de la mayor cantidad de vehículos correspondiendo a la capacidad de carretera.



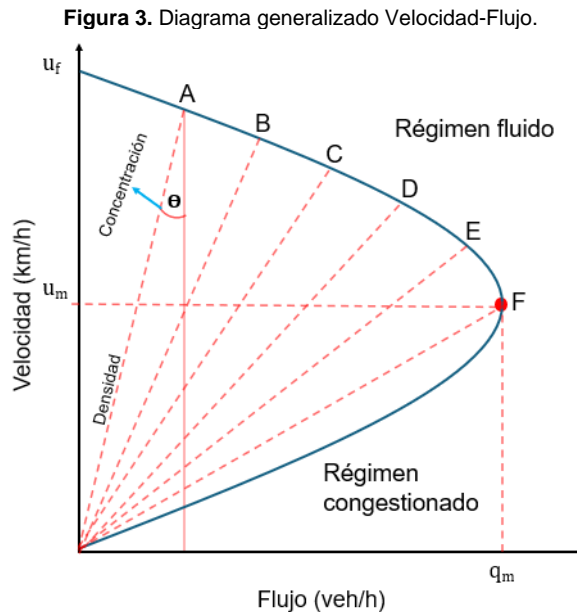
- En el régimen fluido o fase de carga de la carretera, la relación entre la velocidad media y el flujo es inversa, no necesariamente lineal. Es decir, en la medida que el flujo va aumentando la velocidad va disminuyendo debido a la reducción del espacio intervehicular de los vehículos. En el régimen congestionado, la carretera ha alcanzado su capacidad, se empiezan a formar filas de espera por lo que el flujo comienza a disminuir al igual que la velocidad del conjunto de vehículos en la medida que se siga cargando la carretera hasta el punto donde todos los vehículos están detenidos. En esta situación tanto la velocidad como el flujo es nulo.
- La concentración es el resultado de la relación del flujo entre la velocidad (ver **Ecuación 2**). En este diagrama se presenta por la línea cuya pendiente está definida por la proyección en el eje horizontal del flujo y la proyección de la velocidad media en el eje vertical. Al tratarse de un triángulo rectángulo, el ángulo complementario es el que se forma desde el origen por la proyección de la velocidad entre el flujo que es el inverso del ángulo correspondiente a la concentración y que por definición es la densidad. Así, cada línea con pendiente trazada desde el origen y que interseca la curva de la relación flujo-velocidad corresponde a la densidad. Este concepto generalmente se emplea para determinar los niveles de servicios.

**Ecuación 2.** Concentración.

$$k = \frac{q}{u}$$

- Las condiciones de circulación se pueden analizar mediante el concepto de Nivel de Servicio. Este evalúa las condiciones operativas en términos de comodidad y conveniencia para los usuarios a partir de las velocidades y flujos. En general, se consideran seis niveles de servicio (A, B, C, D, E, F). Con velocidades cercanas a la velocidad a flujo libre y flujos vehiculares bajos, la percepción de los usuarios es muy favorable (nivel de servicio A), describiendo las condiciones de flujo completamente libre. Cuando la carretera se encuentra cercana a su capacidad ( $q_m$ ), los flujos empiezan a

ser inestables y los vehículos experimentan breves rachas de movimiento seguido de detenciones propiciando la formación de filas (nivel de servicio F), esto representa el flujo forzado o de ruptura el cual marca la transición hacia el régimen congestionado.



Fuente: Elaboración propia.

### 1.2.3 Concepto de capacidad

**Capacidad:** Para comprender la variabilidad en la capacidad, diversos investigadores han analizado múltiples definiciones de este concepto. Según Agyemang-Duah y Hall (1991), los valores de capacidad son los máximos valores de flujo en un periodo de 15 minutos.

Persaud y Hurdle (1991) recomendaron que el flujo medio de descarga de la fila (la cantidad de vehículos que pueden pasar por una ubicación específica en un período de tiempo determinado) es el valor de capacidad más apropiado debido a la consistencia que observaron en su mediciones a lo largo del tiempo.

Minderhoud et al. (1997) considera teorías estocásticas para estimar la capacidad proponiendo una distribución normal para describir su variación. Además, sugiere que los valores de capacidad pueden estudiarse de manera

más integral a partir de la descomposición del proceso. Es decir, en análisis de la transición de condiciones de flujo libre a condiciones de congestión.

De lo anterior se considera que la capacidad representa la característica de un segmento transversal de una carretera para atender un flujo vehicular máximo en un periodo de tiempo (comúnmente 15 minutos) y que esta se mantenga en condiciones operativas estables. La capacidad se estima bajo las condiciones prevalecientes del diseño geométrico (oferta) y la composición del tránsito (demanda vehicular), las fluctuaciones que puedan ocurrir entre estos dos componentes de la circulación corresponden a diferentes niveles de servicio.

La capacidad máxima de una carretera es un caudal que puede ser alcanzado repetidamente durante diferentes periodos horarios con demandas pico. Lo anterior significa que la capacidad es distinta al caudal máximo absoluto que pueda ser observado.

Las condiciones prevalecientes de la capacidad en una carretera son afectadas directamente por factores de composición geométrica como: número de carriles, tipo de infraestructura, entorno, anchos de carril, acotamientos, hombros, velocidad de diseño, alineaciones horizontales, alineaciones verticales, carriles exclusivos de giro o incorporaciones, topografía y de las condiciones del tráfico como la composición vehicular y su distribución direccional por carril. Las características mencionadas anteriormente son abordadas en el capítulo **2.1.2 Caracterización de las condiciones de circulación prevaleciente en la carretera de estudio.**

#### **1.2.4 Capacidad según el HCM**

De acuerdo con el HCM 2010 la capacidad representa el caudal horario máximo sostenible al que se puede esperar razonablemente que personas o vehículos atraviesen un punto, zona uniforme, sección de un carril o carretera durante un período de tiempo determinado bajo las condiciones físicas y geométricas presentes, ambientales, de tránsito y de control. La capacidad indicada para un elemento dado del sistema es un caudal que se puede alcanzar repetidamente



durante períodos pico de suficiente demanda, en lugar de ser el caudal máximo observado. Los elementos de un sistema que tienen diferentes condiciones predominantes tendrán diferentes capacidades, y el caudal máximo observado en un elemento determinado puede variar de un día a otro (TRB, 2010).

Es importante señalar que la metodología para estimar la capacidad y los niveles de servicio del HCM ha tenido 3 actualizaciones (1985, 2000 y 2010) desde su primera versión 1965 hasta la actual de 2010.

En la **Tabla 4** se presenta una comparativa general de la capacidad instalada determinada a partir de la metodología del manual HCM en sus diferentes versiones y algunas de las actualizaciones que este ha tenido, destaca que:

En el manual del año 1965 la capacidad se determina a partir de la velocidad promedio, volumen vehicular y de las características físicas restrictivas incorporadas en el diseño de un tramo de carretera como: ancho de carril, espacio libre lateral, acotamientos, carriles auxiliares, condiciones de la superficie de rodamiento, alineación y pendientes. De esta forma, el manual HCM 1965 establece los siguientes valores de capacidad:

- Para velocidades máximas de 90 km/h la capacidad es de 2,000 vehículos/h/carril.
- Para velocidades máximas de 80 km/h la capacidad es de 1,900 vehículos/h/carril.
- Para velocidades máximas de 65 km/h la capacidad es de 1,700 vehículos/h/carril.

En el manual del año 1985 la capacidad se determina a partir de las velocidades de diseño, la geometría en detalle, incluyendo: ancho de carril, distancias entre hombros, pendientes, longitud de las pendientes, y tipo de terreno, el volumen de tráfico existente en vehículos por hora el porcentaje de vehículos pesados. De esta forma, el manual HCM 1985 establece los siguientes valores de capacidad:

- Para velocidades de diseño de entre 110 y 90 km/h la capacidad es de 2,000 vehículos/h/carril.
- Para velocidad de diseño igual a 80 km/h la capacidad es de 1,900 vehículos/h/carril.

En el manual del año 2000 se realiza un ajuste en el cálculo de la capacidad introduciendo el concepto de velocidad a flujo libre. En el manual HCM 2000 se realizan ajustes en los parámetros tomados para el cálculo de la velocidad a flujo libre a partir de la **Ecuación 3**.

**Ecuación 3.** Velocidad a flujo libre FFS.

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A$$

Donde:

BFFS= velocidad máxima permitida (veh/h)

fLW= ajuste por ancho de carril, anexo 21-4 HCM 2000

fLC= ajuste por ancho de acotamiento, anexo 21-5 HCM 2000

fM= ajuste por tipo de cuerpo, anexo 21-6 HCM 2000

fA= ajuste por número de accesos, anexo 21-7 HCM 2000

Además de utilizar las características geométricas de la carretera también se realizan ajustes al volumen vehicular por el número de carriles, factores horarios y porcentaje de vehículos pesados. De esta forma, el manual HCM 2000 establece los siguientes valores de capacidad:

- 100 km/h = 2,200 vehículos/h/carril.
- 90 km/h = 2,100 vehículos/h/carril.
- 80 km/h = 2,000 vehículos/h/carril.
- 70 km/h = 1,900 vehículos/h/carril.

La metodología del manual HCM 2010 para el cálculo de la capacidad y niveles de servicio en carreteras de múltiples carriles es esencialmente la misma que en la versión del año 2000, aunque se agrega una recomendación de capacidad

para velocidades a flujo libre menores a 70 km/h ya que la metodología presentada por el manual está limitada y no cuenta con estudios empíricos del comportamiento de los flujos, capacidad y nivel de servicio para velocidades menores a lo presentado en el HCM. De esta forma, el manual HCM 2010 establece los siguientes valores de capacidad:

- 96.5 km/h = 2,200 vehículos/h/carril.
- 88.5 km/h = 2,100 vehículos/h/carril.
- 80.4 km/h = 2,000 vehículos/h/carril.
- 72.4 km/h = 1,900 vehículos/h/carril.
- <70 km/h = 1,400 vehículos/h/carril.

**Tabla 4.** Comparación de la capacidad calculada en diferentes versiones del HCM (1965, 1985, 2000 y 2010)

Capacidad manual HCM en carreteras de múltiples carriles	Descripción
<p>Fuente: HCM 1965.</p>	<p>Fuente: HCM 1985.</p>
<p>Fuente: HCM 2000.</p>	<p>Fuente: HCM 2010.</p>

### 1.2.5 El concepto del nivel de Servicio (LOS)

El nivel de servicio es una medida cualitativa del estado de la circulación que se le otorga a un tramo carretero. Esta medición toma en cuenta la percepción de los usuarios de las condiciones operativas con base en la densidad vehicular, velocidad, maniobrabilidad en la corriente del tránsito, interrupciones del flujo continuo y comodidad durante la conducción.

Si el flujo vehicular es menor que la capacidad de la carretera, el flujo vehicular se encuentra dentro del rango estable (ver **Figura 4**) no congestionada. Los conductores tienen libertad para circular a la velocidad deseada, sin tener que aglomerarse y las filas son inexistentes.

**Figura 4.** Flujo estable, demanda menor que la oferta.



Fuente: Flujo Vehicular autopista México-Puebla. (s. f.). <https://www.adn40.mx/>

Cuando el flujo vehicular se acerca la capacidad de la carretera, se nota una disminución en el nivel de comodidad y conveniencia, aunque el rango del flujo continua estable (ver **Figura 5**), la circulación de los conductores (velocidad y libertad de maniobra) se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros usuarios.



Figura 5. Demanda vehicular cerca de la capacidad.



Fuente: Flujo Vehicular. (s. f.). <https://www.aionsur.com>

Cunando el flujo vehicular es igual o mayor que la capacidad de la carretera, las condiciones de circulación son inestables iniciando con ello el régimen saturado (ver **Figura 6**), las velocidades son seriamente restringidas, se presentan formación de filas y tiempos de espera para circular.

Figura 6. Flujo inestable, demanda igual o mayor que la oferta.



Fuente: Tráfico en la autopista México-Puebla. (s. f.). <https://www.elsoldepuebla.com.mx/>

Se presentan los seis niveles de servicio que han sido implementados en el manual HCM 2010 (TRB, 2010):

- **Nivel de servicio A:** los automovilistas transitan con velocidades de operación cercanas o iguales a la velocidad de flujo libre (FFS), controlada



principalmente por las condiciones de la carretera. Es raro observar pelotones de 3 o 4 vehículos,

- **Nivel de servicio B:** el grado de formación de pelotones se hace notorio y reducciones de velocidad relativamente pequeña ya que se vuelve difícil mantener la operación de velocidad de flujo libre,
- **Nivel de servicio C:** la mayoría de los vehículos viajan en pelotones y las velocidades son notablemente restringidas,
- **Nivel de Servicio D:** el pelotón aumenta significativamente, la capacidad de paso se aproxima a cero, esto representa una maniobrabilidad nula de los conductores,
- **Nivel de servicio E:** la demanda se acerca a la capacidad de la carretera, el factor de porcentaje de zonas de no rebase es más del 80%, la velocidad es menos de dos tercios de la velocidad a flujo libre y
- **Nivel de servicio F,** se presenta cuando el flujo de demanda en una o ambas direcciones exceda la capacidad del segmento. Las condiciones de operación son inestables y pesadas.

### 1.3 Métodos y procedimientos para el cálculo de la capacidad

Como se ha referido anteriormente (ver sección **1.2.3 Concepto de capacidad**) la capacidad debe determinarse durante un periodo de tiempo en que se mantengan ciertas condiciones de circulación. Igualmente, en el HCM 2010, se reconoce que la capacidad en las carreteras no siempre es constante y puede fluctuar por diversos factores. Por lo tanto, es crucial analizar y evaluar distintos métodos para estimar la capacidad de una carretera. Estos métodos permiten comprender mejor cómo la capacidad se adapta a las condiciones cambiantes del tráfico y del entorno.

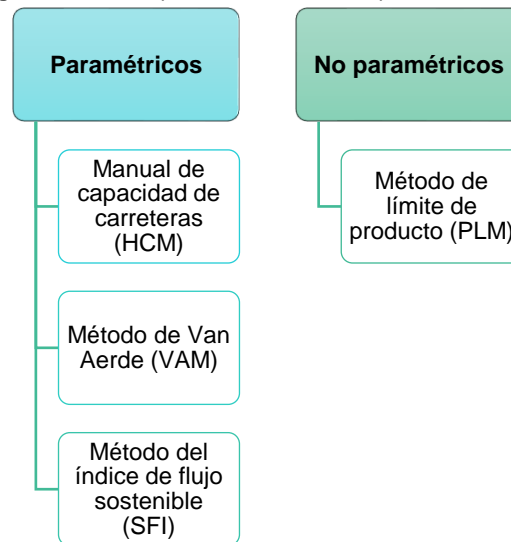
Después de la revisión de la literatura, se obtuvo que estos métodos se pueden dividir en paramétricos y no paramétricos. Los primeros corresponden a una función específica cuyos parámetros son conocidos y se estiman a través de diversos métodos estadísticos en tanto que en los segundos tratan de identificar

comportamientos determinados por segmentos o grupos ya que no emplean funciones de distribución conocidas o específicas. Posteriormente, se procedió a seleccionar los métodos a comparar utilizando los siguientes criterios:

- **Compatibilidad** con la teoría macroscópica del flujo vehicular, es decir que el cálculo de capacidad fuera compatible con las variables flujo, velocidad y concentración,
- **Aplicabilidad** respecto a que sean métodos conocidos basados en datos empíricos colectados en campo durante un periodo de tiempo determinado,
- **Simplicidad** en el proceso de cálculo y estimación de la capacidad.

Finalmente, se seleccionaron tres métodos paramétricos y uno no paramétrico (ver **Figura 7**) que se describen a continuación:

Figura 7. Métodos para el cálculo de la capacidad.



Fuente: Elaboración propia.

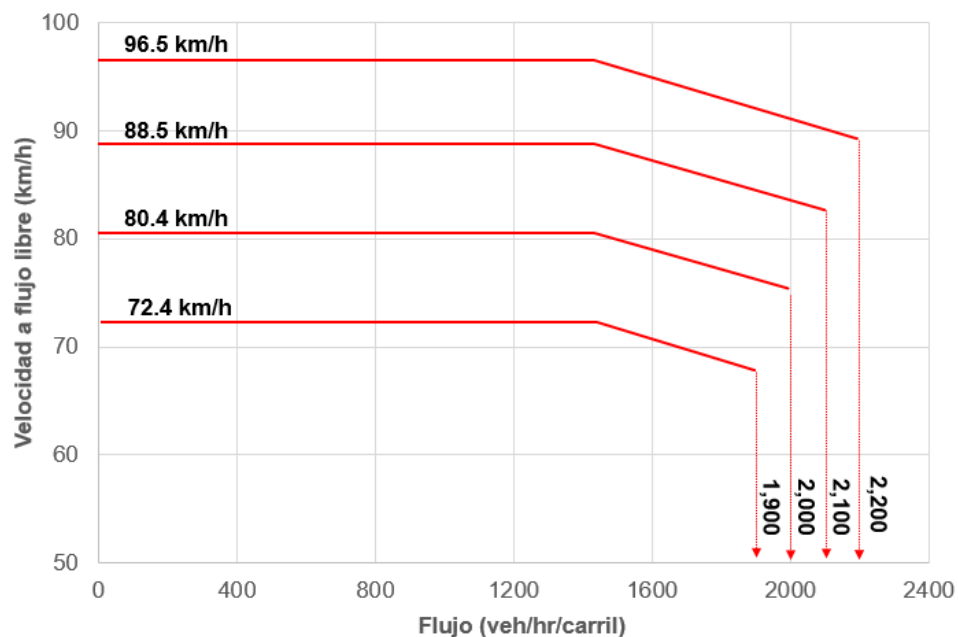
**Método del HCM:** El manual HCM (TRB, 2010) proporciona un conjunto único de valores de capacidad el cual puede ser tomado para segmentos de autopistas con relación a la velocidad a flujo libre, si bien dichos valores son considerados como una fuente normativa para carreteras ubicadas en Norte América, presenta algunas limitantes para transferirse al caso mexicano cuando las velocidades

permitidas o velocidades a flujo libre son menores a las del nomograma como puede verificarse en la **Figura 8**. Este nomograma representa la relación macroscópica de velocidad-flujo, dicha relación se utiliza para determinar la capacidad en función de la velocidad a flujo libre.

Como ya se mencionó en el capítulo **1.2.4 Capacidad según el HCM** la capacidad está establecida para rangos de velocidades a flujo libre de entre 96.5 km/h y 72.4 km/h (60 mi/h – 45 mi/h).

A pesar de mencionar que para velocidades a flujo libre menores a 70 km/h la capacidad queda establecida por 1,400 veh/h/carril no es un valor que pueda ser tomado como una representación uniforme y así caracterizar cualquier velocidad inferior o superior a los rangos dictaminador por el HCM.

**Figura 8.** Grafica velocidad-flujo para cerretas de carriles múltiples.



Fuente: Elaboración propia a partir del Anexo 14-2 HCM 2010.

**Método de Van Aerde (VAM):** Van Aerde (1995) propuso una función matemática paramétrica basada en la teoría de seguimiento o persecución vehicular. Dicha función supone que, al igual que la teoría macroscópica, la densidad es función de la velocidad actual y la velocidad del flujo libre, obteniendo así una relación lineal entre velocidad y densidad. El resultado de la capacidad

del método VAM describe diferentes estados del tráfico como: el flujo libre, congestionado y cuellos de botella. La fórmula de Van Aerde estima la capacidad independientemente de las configuraciones de los regímenes congestionados y no congestionados con el empleo de tres parámetros. El modelo requiere representar una curva para estimar la relación en el diagrama de velocidad-flujo (ver **Figura 9**) de las variables macroscópicas a través de la **Ecuación 4**.

**Ecuación 4.** Método VAM.

$$q_1 = \frac{u_i}{c_1 + \frac{c_2}{FFS - u_i} + c_3 u_i}$$

Donde:

$q_i$  = capacidad en el intervalo  $i$  (veh/h)

$u_i$  = velocidad en el intervalo  $i$  (km/h)

FFS = velocidad de flujo libre(km/h)

$c_1$  = parámetro de distancia avance

$c_2$  = primer parámetro de avance variable

$c_3$  = segundo parámetro de avance de distancia variable

La ecuación representa una combinación de un término constante y un término que depende de la diferencia entre la velocidad y la velocidad de flujo libre un momento determinado. La capacidad se analiza con un enfoque estocástico para estimar una función de distribución basada en datos obtenidos en campo. Para estimar los parámetros del modelo matemático, se emplean las siguientes ecuaciones (ver **Ecuación 5**, **Ecuación 6**, **Ecuación 7** y **Ecuación 8**).

**Ecuación 5.** Rango de velocidades.

$$m = \frac{2u_i - u_f}{(u_f - u_i)^2}$$

Donde:

$m$  = rango de velocidades

$u_i$  = velocidad observada (km/h)

$u_f$  = Velocidad a flujo libre (km/h)

**Ecuación 6.** Parámetro de distancia avance.

$$c_1 = m * c_2$$

Donde:

$c_1$  = Parámetro de distancia avance

$m$  = rango de velocidades

$c_2$  = Primer parámetro de avance variable

**Ecuación 7.** Primer parámetro de avance variable

$$c_2 = \frac{1}{k_j(m + \frac{1}{u_f})^2}$$

Donde:

$c_2$  = Primer parámetro de avance variable

$k_j$  = densidad en el intervalo  $i$  (veh/h)

$m$  = rango de velocidades

$u_f$  = Velocidad a flujo libre (km/h)

**Ecuación 8.** Segundo parámetro de avance de distancia variable.

$$c_3 = \frac{-c_1 + \frac{u_i}{q_i} - \frac{c_2}{u_f} - u_i}{u_i}$$

Donde:

$c_3$  = Segundo parámetro de avance de distancia variable

$u_i$  = velocidad observada (km/h)

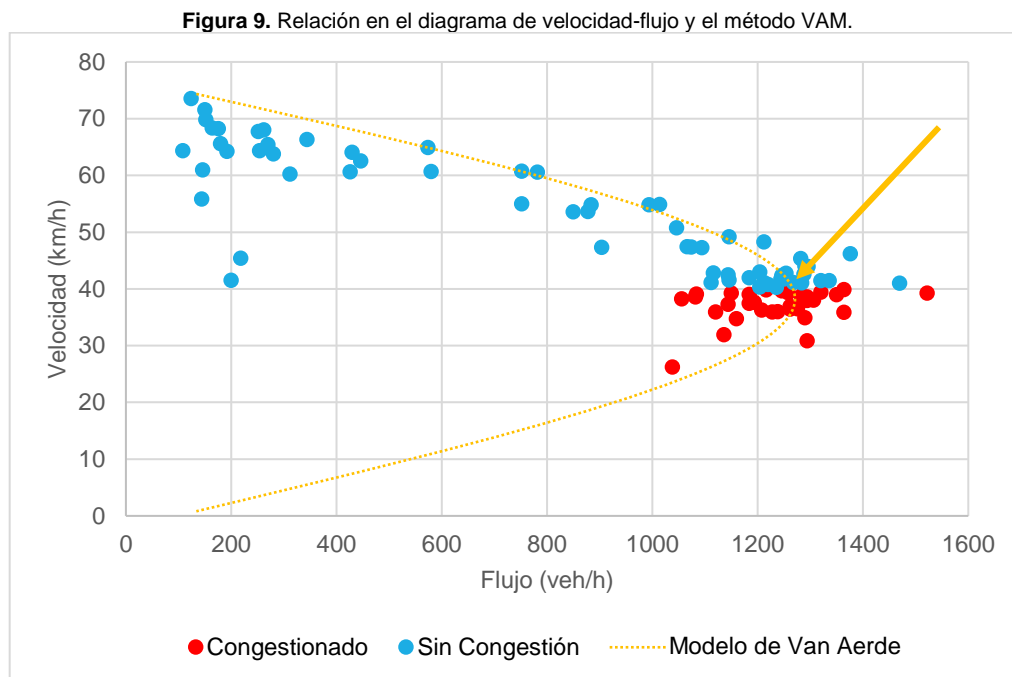
$q_i$  = flujo en el intervalo  $i$  (veh/h)

$u_f$  = Velocidad a flujo libre (km/h)

El procedimiento consta de los siguientes pasos:

- I. Recopilar los datos de entrada (características geométricas, velocidad, flujo, composición vehicular).
- II. Calcular la velocidad de flujo libre.
- III. Calcular y calibrar los parámetros del modelo.
- IV. Calcular la capacidad de cada intervalo en periodos de 15 minutos.
- V. Trazar la curva velocidad-flujo.
- VI. La capacidad se obtiene gráficamente a partir del mayor valor observado dentro del rango estable o sin congestión a partir del modelo de Van Aerde.

La interpretación de la **Figura 9** ha sido abordada en el capítulo **1.2.2 Relaciones macroscópicas**.



Fuente: Elaboración propia.

**Método límite de producto (PLM):** La metodología del PLM se basa en las curvas de Kaplan-Meier (Kaplan, E. L.; Meier, P, 1958), utilizadas principalmente en el área de medicina para calcular las tasas de supervivencia de vida de un paciente que enfrenta algún tipo de enfermedad. Este método estima la probabilidad de que un evento ocurra dentro de un tiempo determinado (curva de supervivencia). El método se ha aplicado ampliamente en la teoría del flujo vehicular para obtener la distribución de la capacidad respecto al tiempo

determinando cuándo la capacidad de una carretera colapse. Zhao y Laurence (2015) explican que el método PLM depende de la estadística no paramétrica para evaluar la variación en los valores de capacidad ya que el punto más importante para su aplicación es identificar los eventos de “avería” o “falla” en los segmentos de la carretera que se esté estudiando. Estos eventos a menudo se detectan al reconocer disminuciones de la velocidad por debajo de las velocidades óptimas, alteraciones abruptas en las medidas o relaciones del flujo de tráfico. La estadística del análisis de datos de la curva de supervivencia se utiliza para predecir funciones de distribución basadas en muestras que contienen los datos censurados obtenidos en campo. La función de distribución de capacidad está definida por la **Ecuación 9**.

**Ecuación 9.** Método PLM.

$$F_c(q) = 1 - S_c(q) = 1 - \prod_{i:q_j < q} \frac{k_i - 1}{k_i} \quad i \in \{B\}$$

Donde:

$F_c(q)$ = función de distribución de la capacidad acumulada

$S_c(q)$ = función de supervivencia de la capacidad

$q$ = volumen de tráfico observado (veh/h/carril)

$q_j$ = volumen antes del punto de saturación

$k_i$ = número de intervalos con un volumen  $q \geq q_j$

$B$ = conjunto de intervalos

El proceso del cálculo de la capacidad por el método PLM es el siguiente:

- I. Ordenar el flujo y la velocidad en intervalos de 15 minutos. Se identifican y borran todos los datos en el intervalo donde suceda un evento de avería o falla.
- II. Agrupar los datos en incrementos de 15 veh/h. Contar el número de intervalos  $k_i$ .

- III. Calcular la capacidad de supervivencia con una probabilidad de ocurrencia del 95 % para cada incremento.
- IV. Trazar la curva de probabilidad de supervivencia con respecto al flujo.
- V. La capacidad se obtiene a partir del punto de quiebre de la curva graficada.

El Intervalo de Confianza (IC) al 95% refleja la incertidumbre en las estimaciones debido a la variabilidad inherente en los datos y proporciona una medida de la precisión de la estimación. La comparación de diferentes grupos de datos ayuda a determinar si existen diferencias significativas entre las curvas de supervivencia. El 95 % es un estándar muy utilizado en estimar las curvas de supervivencia por su confiabilidad y capacidad para representar la incertidumbre de las estimaciones.

**Método del índice de flujo sostenible (SFI):** Shojaat et al. (2017) introducen el método SFI como un complemento del método PLM. El índice de flujo sostenible es una medida estocástica del desempeño de una carretera, el método determina el flujo óptimo a partir de la capacidad obtenida por la función de supervivencia y la función de distribución de capacidad de Weibull. Se recomienda contar con un muestreo de datos amplio con el fin de compensar la estimación de la capacidad y así obtener datos confiables de las probabilidades de los eventos en régimen congestionado.

La metodología SFI define a la capacidad maximizada por el volumen vehicular y considerando la distribución de Weibull para la función de probabilidad de supervivencia ante un evento de falla o avería, la capacidad óptima se presenta a partir de la **Ecuación 10**.

**Ecuación 10.** Método SFI.

$$q_m = \beta * \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{1/\alpha}$$

Donde:

$q_m$  = capacidad óptima



$\beta$  = parámetro de forma de la distribución de Weibull (veh/h)

$\alpha$  = parámetro de escala de la distribución de Weibull

La distribución de Weibull se usa para analizar la confiabilidad, ya que representa la curva de riesgo o la probabilidad de que un elemento falle en un intervalo de tiempo. El volumen máximo obtenido a partir de la metodología SFI puede interpretarse como el compromiso entre maximizar el rendimiento y minimizar el riesgo de que la carretera se congestione.

A partir de valores convencionales de capacidad y el valor obtenido a partir del cálculo de la capacidad por el método PLM es posible obtener el parámetro de escala. De acuerdo con la publicación realizada por Shojaat et al. (2017), en condiciones estándar se puede asumir un parámetro de forma de  $\alpha = 22$ . No obstante, el parámetro de forma ( $\alpha$ ) es proporcional a la varianza de la función de distribución de capacidad. La varianza mide la dispersión o variabilidad de los datos alrededor de la media. La varianza de la función de distribución de capacidad está relacionada con la variabilidad en el tiempo hasta el colapso de una carretera.

#### 1.4 Procedimiento para el cálculo del nivel de servicio

Para determinar el nivel de servicio de carreteras de dos carriles en México generalmente se emplea la metodología del HCM correspondiente al capítulo carreteras de múltiples carriles. Es decir, se emplean las concentraciones de referencia que delimitan la frontera entre cada nivel de servicio. Es necesario aclarar que estos valores se han establecido de forma subjetiva en el HCM ya que como se mencionó secciones anteriores (**1.2.5 El concepto del nivel de Servicio LOS**) se trata de la caracterización de la percepción de los conductores sobre la calidad de la circulación. En el caso de México, se requiere verificar o replantear estos niveles de percepción con las escalas A-F. Este estudio queda fuera del alcance de esta tesis por lo que se tomará como referencia los valores de densidad del HCM, 2010 para determinar los niveles de servicio a pesar de que esta evaluación esté incompleta en ese sentido.

El proceso del cálculo del nivel de servicio tiene los siguientes pasos:

- I. Recopilación de las características geométricas y de datos de la demanda,
- II. Cálculo de la velocidad a flujo libre FFS,
- III. Ajuste del volumen presente en vehículos de carga y autobuses,
- IV. Estimación de velocidad y densidad,
- V. Determinación del nivel de servicio a partir de la **Tabla 5** (Anexo 14-4 del HCM 2010). En esta tabla se muestra la relación del nivel de servicio experimentado por los usuarios de acuerdo con las velocidades de circulación y densidades vehiculares.

**Tabla 5.** Anexo 14-4.

Nivel de servicio	Velocidad (km/h)	Densidad (veh/h/carril)
<b>A</b>	64.3-96.5	>0-11
<b>B</b>	64.3-96.5	>11-18
<b>C</b>	64.3-96.5	>18-26
<b>D</b>	64.3-96.5	>26-35
<b>E</b>	96.5	>35-40
	88.5	>35-41
	80.4	>35-43
	64.3	>35-45
<b>F</b>	96.5	>40
	88.5	>41
	80.4	>43
	64.3	>45

Fuente. HCM 2010.

## 1.5 Métodos de colecta de las variables macroscópicas y disponibilidad de datos empíricos

Existen varios métodos de colecta de las variables de tránsito. Los más comunes son de dos tipos: aforos con detección neumática y aforos con detección magnética. Con ellos se obtiene el flujo vehicular y la velocidad media, principalmente ya que la densidad o la concentración se obtiene de manera indirecta con la ecuación que relaciona las variables macroscópicas (ecuación 1).

**Aforos con detección neumática:** Son dispositivos que determinan por clase vehicular, la cantidad de vehículos y su velocidad individual a través de un contador automático que tiene canales donde se alojan tubos neumáticos que a su vez se fijan transversalmente a la dirección del flujo vehicular (ver **Figura 10**). Estos tubos son clausurados en el extremo opuesto a los canales manteniendo un nivel de presión determinado. Al paso de un vehículo se genera un diferencial de presión y un diferencial de tiempo de paso del vehículo. Estos dos valores son utilizados por el algoritmo del equipo para contar, clasificar el vehículo y determinar la velocidad individual. Según el tipo y configuración del contador, se obtienen reportes agregados por periodo de tiempo o por registro individual durante el tiempo que dure el aforo.

Figura 10. Equipo de aforo neumático.



Fuente: Traffic Counters & Classifiers. (s. f.). <https://metrocount.com/es>

**Aforos con detección magnética:** Su funcionamiento se basa en la distorsión de un campo magnético causado por el paso de un vehículo sobre una bobina o sensor magnético en la carretera, esta alteración genera un impulso eléctrico que

se registra como una señal de detección (ver **Figura 11**). Existen diversos tipos de equipos de detección magnética con diferentes sistemas y modos de operación. El funcionamiento de estos equipos se centra básicamente en la bobina o sensor magnético el cual se instala en la superficie de la carretera o bajo ella y la electrónica de detección la cual procesa la señal generada por la bobina y la convierte en datos útiles, como la velocidad del vehículo, cantidad y clasificación de vehículos.

**Figura 11.** Equipo de aforo magnético.



Fuente: Detector de bucle magnético. (s. f.). <https://access.erreka.com>

## 2 Descripción del estudio de caso

El periodo de levantamiento de información en campo se realizó entre los días 29 de agosto al 04 de septiembre del 2022. Se obtuvo una muestra de datos de aforos individuales (por vehículo) con clasificación vehicular con registros de 7 días durante 24 horas para una carretera de dos carriles por medio de un aforo neumático. Se levantaron las características geométricas prevalcientes en la carretera, se integró una base de datos y se establecieron diferentes niveles de agregación temporal para la aplicación de los supuestos de la teoría macroscópica del flujo vehicular. Se realiza el análisis de oferta-demanda del entorno y se identificaron los efectos potenciales sobre la circulación. Por último, se analizan los diagramas bidimensionales de las variables macroscópicas del tránsito (flujo, velocidad y concentración), se estima la capacidad y el nivel de servicio.

### 2.1 Caracterización de la oferta de transporte.

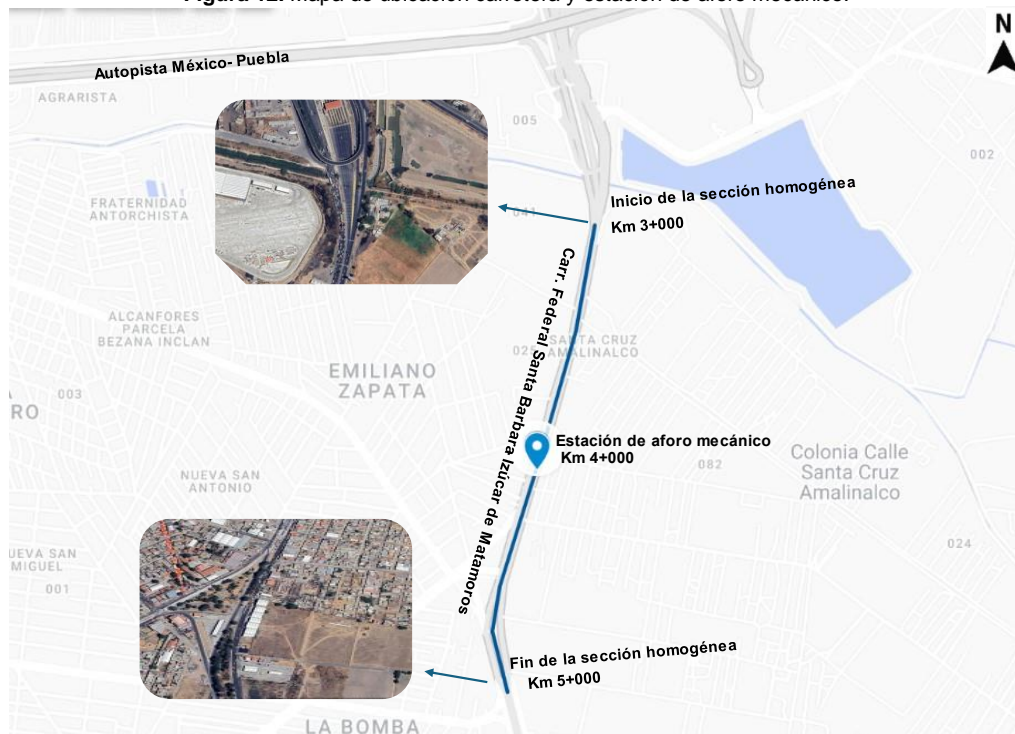
#### 2.1.1 Ubicación

La estación de aforo mecánico se ubicó en el kilómetro 4+000 de la carretera federal Santa Barbara - Izúcar de Matamoros, ruta: MEX-115-160 y clave: 00451 de acuerdo con datos viales de la SICT (SICT, 2023). El tramo de estudio se encuentra en terreno plano al nororiente del municipio de Chalco, Estado de México. En la fecha del aforo el tramo contaba con 2.0 kilómetro de sección homogénea compuesta por dos carriles por sentido separados por un muro de contención en la parte central y un retorno de Cuautla hacia Chalco con un carril de desaceleración e incorporación conforme al sentido de circulación. Actualmente, en septiembre de 2024, el tramo ha tenido algunas modificaciones debido a la incorporación de los carriles confinados al centro del tramo y el desplante de un paso superior elevado para la operación del trolebús Chalco-La Paz. Por otra parte, el retorno referido ha sido suprimido.

En la **Figura 12** se presenta un mapa con la ubicación del tramo referido de la carretera federal Santa Barbara - Izúcar de Matamoros. Está representada por la

línea en azul. Es importante notar que la sección transversal del tramo de estudio cambia por la incorporación hacia la autopista México-Puebla en el sentido Cuautla-Chalco-Ixtapaluca y la caseta de cobro de Ixtapaluca en tanto que el sentido contrario se tienen dos carriles de la incorporación de vías locales hacia la carretera y dos carriles en dirección Ixtapaluca-Chalco-Cuautla que convergen para formar dos carriles del cuerpo del tramo carretero. En el extremo sur del tramo de estudio, el flujo vehicular cambia por la desincorporación de la carretera hacia la avenida Cuauhtémoc que llega al centro de Chalco y la incorporación a la carretera de los vehículos que vienen del centro de Chalco hacia Cuautla.

Figura 12. Mapa de ubicación carretera y estación de aforo mecánico.



Fuente: Elaboración propia con mapa de googl earth.

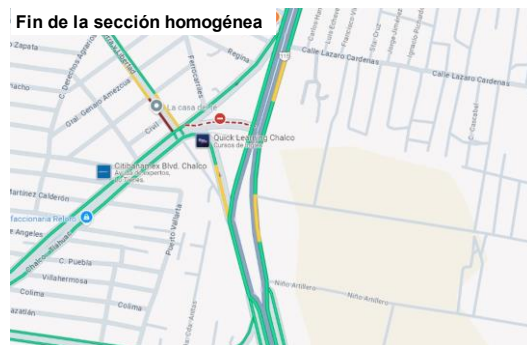
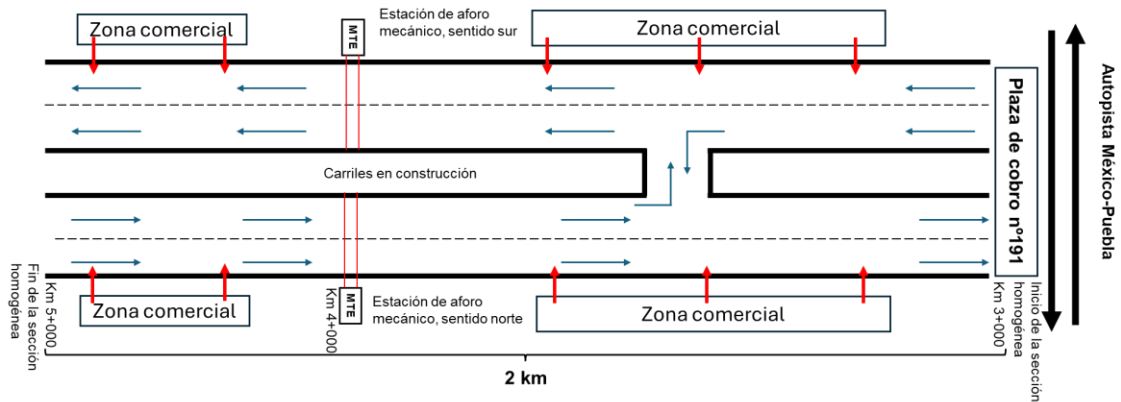
La **Figura 13** muestra un esquema del del sitio de estudio (fuera de escala). Se indican los elementos que inciden en la sección transversal y que podría tener algún efecto en los registros de las variables de tránsito colectadas con el equipo de aforo mecánico:

- Dentro de los 2 kilómetros de la zona de estudio, no se identificaron cruces peatonales autorizados (señalizados). Esta ausencia de infraestructura peatonal adecuada ha llevado a que los peatones crucen las calles sin precaución y por cualquier punto, lo que incrementa significativamente el riesgo de accidentes e interrumpiendo el flujo continuo.
- En el momento de colecta de información, operaba un retorno con un carril de desaceleración y almacenamiento el cual, en el caso de formación de filas, podría incidir sobre el flujo continuo, afectando las velocidades de circulación e induciendo cambios de carril dado que la señalización vertical y horizontal del retorno es bastante limitada.
- Se tiene registro de maniobras de entrada y salida de vehículos en las zonas de estacionamiento en las áreas comerciales ubicadas a lo largo de la zona de estudio. Estas operaciones carecen de un correcto control y señalamiento. En este caso, se trata del uso del derecho de vía a lo largo del trazo. Las incorporaciones y salidas de la vía tendrían un efecto marginal sobre la circulación, aunque si afectan por ciertos instantes el flujo continuo.
- Formación de filas en hora pico. La plaza de cobro de Ixtapaluca se ubica 500 metros al norte de la terminación del tramo de estudio. Su operación representa una reducción de la capacidad aguas abajo de la sección analizada por lo que en períodos pico se forman filas de espera que reducen la velocidad de circulación en el tramo. Es por ello, que los datos deben interpretarse con atención por este efecto sobre la velocidad en los períodos críticos del día.
- Obras de construcción del trolebús Santa Marta – Chalco. Durante el levantamiento de la información se iniciaron los trabajos de preparación del carril reservado para el trolebús. Aunque el inicio de obras era incipiente, se tenía señalización vertical y avances de construcción en la avenida Cuauhtémoc. La señalización posiblemente haya incidido en la



reducción de la velocidad de los conductores sobre todo del margen izquierdo del tramo de estudio en dirección Chalco-Cuautla.

Figura 13. Caracterización del sitio de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.2 Caracterización de las condiciones de circulación prevalente en la carretera de estudio

Las condiciones prevalentes de circulación en una carretera están relacionadas con tres factores principalmente:

**Las características geométricas**, estas incluyen: el tipo de terreno, la cantidad de carriles, ancho de carril, la separación de los cuerpos por sentido de circulación, el ancho de acotamiento, el tipo de terreno, entre otros.

**Las características del tránsito** se refieren al tipo de circulación (flujo continuo o interrumpido), la composición vehicular, la distribución temporal, espacial y direccional del tránsito,



**Las características de regulación**, estas hacen referencia dispositivos de control y seguridad de tránsito, tales como señalamiento vertical, señalamiento horizontal, semáforos, restricciones de circulación, restricciones y límites de velocidad.

En la **Figura 15** se presenta un cuadro resumen de las características prevaecientes de la circulación en el tramo de estudio. El levantamiento de estas características se realizó mediante recorridos en la zona de estudio y toma de medidas con odómetro, como se muestra en la **Figura 14**.

**Figura 14.** Levantamiento de las condiciones de circulación



Fuente: Elaboración propia.

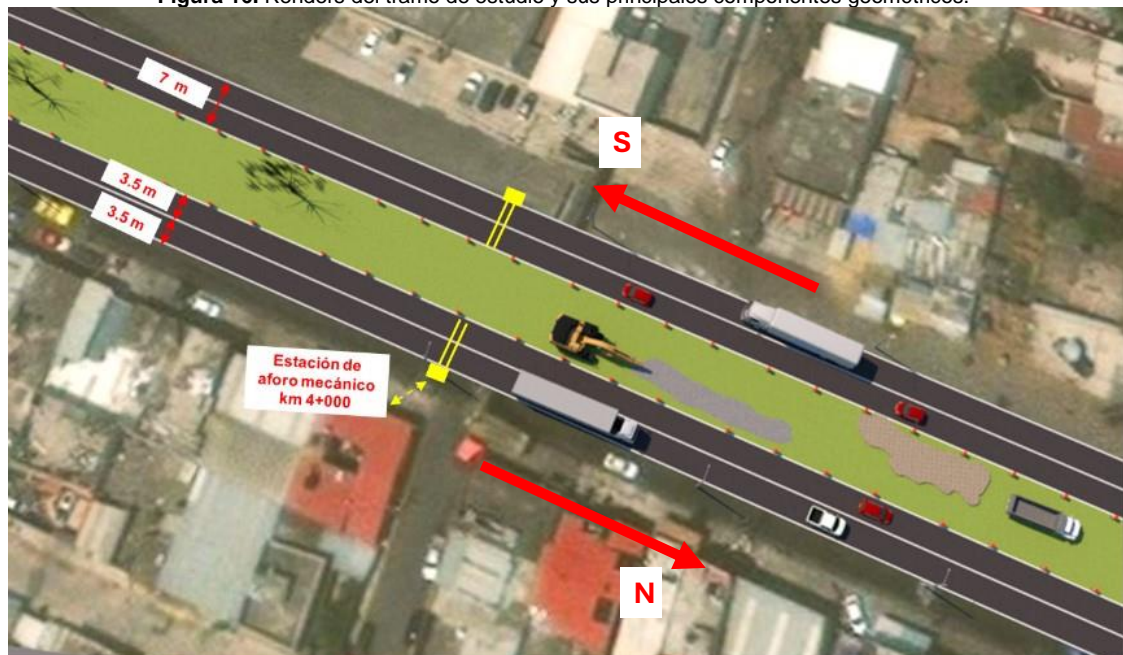
**Figura 15.** Resumen de las condiciones de circulación prevaleciente en la carretera de estudio.

Condiciones prevalecientes		
Características geométricas	Condiciones del tránsito	Condiciones de los controladores
Tipo de cuerpo: Mixto (Un solo cuerpo y cuerpos separados)	Flujo continuo	Señalamiento vertical: Poca presencia de señales restrictivas, preventivas e informativas
Número de carriles: 2 por sentido	Composición vehicular: 83% automóviles	Señalamiento horizontal: Marcas delimitadoras y botones en mal estado (falta de mantenimiento)
Ancho de carril: 3.50 metros	Hora pico: 18:00	Sin semáforos
Sin acotamiento		Sin restricciones de circulación
Velocidad máxima: 80 km/hr		
Carriles confinados en obra		
Sin carriles de rebase		
Terreno plano		

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 16** se incluyen renders que representan las condiciones de circulación prevaleciente cuando se instaló el equipo de aforo mecánico con neumáticos. Estas figuras incluyen los componentes geométricos relevantes del tramo de estudio de 2 kilómetros.

**Figura 16.** Renders del tramo de estudio y sus principales componentes geométricos.





Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 17** se muestra un esquema conceptual (fuera de escala), resalta las particularidades o problemas que presenta el entorno en ubicaciones específicas. Podemos notar:

Primero, la interacción del tramo de estudio con la autopista México-Puebla y principalmente con la plaza de cobro 191 Ixtapaluca indican problemas de flujo congestionado o tráfico debido a la formación de filas en horas pico provocando efectos en las lecturas de las variables macroscópicas que se registran aguas abajo. En efecto, el flujo puede disminuir significativamente debido a que los vehículos se desplazan más lento, las densidades pueden aumentar significativamente debido a que los vehículos están más juntos, ocupando más espacio en la carretera y la velocidad promedio disminuye considerablemente ya que los conductores deben frenar y acelerar constantemente. Estos efectos, en todo caso se observarán en el régimen congestionado.

Segundo, el retorno localizado en el tramo de estudio puede interrumpir el flujo constante de vehículos, especialmente si este no se diseña adecuadamente y sin considerar las necesidades del entorno, esto puede llevar a congestiones y retrasos. Los retornos pueden generar problemas en la continuidad de la circulación si este no cuenta con las zonas de transición necesarias, los vehículos que se incorporan pueden ocasionar accidentes. Estos problemas en la circulación, también se encuentran en las incorporaciones de la Avenida Cuauhtémoc Poniente, ya que, estos accesos no cuentan con carriles de

incorporación. La Avenida Cuauhtémoc Poniente, conecta al oriente con el poniente y el centro de Chalco.

Por último, a lo largo de la carretera federal Santa Barbara – Izúcar de Matamoros se ubicó la presencia de locales comerciales y de servicios que obstaculizan el flujo vehicular. Los vehículos que entran y salen de los locales interrumpen el flujo de tráfico en la carretera, especialmente por la nula presencia de carriles de desaceleración o acotamientos. También se notó que en algunos puntos los vehículos se estacionan cerca de los locales comerciales, reduciendo la cantidad de carriles disponibles. Los letreros y otras estructuras de los locales comerciales obstruyen la visibilidad de los conductores, también atraen a un gran número de peatones, lo que puede aumentar el riesgo de accidentes entre vehículos y peatones debido a la ausencia de cruces peatonales accesibles, señalizados y con elementos de seguridad vial.

Figura 17. Esquema del tramo con particularidades del entorno.



Fuente: Elaboración propia.



### 2.1.3 Colecta de datos

El registro y clasificación de vehículos en el tramo de estudio se realizó con equipos mecánicos con tubos neumáticos. Se utilizaron equipos de la marca MetroCount (ver **Figura 18**). Para coleccionar la información se requiere realizar un procedimiento de instalación y monitoreo mismo que se resumen a continuación en 5 pasos.

**Figura 18.** Dispositivo de aforo automático.



Fuente: Traffic Counters & Classifiers. (s. f.). <https://metrocount.com/es>

- I. **Configurar el equipo.** Con el software MetroCount Traffic se configuran y calibran los equipos de aforo, se establecen las unidades de medida, el tipo de clasificación vehicular, el estado de memoria y la batería. Finalmente, se establece la ruta de descarga de información,
- II. **El aseguramiento de la zona de estudio.** Una vez seleccionado el sitio más conveniente para instalar el equipo de medición, se garantizará la seguridad del personal que fijará los tubos neumáticos en la superficie de rodamiento. Este aseguramiento consiste en brindar la mayor seguridad posible a los técnicos de instalación sin interrumpir el tránsito en el tramo donde se instalarán los tubos neumáticos. Para ello, se colocan dispositivos de seguridad conforme al Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad 2014 de la SICT. Estos dispositivos y señalamientos se colocan estratégicamente para que los conductores identifiquen el área de trabajo a una distancia segura y cambie de carril oportunamente extremando precauciones (ver **Figura 19**).

**Figura 19.** Señalamiento para desvío de vehículos.



Fuente: Elaboración propia.

- III. **Instalación de tubos neumáticos**, una vez asegurada la zona se procede a colocar las mangueras neumáticas en el punto seleccionado como se observa en la **Figura 20**, este procedimiento consta de colocar pedazos de cueros clavados al pavimento, cada 1.5 metros a lo largo del tubo aproximadamente, de tal manera que el cuero abrace la manguera y ejerza una presión, evitando así que la manguera se deslice, pero a la vez deje pasar el pulso ejercido por los vehículos que transitan por la zona.

**Figura 20.** Instalación de mangueras neumáticas.



Fuente: Elaboración propia.

- IV. **Supervisión y monitoreo.** Se realiza un monitoreo regular constante del estado físico de los tubos neumáticos y de la veracidad de los registros.

Se verifica que el tipo de vehículo que cruza por los tubos neumáticos corresponda al registro y clasificación que marca el equipo. En caso contrario, se fijan correctamente los tubos o en su caso se reemplaza (ver **Figura 21**).

**Figura 21.** Monitoreo y mantenimiento de equipos.



Fuente: Elaboración propia.

- V. **Integración de base de datos.** Terminado el período de colecta de información, se procede a descargar la información del equipo de conteo con el software, se procede a la validación de información y a integrar las bases de datos incluyendo variables auxiliares que permitirán agregar los registros individuales a diferentes niveles temporales y también desestacionalizar los registros para estimar el TPDA.

## 2.2 Descripción de las características del tránsito

En este apartado se describen las características del tránsito obtenidas de la campaña de colecta de información con la estación de aforos neumáticos. El equipo de conteo se instaló del 29 de agosto al 04 de septiembre del 2022 durante 24 horas por 7 días. La información presentada corresponde al promedio diario semanal excepto el TPDA que por definición se expresa en promedio diario anual.

**Clasificación vehicular.** Para describir la composición del tránsito, se emplea la clasificación de la SCT misma que utiliza 7 clases vehiculares conforme a la

**Tabla 6:**

**Tabla 6.** Clasificación vehicular.

Tipo de vehículo		Descripción	Imagen
A	A	Automóviles	
B	B	Autobuses	
CU	C2	Camiones Unitarios de 2 ejes	
CU	C3	Camiones Unitarios de 3 ejes	
CA1	T3S2	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes	
CA1	T3S3	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 3 ejes	
CA2	T3S2R4	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes y remolque de 4	

Fuente: Imágenes tomadas de la FHWA Scheme Vehicle Classification (ODOT, 2011).

### 2.2.1 TDPA

El Tránsito Diario Promedio Anual (TPDA) se refiere al volumen vehicular que pasa por un punto, sección de una carretera o vialidad al día correspondiendo al valor promedio de los volúmenes diarios registrados en un año.

Al procesar la base de aforo mecánico, que contiene los registros completos de 7 días durante 24 horas, se obtiene tránsito promedio diario semanal (TDPS).

**Factor de estacionalidad.** Para el cálculo del TDPA, se requiere de un Factor de Estacionalidad (FE) que refleje las condiciones de circulación presentes en el mes en que se realizó el estudio respecto a lo que sucede en todo el año. Este factor se obtuvo de las estaciones de conteo permanentes de la SICT. Se seleccionaron las casetas de Ixtapaluca y Chalco en la carretera MEX-150D México-Puebla, en la **Figura 22** se muestra la ubicación de las estaciones permanentes.



**Figura 22.** Ubicación estaciones permanentes SICT.



Fuente: Elaboración propia.

El FE mide la relación existente entre la intensidad media anual de los meses del año y la intensidad de un determinado mes. Los resultados de la intensidad del tránsito mensual para el mes de septiembre de las dos estaciones permanentes (212 y 213) utilizadas para desestacionalizar el aforo semanal obtenido se indica en la **Tabla 7**. Se indica el nombre de la carretera, el movimiento empleado, la caseta de cobro, el Punto Kilométrico (PK), el volumen de Tránsito Anual (VTA) y la intensidad del mes de interés (septiembre) expresado en porcentaje del VTA. Se podrá notar que esta intensidad para el mes en que se realizó el aforo es muy similar (8.2 y 8.4) por lo que se tomó el promedio de ambas lecturas que resulta de 8.3. Considerando que la participación de un mes promedio es de 1/12 (8.33%) el factor de estacionalidad resultó en 1.004.

**Tabla 7.** Datos viales SICT correspondientes a las estaciones permanentes utilizadas en la desestacionalización.

No.	Carretera	Movimiento	Clave	Caseta	PK	Sentido	VTA	Mes	% Volumen
212	México-Puebla	Chalco (Panasonic)-México	MEX-150D	Ixtapaluca	31.900	ambos	6,295,296	Septiembre	8.2
213	México-Puebla	México-Chalco	MEX-150D	Chalco	32.000	ambos	15,082,380	Septiembre	8.4
								<b>FE</b>	<b>1.004</b>

Fuente: Estaciones permanentes SICT.

**Estimación del TPDA.** Al disponer de los volúmenes vehiculares de una semana, el TPDA se obtiene multiplicando el TPDS por el FE.

En la **Tabla 8** se presenta el TDPA desagregado, en valores absolutos y relativos, para cinco clases vehiculares, por sentido de circulación; se indica también el factor de hora pico (K) y el factor de distribución direccional (D).

**Tabla 8.** TDPA estación de aforo mecánico km 4+000, ruta MEX-115-160.

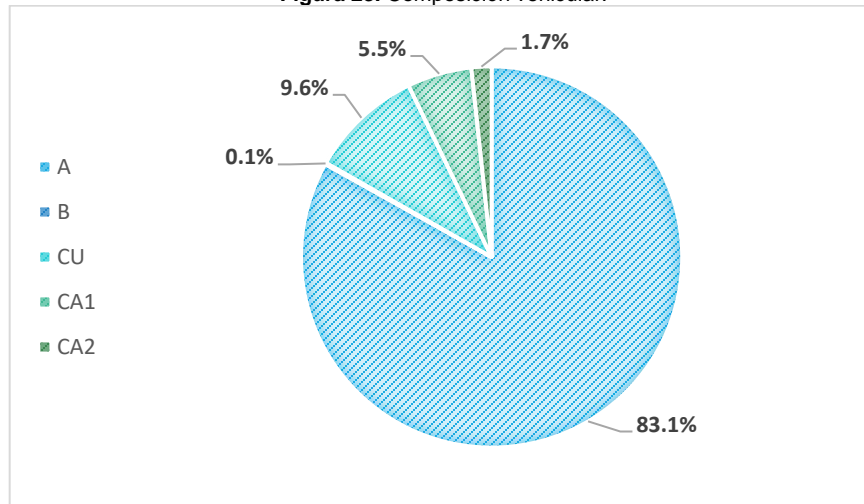
Lugar	TDPA		A	B	CU	CA1	CA2	K'	D
<b>Carretera Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros</b>	<b>68,855</b>	%	<b>83.1%</b>	<b>0.1%</b>	<b>9.6%</b>	<b>5.5%</b>	<b>1.7%</b>	0.057	0.503
		Total	<b>68,855</b>	<b>110</b>	<b>7,947</b>	<b>4,536</b>	<b>1,410</b>		
<b>Norte-Sur</b>	34,636	%	41.8%	0.05%	5.2%	2.8%	0.8%		
		Total	34,636	38	4,314	2,348	665		
<b>Sur-Norte</b>	34,219	%	41.3%	0.1%	4.4%	2.6%	0.9%		
		Total	34,219	72	3,633	2,188	745		

Fuente: Elaboración propia.

El TDPA obtenido es de 68,855 vehículos mismos que corresponden a una intensidad vehicular alta como se esperaba al elegir una carretera con alta ocupación. En tanto que, el factor de hora pico es de 8.5% del total diario con una distribución direccional más o menos homogénea.

**Composición vehicular.** En la **Figura 23** se indica la composición vehicular del TPDA en términos relativos. El vehículo predominante es el automóvil (83%), esto significa que más de 8 de cada 10 vehículos son autos. Lo siguen los vehículos de carga unitarios (9.6%), vehículos pesados de carga (7.3%) y en una proporción menor autobús (0.1%). Esta distribución es típica de carreteras de interurbanas, aunque la intensidad de los vehículos de carga es alta (más del 18%).

Figura 23. Composición vehicular.

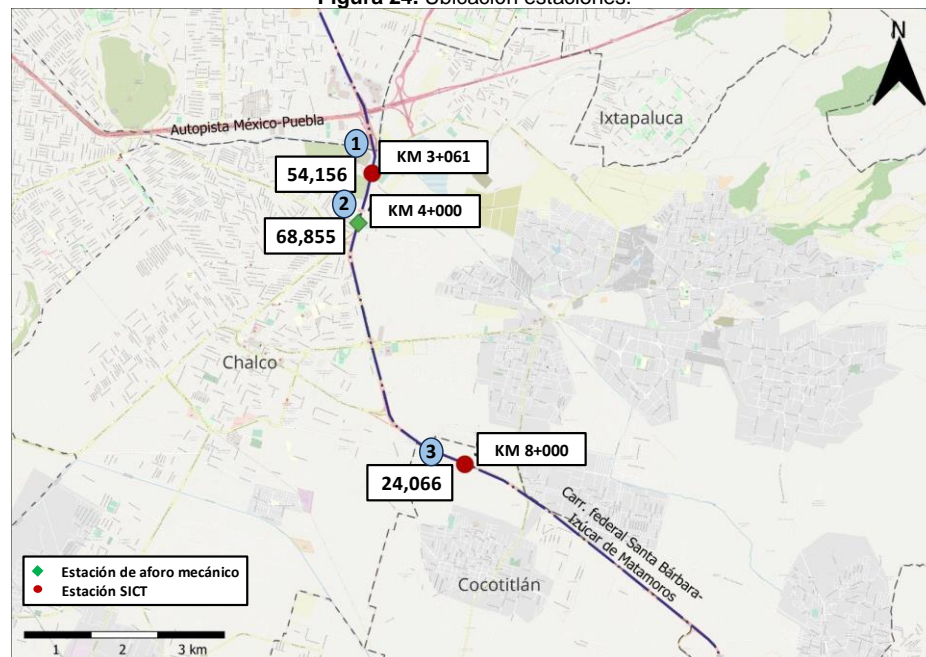


Fuente: Elaboración propia.

### Comparativa TPDA campo y datos viales.

Se cuenta con datos de estaciones de la SICT en los kilómetros 3+061 y 8+000, si bien la ubicación de las estaciones (ver **Figura 24**) de campo es distinta a la de datos viales SICT, se aprecia una diferencia relevante entre el TDPA.

Figura 24. Ubicación estaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Los cambios en el volumen vehicular se deben a distintos factores, principalmente el año del registro y la composición vehicular del tránsito por la

vocación del tramo de registro de la estimación permanente y en su caso, la proximidad de la zona urbana de Chalco.

En la **Figura 25** se muestra el entorno de la estación de la SICT ubicada en el km 3+061, el alto volumen vehicular (54,156 vehículos) se debe a que la estación está ubicada en la plaza de cobro n°191 que conecta el flujo de la carretera con Ixtapaluca, la CDMX, la autopista México-Puebla (de forma directa) y el Circuito Exterior Mexiquense (de forma indirecta), siendo estas última muy relevantes por su importancia estratégica para la logística del país conecta al centro con el Golfo de México. El registro de la caseta es inferior al TPDA obtenido, por dos razones. Primeramente, porque esta estación permanente solo registra los vehículos que se dirigen hacia Ixtapaluca omitiendo el registro de los vehículos que se dirigen hacia Puebla. Por otro lado, se tiene una diferencia de un año entre el registro de la estación permanente y el aforo ya que los datos viales corresponden al año inmediato anterior de la fecha de publicación. Finalmente, el efecto de la recuperación poscovid también tiene un efecto considerable entre el TPDA de un año a otro como es el caso.

**Figura 25.** Estación km 3+061.



Fuente: Google earth.

En la **Figura 26** se muestra el entorno de la estación de la SICT ubicada en el km 8+000, el volumen disminuye drásticamente respecto al TPDA estimado (44,790 vehículos). Esta variación se debe al tipo de tránsito que se registra en esa estación que es generalmente de largo recorrido con dirección a Cuautla y

localidades del entorno. En efecto, la estación se ubica antes de la entrada a la zona urbana de Chalco.

Figura 26. Estación km 8+000.

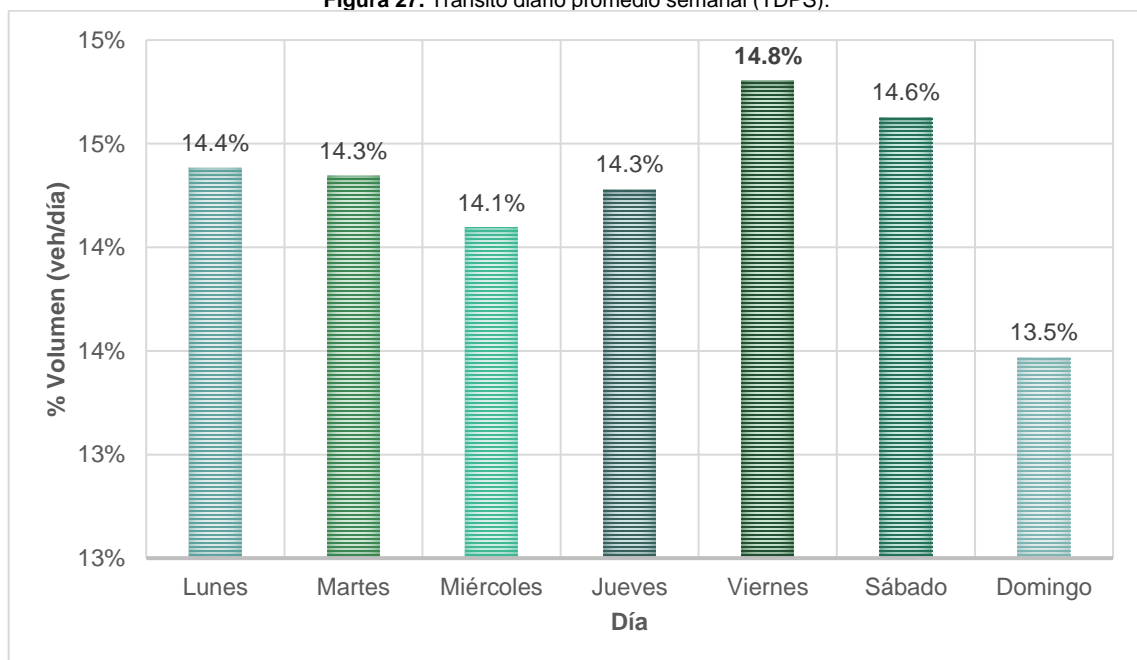


Fuente: Google earth.

### 2.2.2 Perfil de distribución del volumen vehicular.

En la **Figura 27** se muestra el perfil de distribución del volumen vehicular por día de la semana. El día con mayor intensidad de tránsito es el viernes con el 14.8% del volumen semanal (89,368 veh/día). El día con menor volumen vehicular es el domingo, representando el 13.5% (81,305 veh/día).

Figura 27. Transito diario promedio semanal (TDPS).



Fuente: Elaboración propia.



En la **Tabla 9** se presenta la variación del volumen diario de la semana, por sentido de circulación (N-S, S-N y ambos sentidos) en valores absolutos y relativos, resultando:

Primero, que el tramo carretero tiene una alta intensidad del tránsito durante toda la semana ya que la distribución del volumen diario es relativamente homogénea. La variación porcentual promedio del volumen entre los días es pequeña, del orden del 2.8% respecto de los valores diarios y 10% entre el día de mayor y menor tránsito vehicular (viernes y domingo).

Segundo, que el sentido de circulación del norte hacia el sur (Ixtapaluca hacia Chalco) está ligeramente más cargado con 306,280 vehículos/semana (50.7% del TPDS) respecto al sentido del sur hacia el norte presenta un volumen de 297,360 vehículos/semana (49.3% del TPDS).

Por último, como se mencionó anteriormente, el viernes es ligeramente el día de mayor tránsito vehicular (89,368 vehículos/día), presenta una diferencia del 1.2 % (1,070 vehículos) con respecto del sábado, esta diferencia se debe al decremento del volumen en sentido S-N del sábado, esto puede estar relacionado con los motivos de viaje obligados (trabajo y escuela) de un día laboral contra las actividades de un fin de semana que regularmente son de ocio.

**Tabla 9.** Transito diario promedio semanal (TDPS).

Día	Norte-Sur		Sur-Norte		Total	
	Porcentaje	Veh. Día	Porcentaje	Veh. Día	Porcentaje	Veh. Día
Lunes	7.2%	43,183	7.2%	43,627	14.4%	86,810
Martes	7.1%	42,760	7.3%	43,823	14.3%	86,583
Miércoles	7.2%	43,254	6.9%	41,825	14.1%	85,079
Jueves	7.2%	43,501	7.1%	42,696	14.3%	86,197
<b>Viernes</b>	<b>7.6%</b>	<b>45,753</b>	<b>7.2%</b>	<b>43,615</b>	<b>14.8%</b>	<b>89,368</b>
Sábado	7.6%	46,144	7.0%	42,154	14.6%	88,298
Domingo	6.9%	41,685	6.6%	39,620	13.5%	81,305
<b>Total</b>	<b>50.7%</b>	<b>306,280</b>	<b>49.3%</b>	<b>297,360</b>	<b>100%</b>	<b>603,640</b>
<b>TPDS</b>						86,243

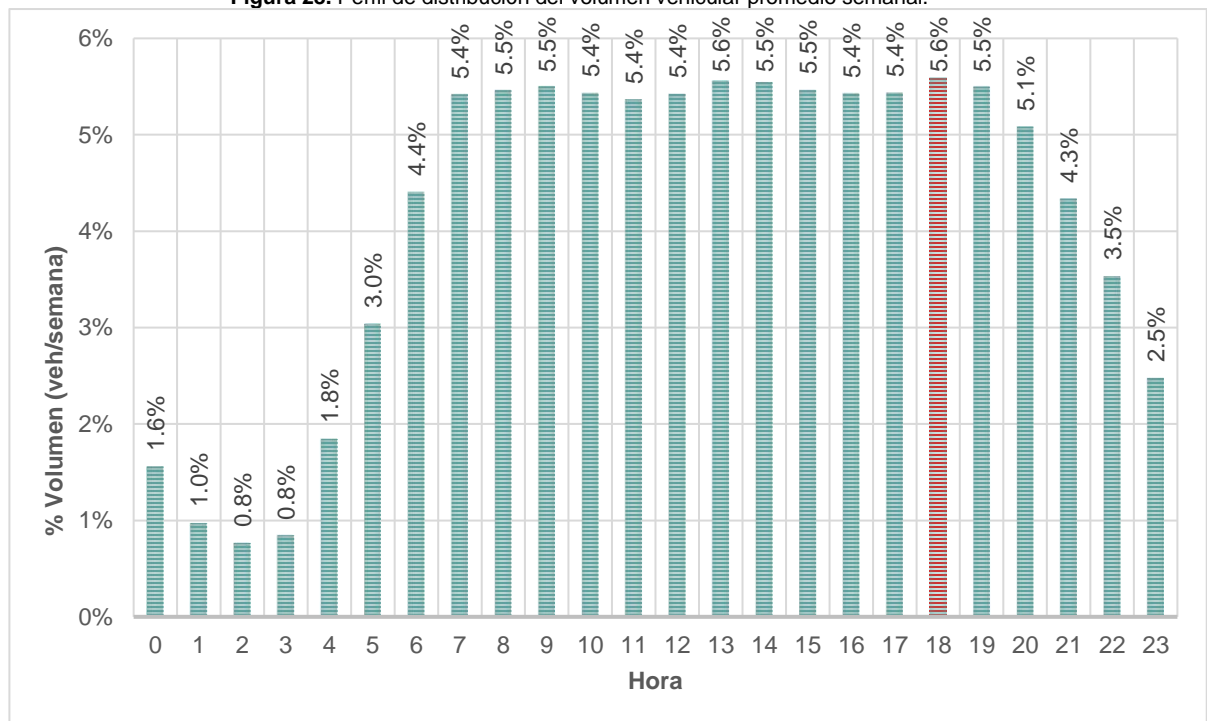
Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3 Perfil horario de máxima demanda.

**Perfil semanal.** El perfil de distribución horaria del volumen vehicular permite identificar las horas críticas o relevantes del día como son la hora pico y valle. En

la **Figura 28** se indican los valores del perfil horario del volumen vehicular. La Hora de Máxima Demanda (HMD) u hora pico en un día promedio tiene lugar a las 18:00 horas. Este volumen equivale al 5.6% del volumen semanal considerando ambos sentidos de circulación. Es importante notar que el perfil horario se mantiene prácticamente constante de 7 de la mañana a 7 de la noche lo que refleja que la infraestructura opera en los límites de su capacidad por lo que la diferencia entre los volúmenes está limitada y el período valle desaparece.

**Figura 28.** Perfil de distribución del volumen vehicular promedio semanal.

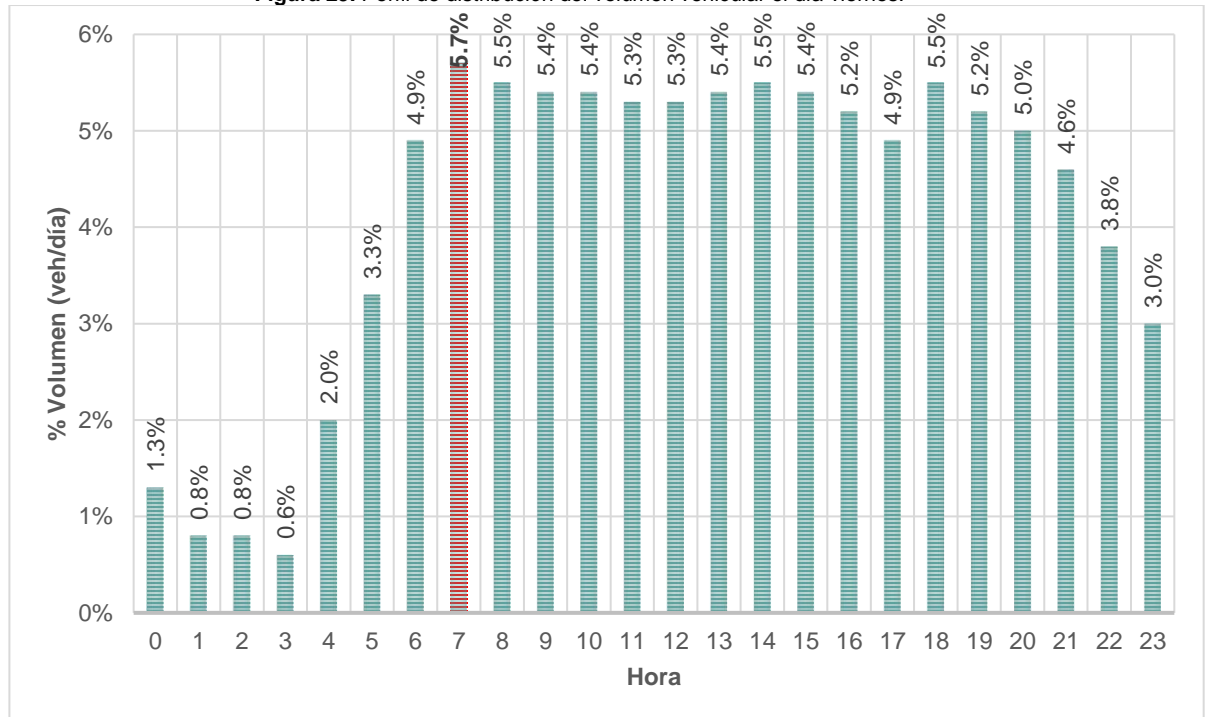


Fuente: Elaboración propia.

**Perfil del día crítico.** En la **Figura 29** se muestra un desglose del perfil HMD del viernes que es el día de mayor volumen vehicular de la semana. La hora pico tiene lugar a las 07:00 horas con 5,004 veh/hora lo que equivale al 5.7% del volumen diario considerando ambos sentidos de circulación. Podrá notarse que la hora pico de la semana tiene lugar a las 19:00 el viernes con un 5.6 del TPDS. Si bien estos valores son similares en valor relativo, en términos absolutos son distintos. Mientras que el 5.6% del TPDS corresponde a 4,829 vehículos/hora el 5.7% del tránsito del viernes corresponde a 5,004 vehículos/hora (diferencia del

3.6%). En la práctica, el volumen a emplear depende del propósito del diseño que se vaya a realizar.

Figura 29. Perfil de distribución del volumen vehicular el día viernes.



Fuente: Elaboración propia.

## 2.2.4 Efectos de la nocturnidad

Se contemplan dos periodos:

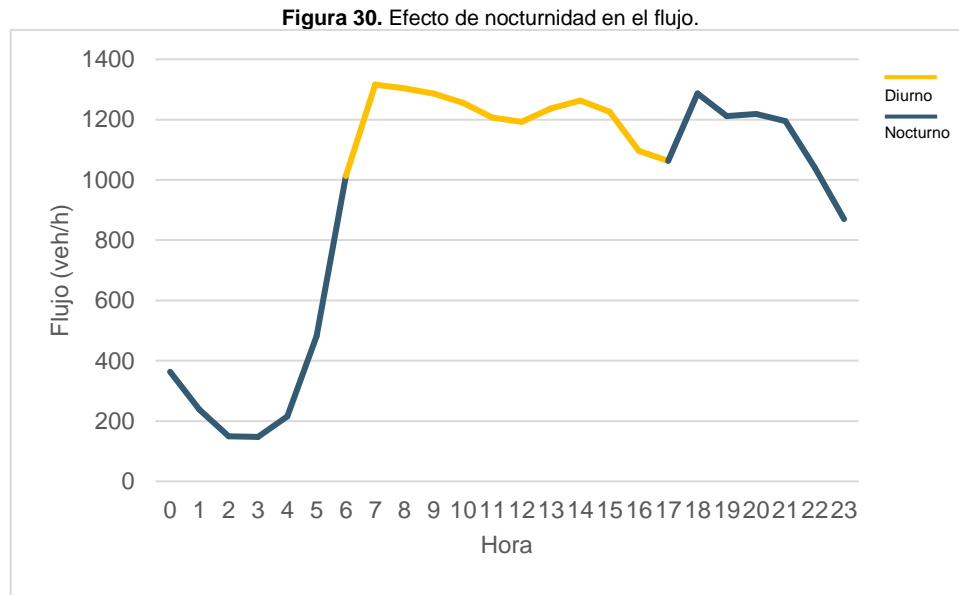
- El periodo diurno se refiere al intervalo de tiempo durante el día cuando hay luz natural, generalmente desde el amanecer hasta el atardecer, abarca el intervalo de 07:00 a las 17:00 horas.
- El periodo nocturno es el intervalo de tiempo durante la noche, desde el anochecer hasta el amanecer, cuando la luz natural es mínima o inexistente abarca el intervalo de 18:00 a las 06:00 horas.

Se analizan los comportamientos que tienen las variables macroscópicas a través de estos periodos.



**Flujo (ver Figura 30):** El grafico representa el cambio del flujo vehicular a lo largo del día. La línea en color amarillo representa el periodo diurno, la línea azul oscuro representa el periodo nocturno. Podemos notar que:

- Se puede apreciar que, en el periodo diurno el flujo vehicular alcanza su punto máximo a las 07:00 horas con 1,316 veh/h. Representa la hora durante la mayoría de las personas se desplazan al trabajo y escuelas.
- En el periodo nocturno se observa un segundo pico en el flujo vehicular a las 18:00 horas con 1,286 veh/h, este pico coincide con los traslados de salida de trabajos. A partir de las 18 horas el flujo comienza a decrecer hasta alcanzar un flujo mínimo de 147 veh/h a las 03:00 horas.



Fuente: Elaboración propia.

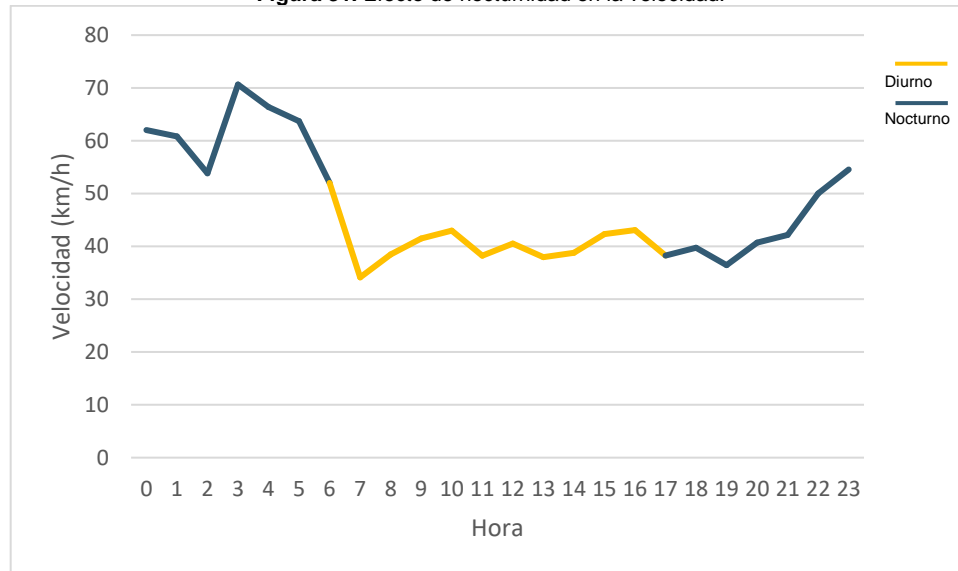
**Velocidad (ver Figura 31):** El grafico representa el cambio de las velocidades a lo largo del día. La línea en color amarillo representa el periodo diurno, la línea azul oscuro representa el periodo nocturno. Podemos notar que:

- Se puede apreciar que, en el periodo nocturno la velocidad alcanza su punto máximo a las 03:00 horas con una velocidad cercana a la velocidad a flujo libre con 70.6 km/h. Este punto coincide con el flujo mínimo (147 veh/h) lo cual explica la libertad de circulación y maniobra en los carriles.

A partir de esta hora, se comienza a apreciar una disminución en las velocidades debió al aumento en el flujo vehicular.

- En el periodo diurno se observa el punto mínimo, con una velocidad de 34.1 km/h a las 07:00 horas, coincidiendo con el punto máximo de flujo vehicular (1,316 veh/h).

Figura 31. Efecto de nocturnidad en la velocidad.

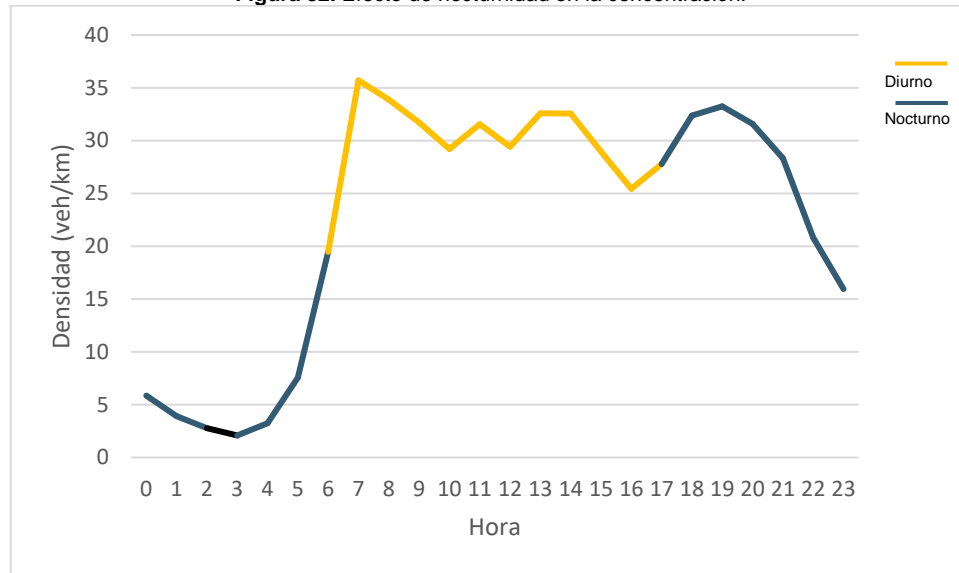


Fuente: Elaboración propia.

**Concentración** (ver **Figura 32**): El grafico representa el cambio en la concentración vehicular a lo largo del día. La línea en color amarillo representa el periodo diurno, la línea azul oscuro representa el periodo nocturno. Podemos notar que:

- Se puede apreciar que, en el periodo diurno la densidad vehicular alcanza su punto máximo a las 07:00 horas con 36 veh/km.
- En el periodo nocturno se observa un segundo pico en el flujo vehicular a las 18:00 horas con 33 veh/km. A partir de las 18 horas el flujo comienza a decrecer hasta alcanzar la densidad mínima de 2 veh/km a las 03:00 horas.

Figura 32. Efecto de nocturnidad en la concentración.



Fuente: Elaboración propia.

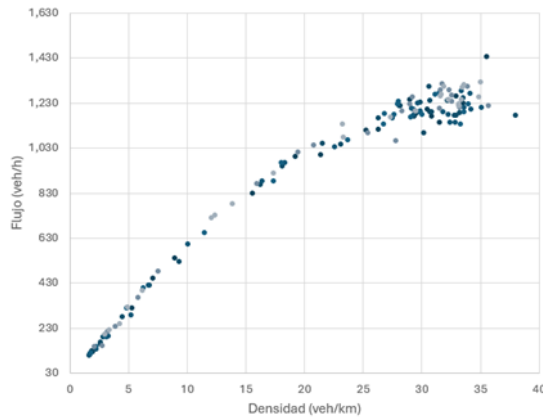
### 3 Análisis de los diagramas de las variables macroscópicas.

Se presentan los resultados obtenidos del análisis de las variables macroscópicas, una vez procesados los datos obtenidos en campo, se integró la base de datos y se transformaron en vehículos individuales. Se establecieron diferentes niveles de agregación temporal, analizando los datos en intervalos de 1 hora, 30 minutos y 15 minutos para observar las variaciones en el flujo vehicular a lo largo del tiempo. Además, se consideraron los diferentes sentidos de circulación, lo que permitió aplicar de manera más precisa los supuestos de la teoría macroscópica del flujo vehicular. Este enfoque detallado y exhaustivo proporcionó una visión completa del comportamiento del tráfico en las áreas estudiadas,

En la **Figura 33** , **Figura 34** y **Figura 35** se muestra una comparativa detallada entre los diagramas obtenidos según los diferentes periodos de agregación estudiados. Estos diagramas son herramientas fundamentales que nos permiten visualizar los cambios en las variables analizadas a lo largo de un rango de tiempo específico. Al observar los datos en distintos intervalos temporales, podemos identificar variaciones y comportamientos que de otra manera podrían pasar desapercibidos.

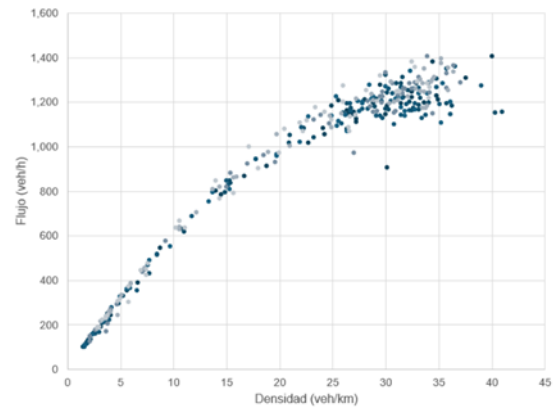
En particular, se destaca la gráfica correspondiente a un periodo de agregación de 15 minutos (**Figura 35**). En esta gráfica, se puede apreciar una interacción más consolidada de la nube de puntos, lo que facilita la identificación de patrones y tendencias en los datos. La mayor densidad y coherencia de los puntos en la nube permiten una visualización más clara y precisa de las relaciones e interacciones entre las variables estudiadas. Este nivel de detalle es crucial para el análisis, ya que permite detectar de manera sencilla las correlaciones y comportamientos recurrentes en el flujo vehicular.

**Figura 33.** Diagrama Flujo-Densidad en periodo de agregación de 1 hora.



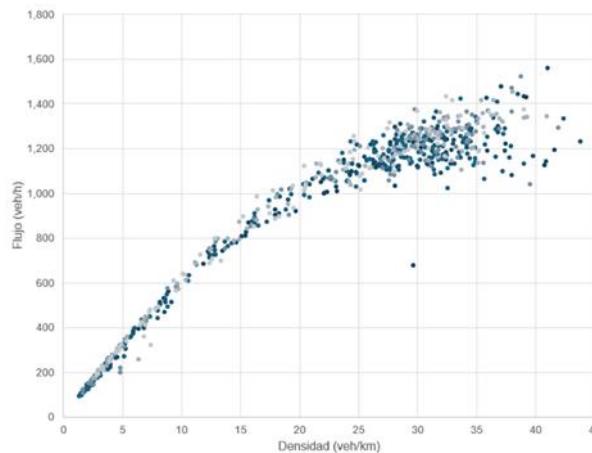
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 34.** Diagrama Flujo-Densidad en periodo de agregación de 30 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 35.** Diagrama Flujo-Densidad en periodo de agregación de 15 minutos.



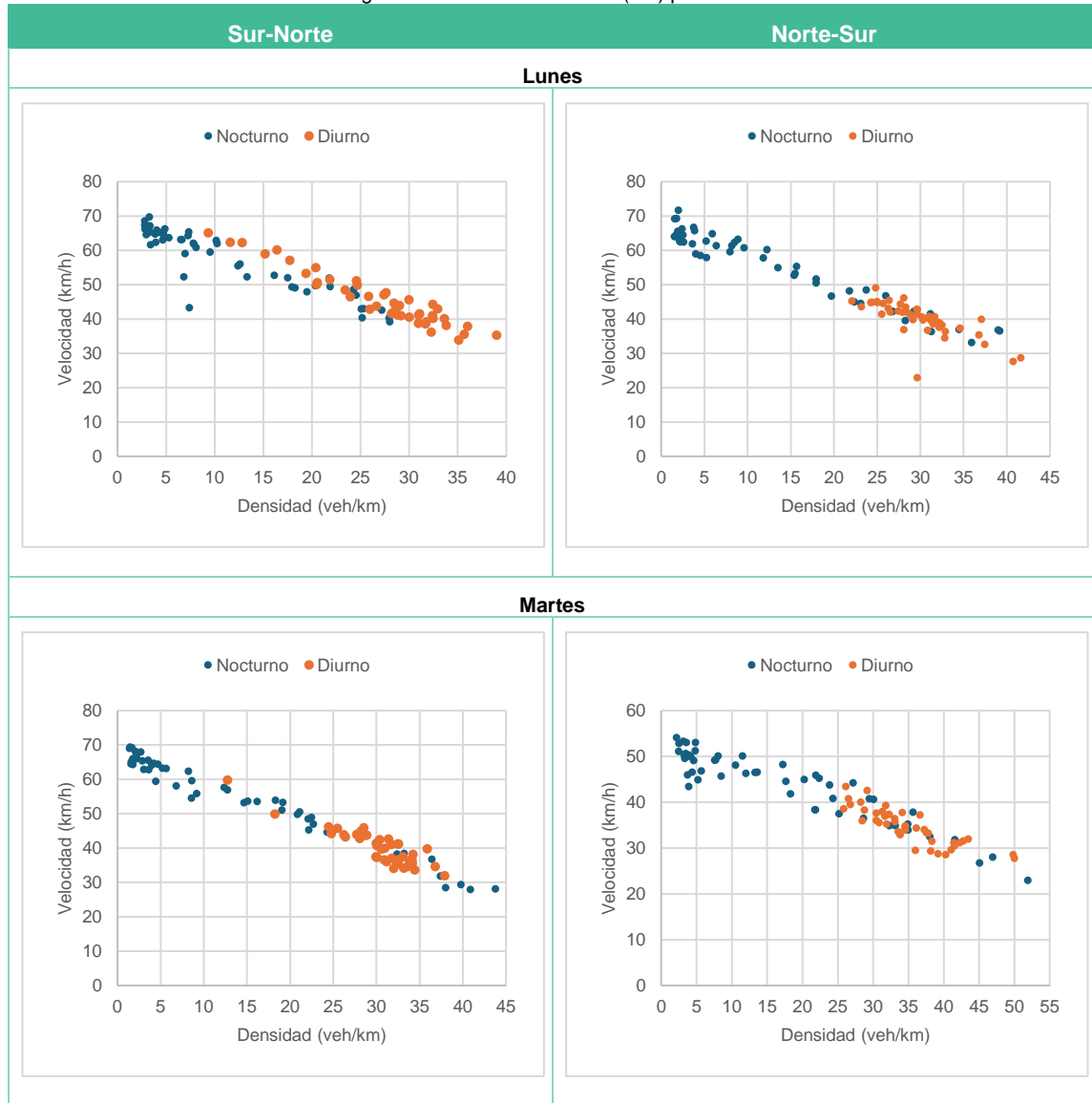
Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis comparativo entre los gráficos obtenidos, se presentan los resultados para el periodo de agregación de 15 minutos, obteniendo los siguientes resultados.

**Densidad-Velocidad (k-u):** En la **Tabla 10** se muestran los gráficos de dispersión por día de la semana, estos representan la relación entre la velocidad (en kilómetros por hora) y la densidad (en vehículos por kilómetro), los puntos en el gráfico están identificados con un color diferente contemplando el periodo diurno (07:00 a las 17:00 horas) y el periodo nocturno (18:00 a las 06:00 horas). Podemos notar que:

- En el periodo diurno, la velocidad tiende a disminuir a medida que aumenta la densidad de vehículos debido a la congestión vial, donde los vehículos tienen menos espacio para maniobrar y deben reducir su velocidad para mantener una distancia segura entre ellos ya que más personas están viajando hacia y desde sus lugares de trabajo, escuelas y otras actividades diarias. La conglomeración de puntos indica que los vehículos están operando en un rango de velocidad más estrecho, lo que significa que los conductores tienen menos flexibilidad para ajustar su velocidad debido al aumento en la densidad, esta falta de libertad puede ser resultado de la necesidad de mantener una velocidad constante para evitar colisiones y mantener una distancia segura con otros vehículos.
- En el periodo nocturno, la velocidad promedio es generalmente más alta en comparación con el diurno, esto debido a la menor cantidad de vehículos que transitan, la densidad de vehículos en las carreteras es significativamente menor en comparación con el día debido a que la mayoría de las actividades cotidianas se llevan cabo en el periodo diurno. Con menos vehículos en la carretera, los conductores tienen más espacio para maniobrar y pueden mantener velocidades más altas sin la necesidad de reducir la velocidad debido a la congestión. La reducción en el número de vehículos disminuye la probabilidad de congestión, permitiendo un flujo de tráfico más constante y rápido. La dispersión de los puntos en el gráfico durante este periodo es menor, indicando que las velocidades son más consistentes. Esto sugiere que los conductores pueden mantener una velocidad constante debido a la menor interferencia de otros vehículos sin embargo la variabilidad en la velocidad también puede estar influenciada por factores como la visibilidad nocturna y las condiciones meteorológicas.
- La falta de variaciones significativas en los gráficos sugiere que el comportamiento del tráfico es relativamente estable y predecible a lo largo de la semana y por sentido de circulación. La estabilidad en el comportamiento del tráfico también puede indicar que no hay factores externos importantes, que estén afectando significativamente el flujo de tráfico en una dirección específica.

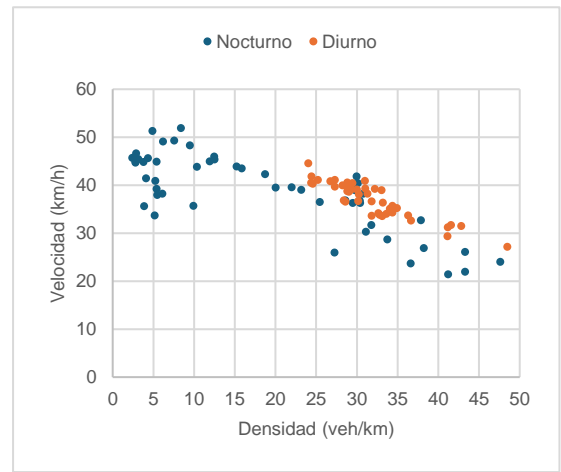
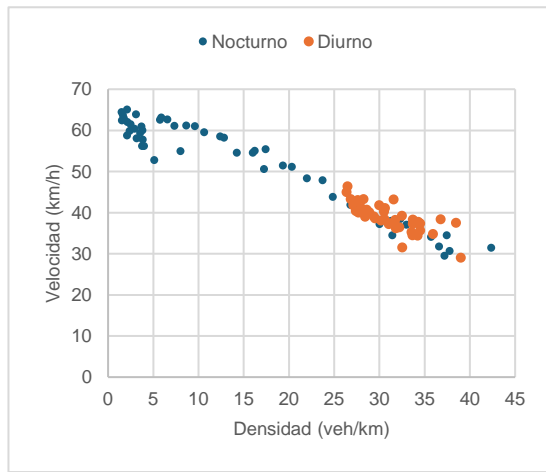
**Tabla 10.** Diagramas Velocidad-Densidad (u-k) por día de la semana.



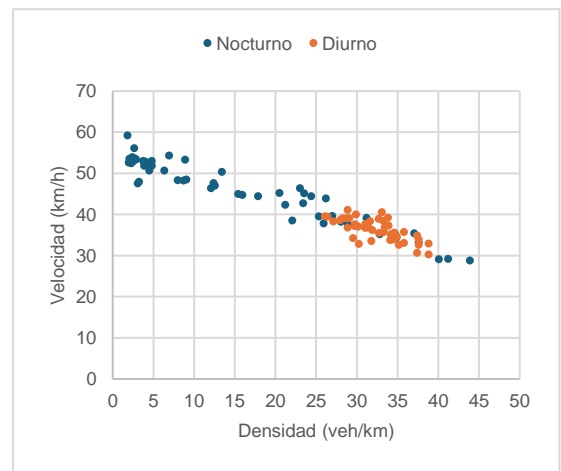
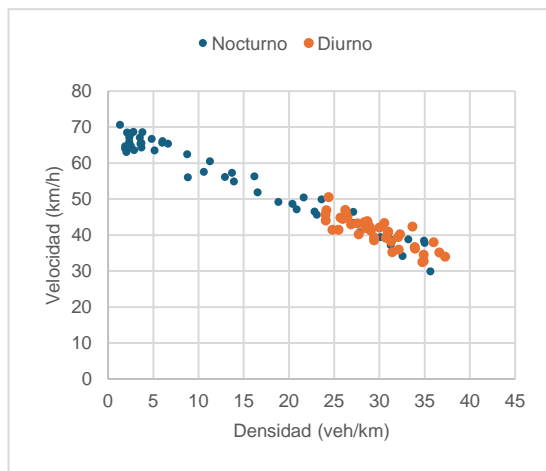
Sur-Norte

Norte-Sur

Miércoles



Jueves

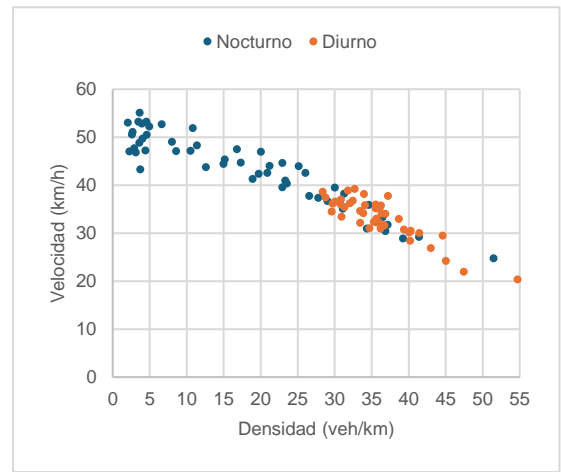
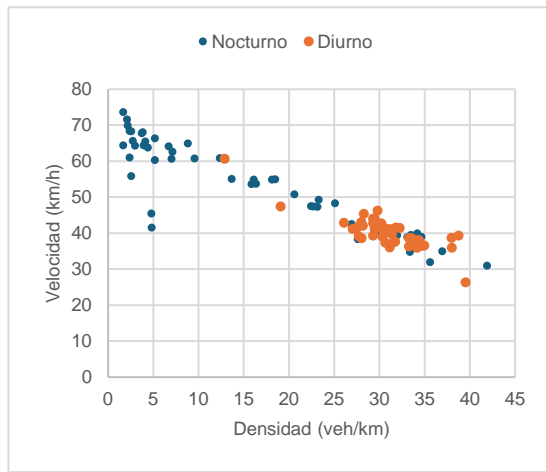




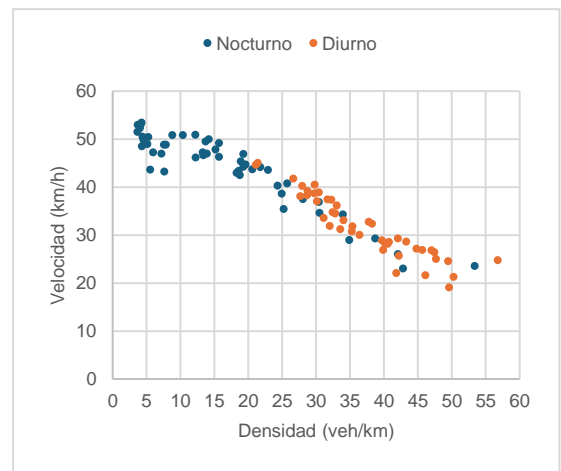
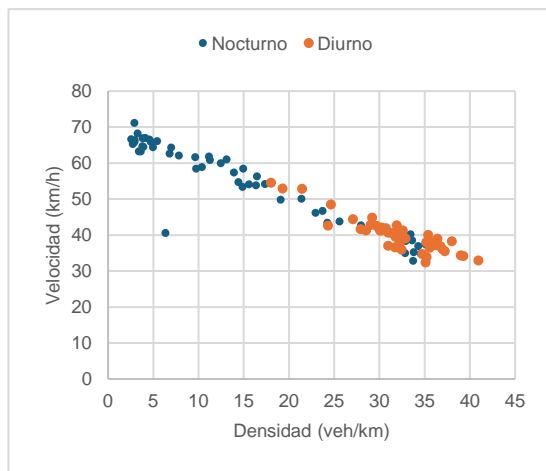
Sur-Norte

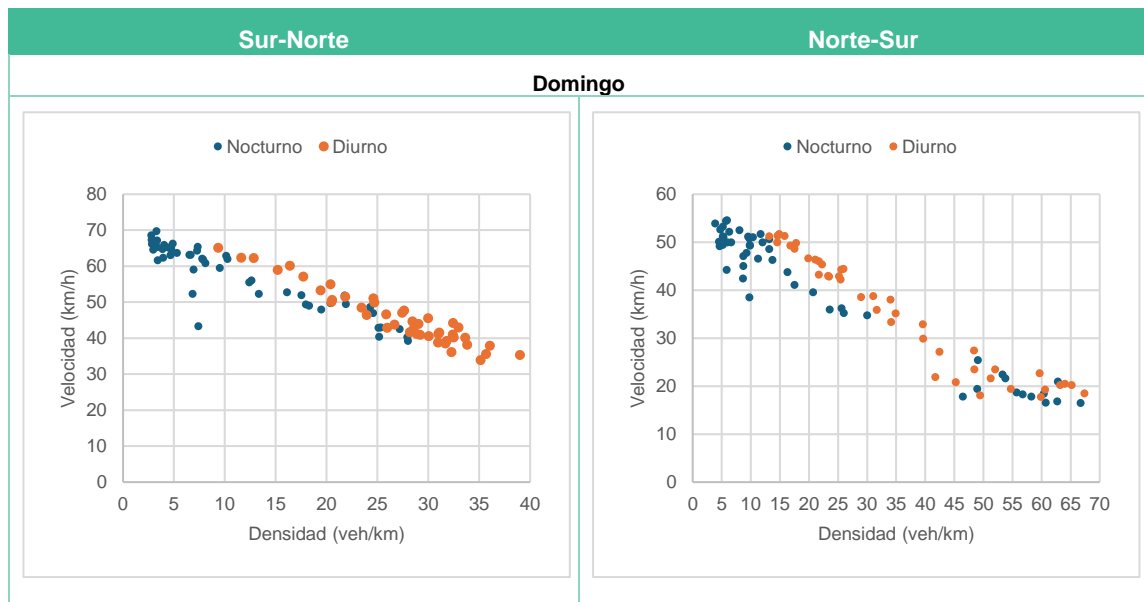
Norte-Sur

Viernes



Sábado





Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 36** (sentido sur-norte) y **Figura 37** (sentido norte-sur) se muestran los gráficos de la relación velocidad-densidad, los puntos en el gráfico están identificados con un color diferente según el día de la semana, desde el lunes hasta el domingo. El conjunto de puntos presenta un comportamiento lineal decreciente, esta conducta nos indica que mientras los valores de la velocidad van disminuyendo, el valor de la densidad vehicular aumenta.

Al presentarse una menor densidad vehicular las velocidades de circulación son más cercanas a la velocidad a flujo libre (régimen fluido), mientras que, en el caso contrario, con velocidades cercanas a la velocidad óptima se aprecia un cambio en el sentido del flujo (régimen congestionado).

En el sentido de sur a norte:

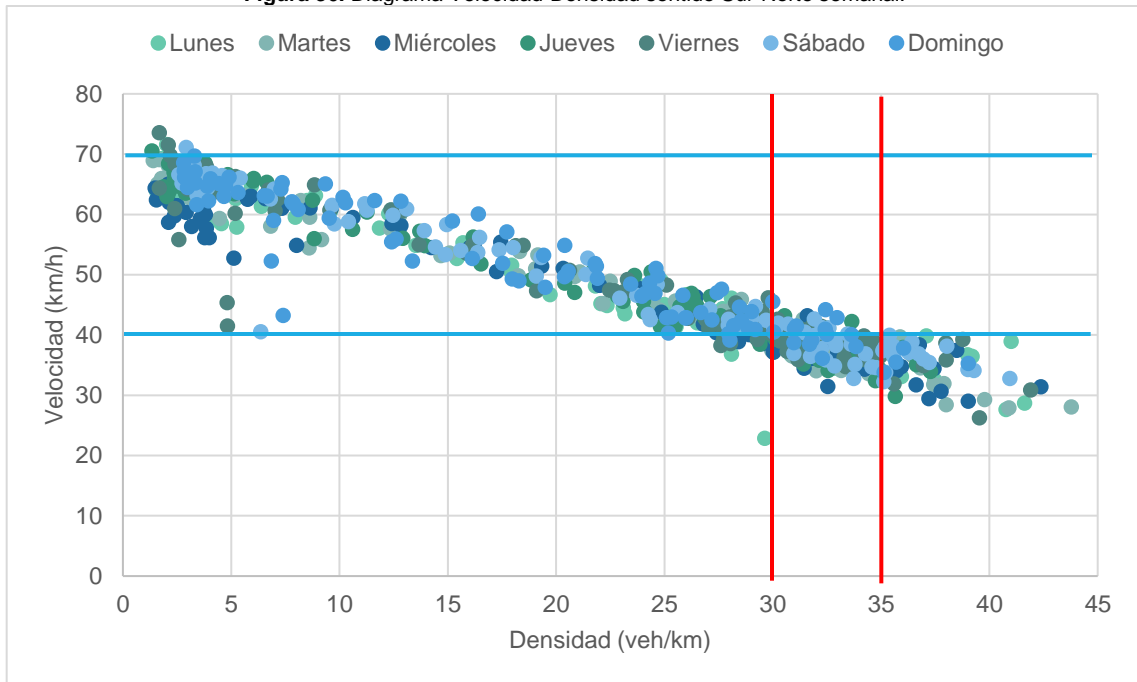
- La Velocidad a flujo libre  $u_f = 70$  km/h.
- La Velocidad óptima  $u_m = 40$  km/h.
- La concentración óptima se encuentra en el rango de 30 a 35 veh/km

En el sentido de norte a sur:

- La Velocidad a flujo libre  $u_f = 55$  km/h.
- La Velocidad óptima  $u_m = 35$  km/h.

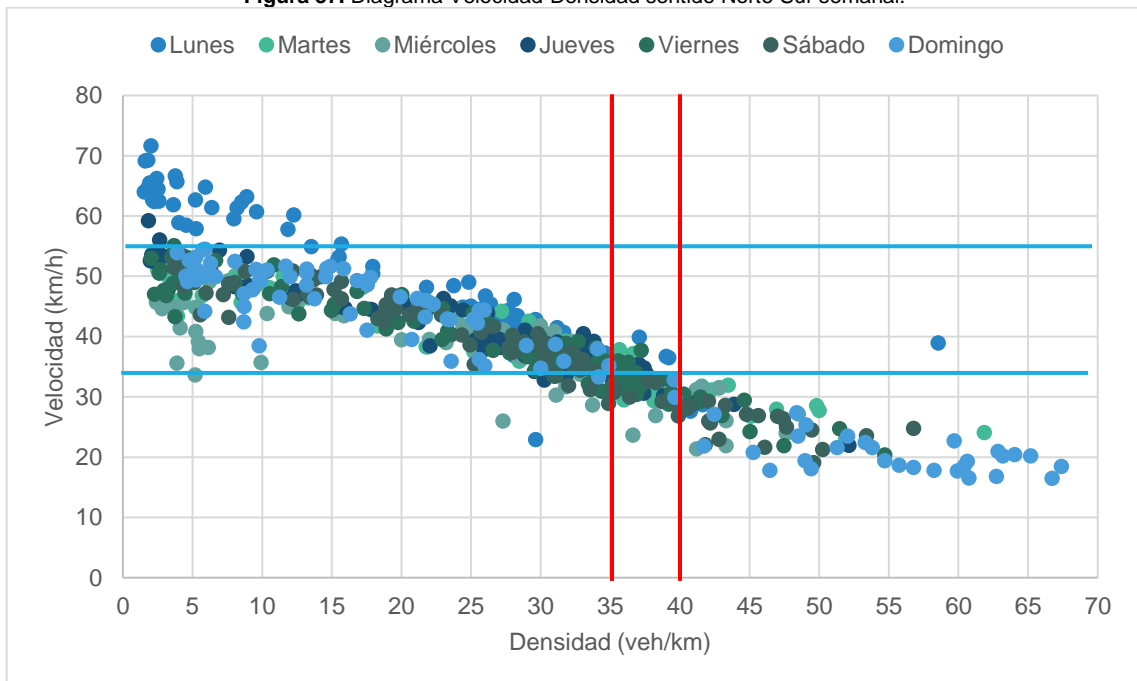
- La concentración óptima se encuentra en el rango de 35 a 40 veh/km

Figura 36. Diagrama Velocidad-Densidad sentido Sur-Norte semanal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Diagrama Velocidad-Densidad sentido Norte-Sur semanal.



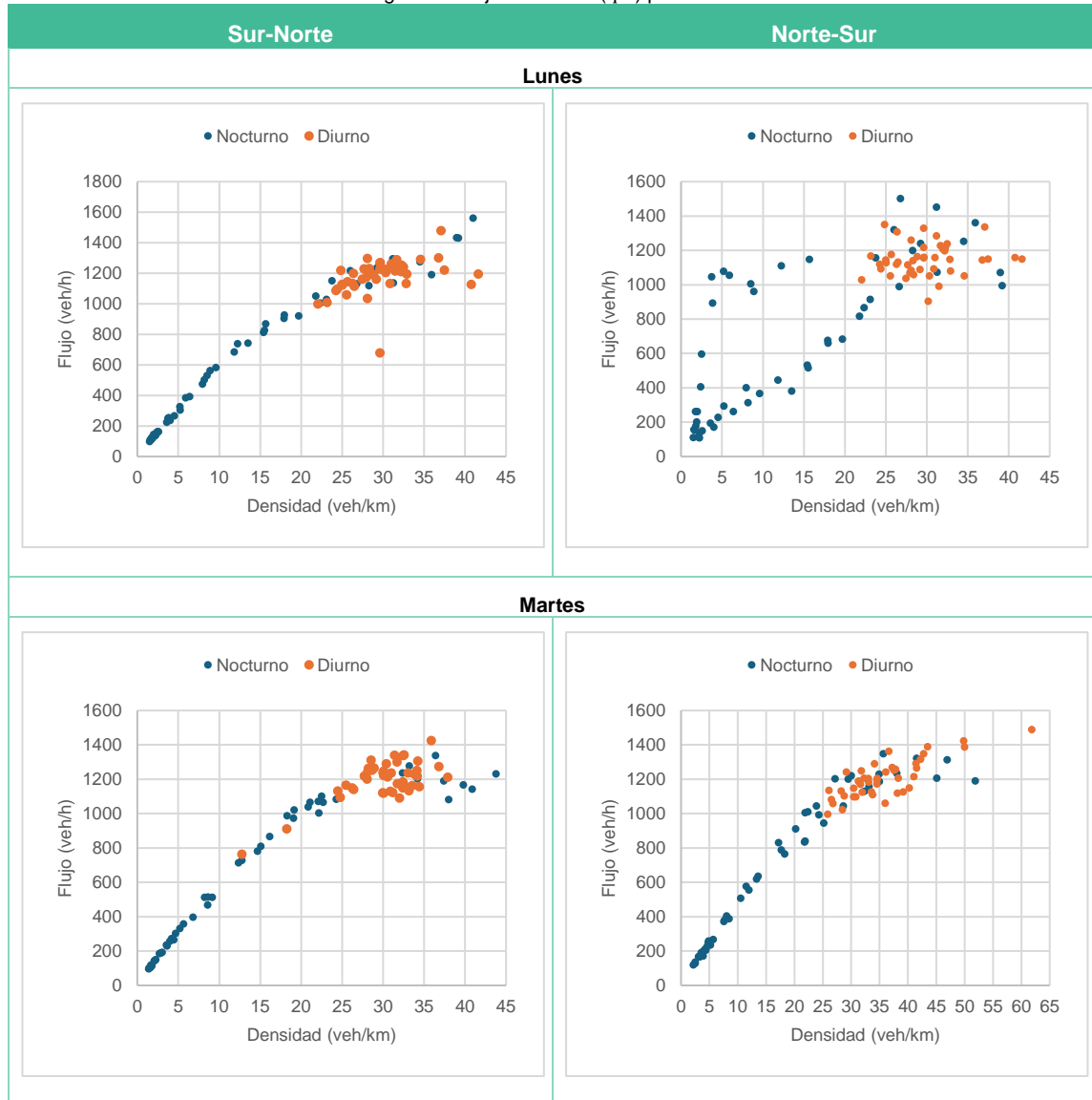
Fuente: Elaboración propia.



**Flujo-Densidad (q-k):** En la **Tabla 11** se muestran los gráficos de dispersión que representan la relación entre el flujo de tráfico (medido en vehículos por hora) y la densidad del tráfico (medida en vehículos por kilómetro), los puntos en el gráfico están identificados con un color diferente contemplando el periodo diurno (07:00 a las 17:00 horas) y el periodo nocturno (18:00 a las 06:00 horas). Podemos notar que:

- En el periodo diurno, la densidad y el flujo presentan valores elevados. La conglomeración de puntos indica que los vehículos están circulando bajo distancias de seguimiento estrechas, lo que significa que los conductores tienen menos flexibilidad para ajustar su velocidad y reduce la maniobrabilidad, esta situación lleva a un decremento en la capacidad y la percepción del nivel de servicio ya que el riesgo de accidentes aumenta debido a la menor capacidad de reacción ante imprevistos y la mayor probabilidad de colisiones por alcance.
- En el periodo nocturno, la densidad y el flujo se encuentran en rangos más bajos en comparación con el periodo diurno. La dispersión de puntos indica que los vehículos están circulando bajo distancias de seguimiento amplias, lo que proporciona a los conductores más tiempo y espacio para reaccionar ante posibles obstáculos o cambios en las condiciones del tráfico. Esta mayor distancia de seguimiento reducir el riesgo de colisiones, ya que los conductores tienen libertad para ajustar su velocidad y maniobrar.

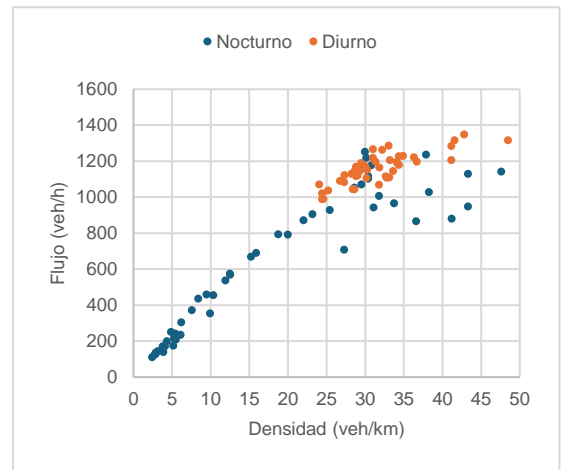
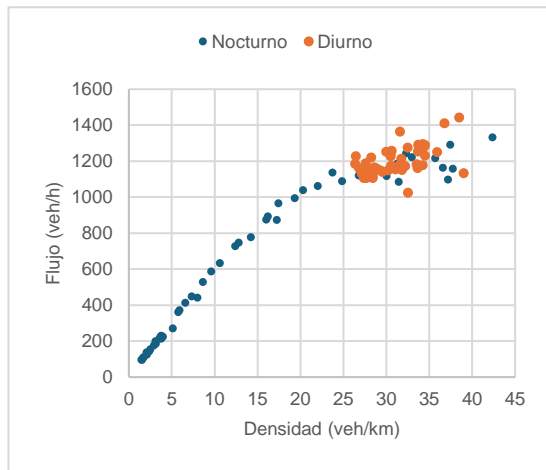
**Tabla 11.** Diagramas Flujo-Densidad (q-k) por día de la semana.



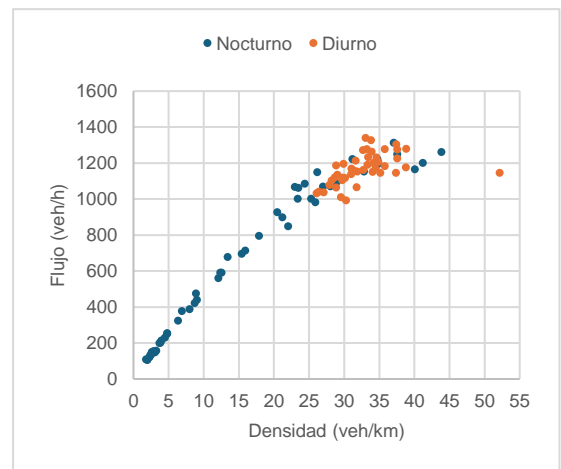
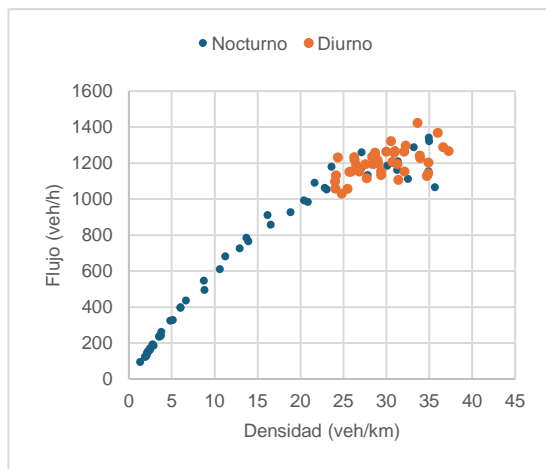
Sur-Norte

Norte-Sur

Miércoles



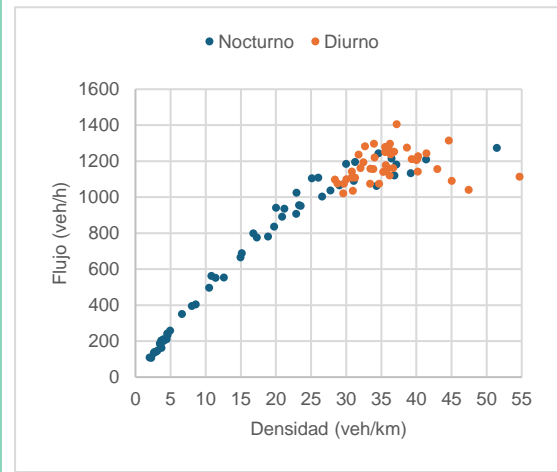
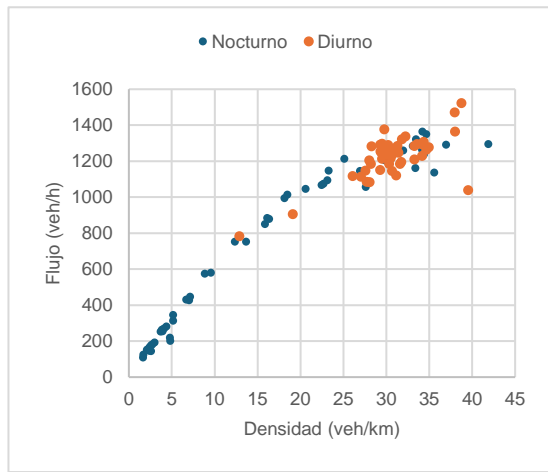
Jueves



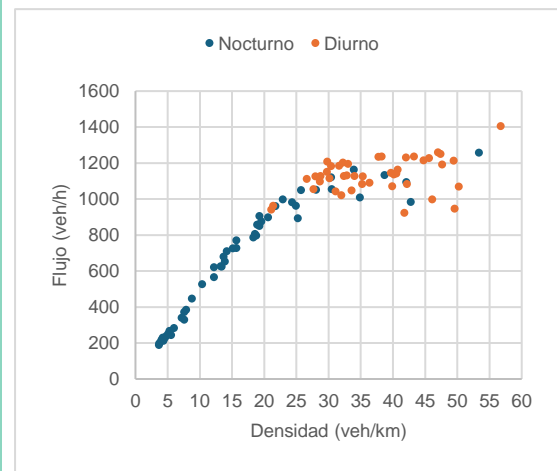
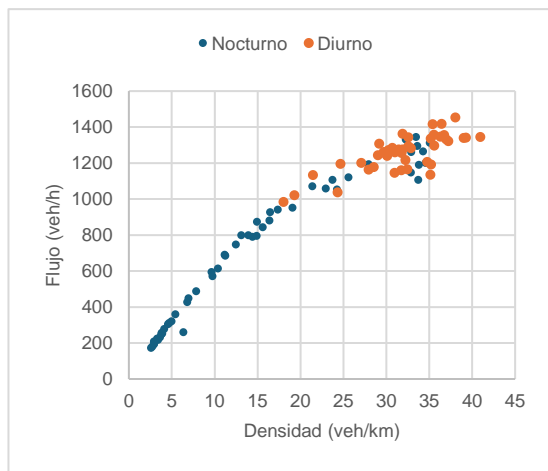
Sur-Norte

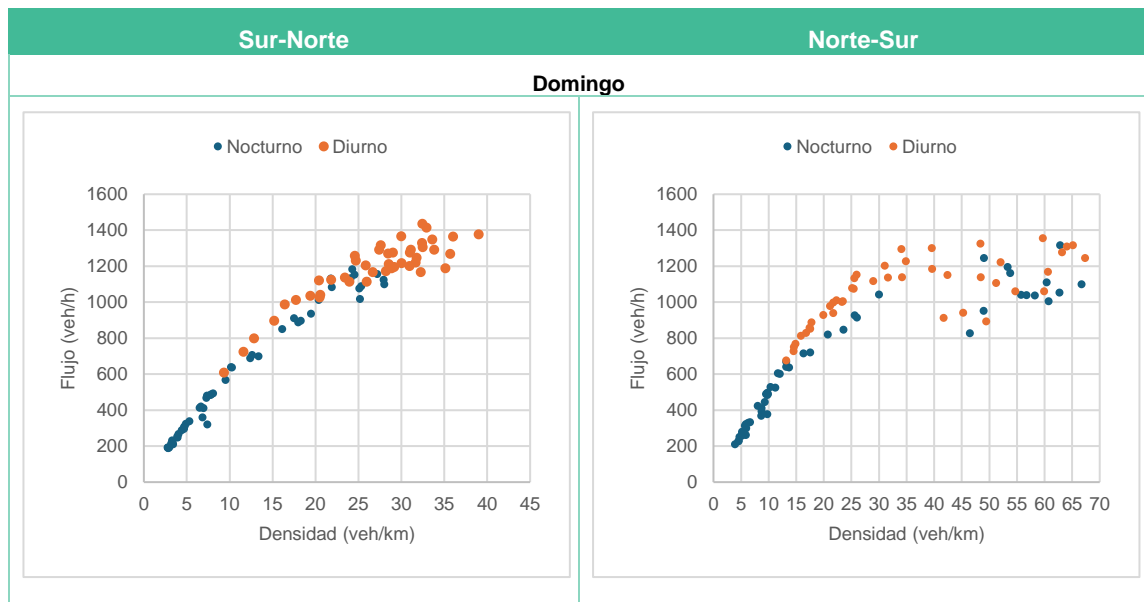
Norte-Sur

Viernes



Sábado





Fuente: Elaboración propia.

En la **La concentración** óptima se encuentra en el rango de 30 a 35 veh/km

- El flujo óptima se encuentra en el rango de 1,050 a 1,300 veh/h/carril

**Figura 38** (sentido sur-norte) y **Figura 39** (sentido norte-sur) se muestran los gráficos de la relación flujo-densidad, los puntos en el gráfico están identificados con un color diferente según el día de la semana, desde el lunes hasta el domingo. Se aprecia que el conjunto de puntos tiende a presentar un comportamiento parabólico, esta conducta nos indica que existe una tendencia de incremento, la cual representa el régimen fluido y una de decremento, régimen congestionado. En el gráfico de la con sentido sur-norte se observa un salto en el comportamiento del flujo vehicular con respecto al sentido norte-sur, el cual presenta un comportamiento homogéneo entre los días de la semana. Este salto puede ser resultado de múltiples factores, como ya se ha mencionado, la zona de estudio se encuentra en obra por el carril confinado del trolebús, lo cual conlleva a presentar cierres de circulación frecuentes debido a maniobras de maquinaria o instalación de infraestructura, el incremento en el flujo vehicular del lunes puede ser resultado de un incremento en viajes locales debido al reinicio de actividades después del fin de semana (escuela y trabajo).



Al relacionar estos dos estados en el flujo, con la densidad y la velocidad encontramos que, al tener una mayor densidad vehicular presente en un tramo carretero, esta infraestructura mostrara una menor capacidad de albergar un flujo vehicular y en consecuencia las velocidades de circulación serán muy bajas, caso contrario al tener densidades bajas (por debajo de la densidad optima) se presentan flujos más altos, con velocidades de circulación cercanas o iguales a la velocidad a flujo libre.

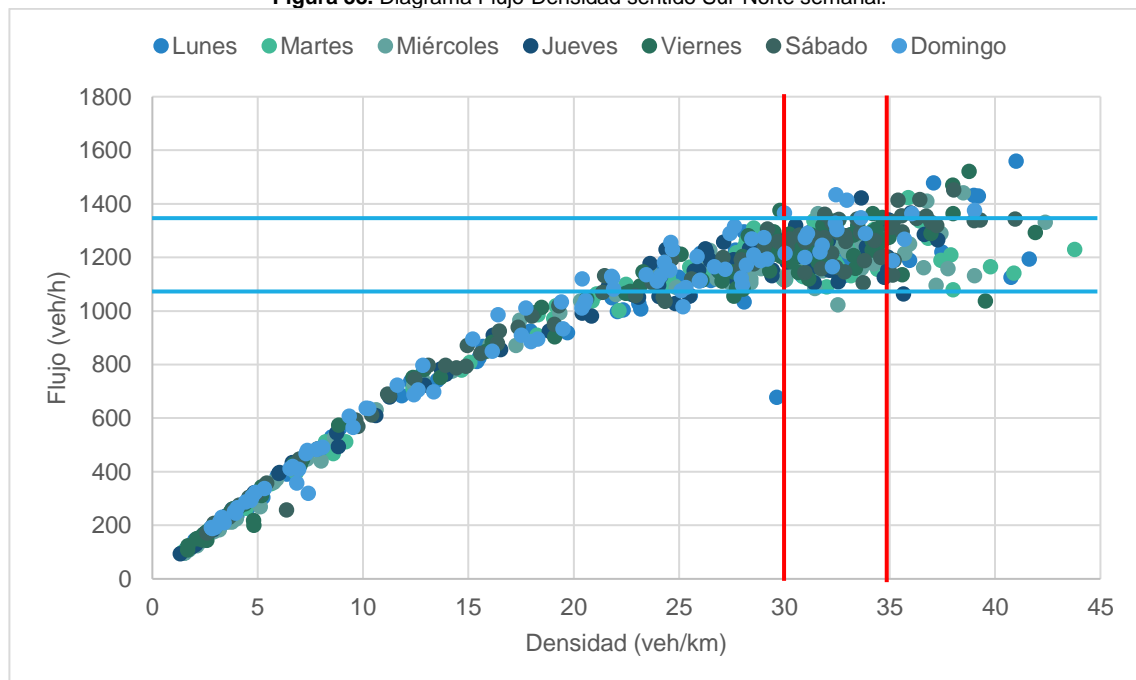
En el sentido de sur a norte:

- La concentración óptima se encuentra en el rango de 30 a 35 veh/km
- El flujo óptima se encuentra en el rango de 1,100 a 1,350 veh/h/carril

En el sentido de norte a sur:

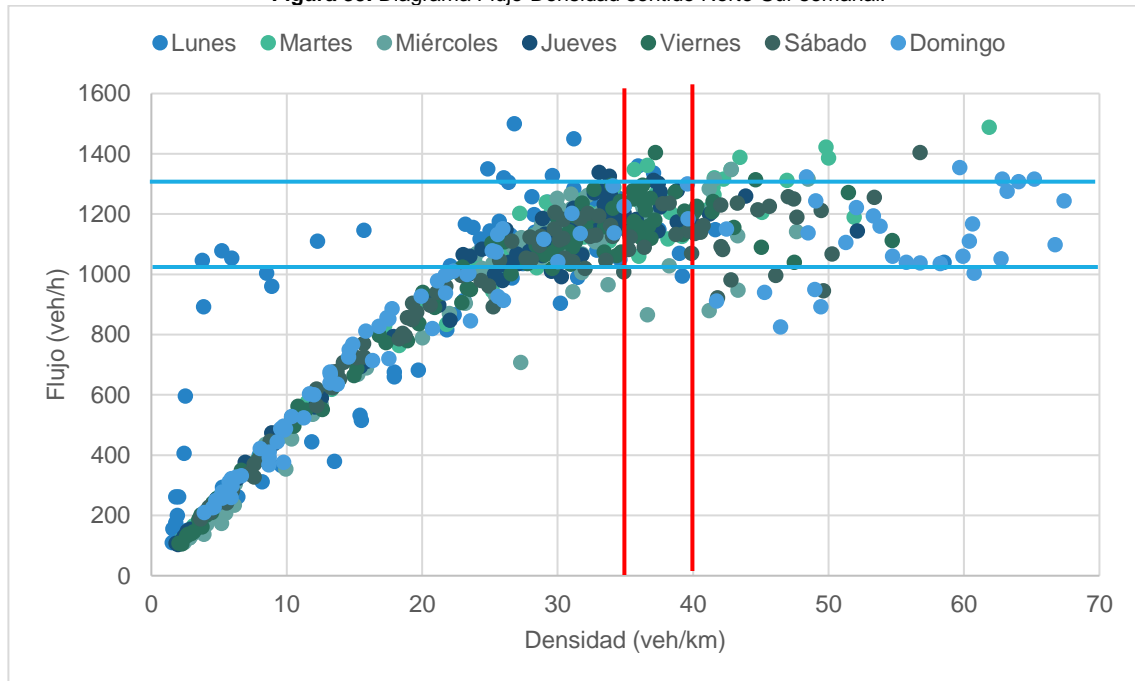
- La concentración óptima se encuentra en el rango de 30 a 35 veh/km
- El flujo óptima se encuentra en el rango de 1,050 a 1,300 veh/h/carril

Figura 38. Diagrama Flujo-Densidad sentido Sur-Norte semanal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Diagrama Flujo-Densidad sentido Norte-Sur semanal.



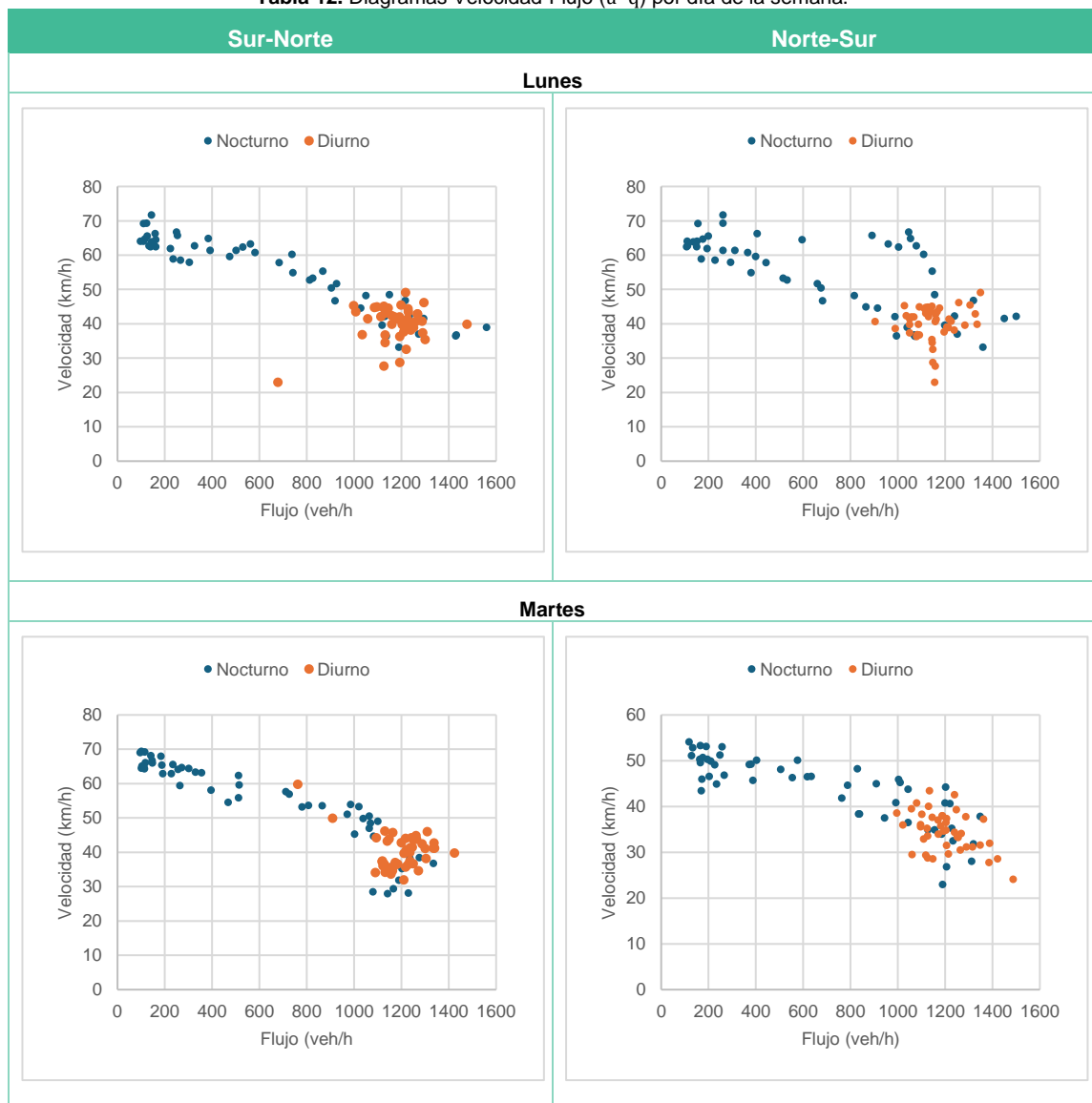
Fuente: Elaboración propia.

**Velocidad-Flujo (u- q):** En la **Tabla 12** se muestran los gráficos de dispersión que representa la velocidad (en kilómetros por hora) y el flujo (medido en vehículos por hora), los puntos en el gráfico están identificados con un color diferente contemplando el periodo diurno (07:00 a las 17:00 horas) y el periodo nocturno (18:00 a las 06:00 horas). Podemos notar que:

- En el periodo diurno, la velocidad se encuentra en rangos bajos y el flujo presenta valores elevados. La conglomeración de puntos indica que los vehículos están circulando bajo distancias de seguimiento muy estrechas, lo que significa que los conductores deben circular a velocidades muy restringidas. El alto flujo vehicular durante el día puede generar congestiones significativas, afectando la eficiencia y aumentando los tiempos de viaje. La acumulación de vehículos en un espacio reducido también contribuye a un mayor desgaste de la infraestructura vial y a un incremento en las emisiones contaminantes.
- En el periodo nocturno, la velocidad aumenta significativamente en comparación con el periodo diurno y el flujo se encuentran en rangos más bajos. La dispersión de puntos indica que los vehículos están circulando bajo distancias

de seguimiento amplias, lo que proporciona a los conductores más tiempo y espacio para reaccionar ante posibles obstáculos o cambios en las condiciones del tráfico. A pesar de las ventajas de circular con un menor flujo vehicular, la conducción nocturna presenta sus propios desafíos. La visibilidad reducida debido a la falta de luz natural puede dificultar la percepción de la carretera y de otros usuarios, aumentando el riesgo de accidentes.

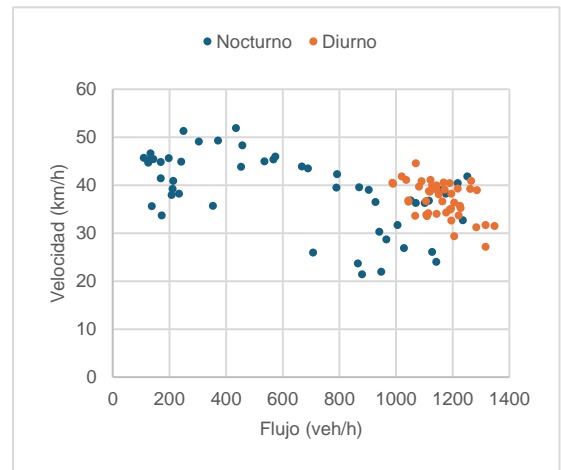
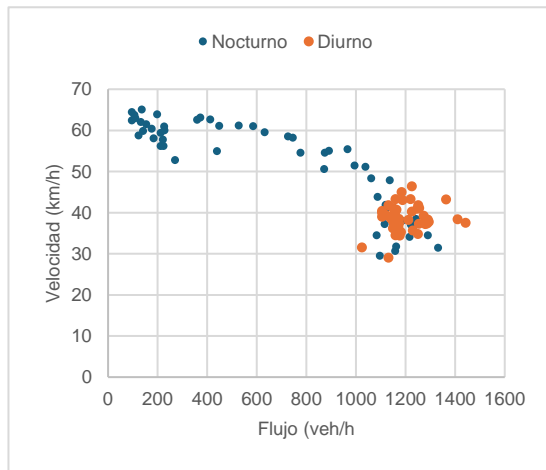
**Tabla 12.** Diagramas Velocidad-Flujo (u- q) por día de la semana.



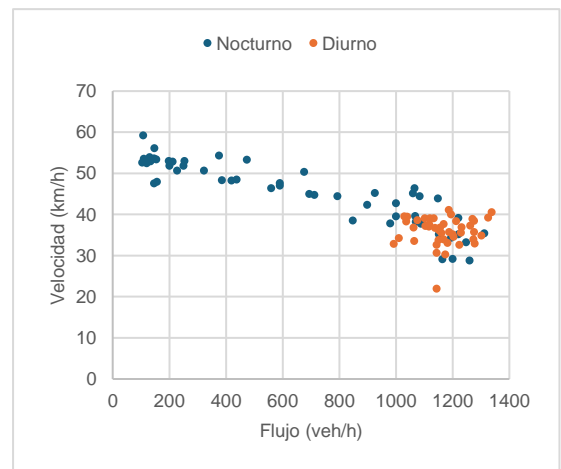
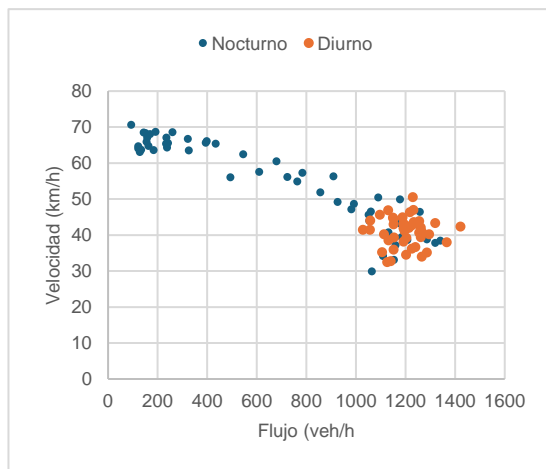
Sur-Norte

Norte-Sur

Miércoles



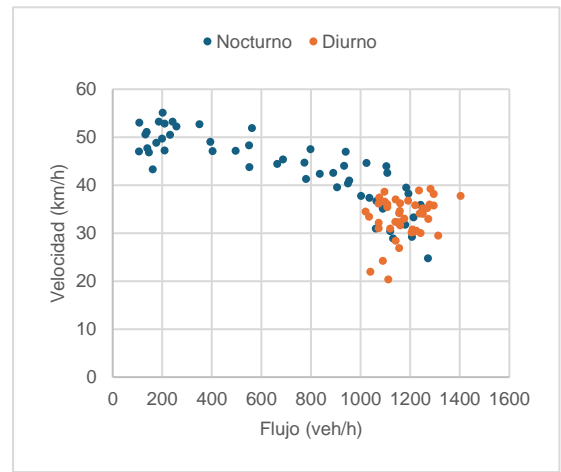
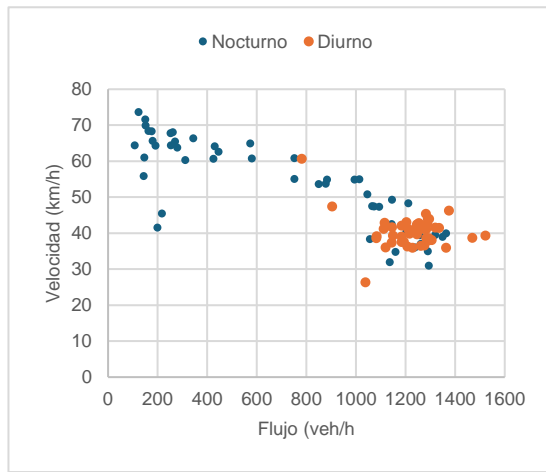
Jueves



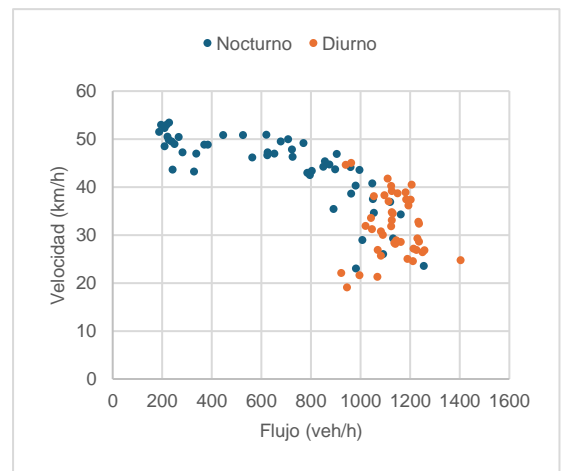
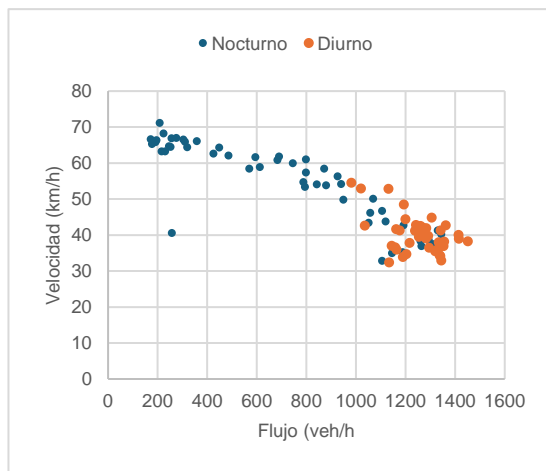
Sur-Norte

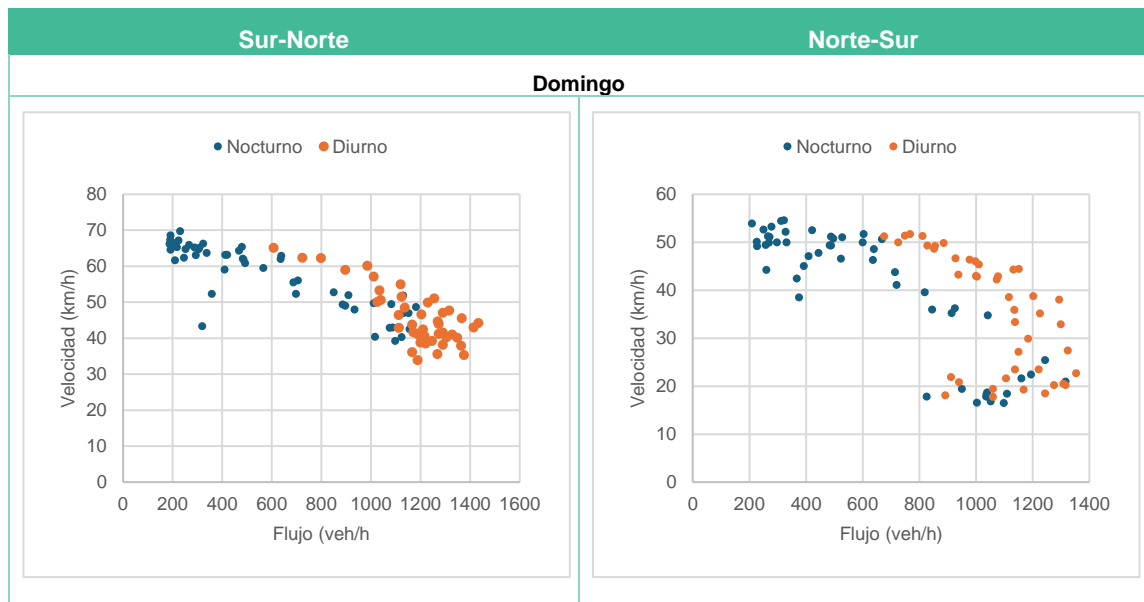
Norte-Sur

Viernes



Sábado





Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 40** (sentido sur-norte) y **Figura 41** (sentido norte-sur) se muestran los gráficos de la relación flujo-densidad, los puntos en el gráfico están identificados con un color diferente según el día de la semana, desde el lunes hasta el domingo. Se aprecia que el conjunto de puntos tiende a presentar un comportamiento parabólico, esta conducta nos indica que existe una tendencia de incremento, la cual representa el régimen fluido y una de decremento, representando régimen congestionado.

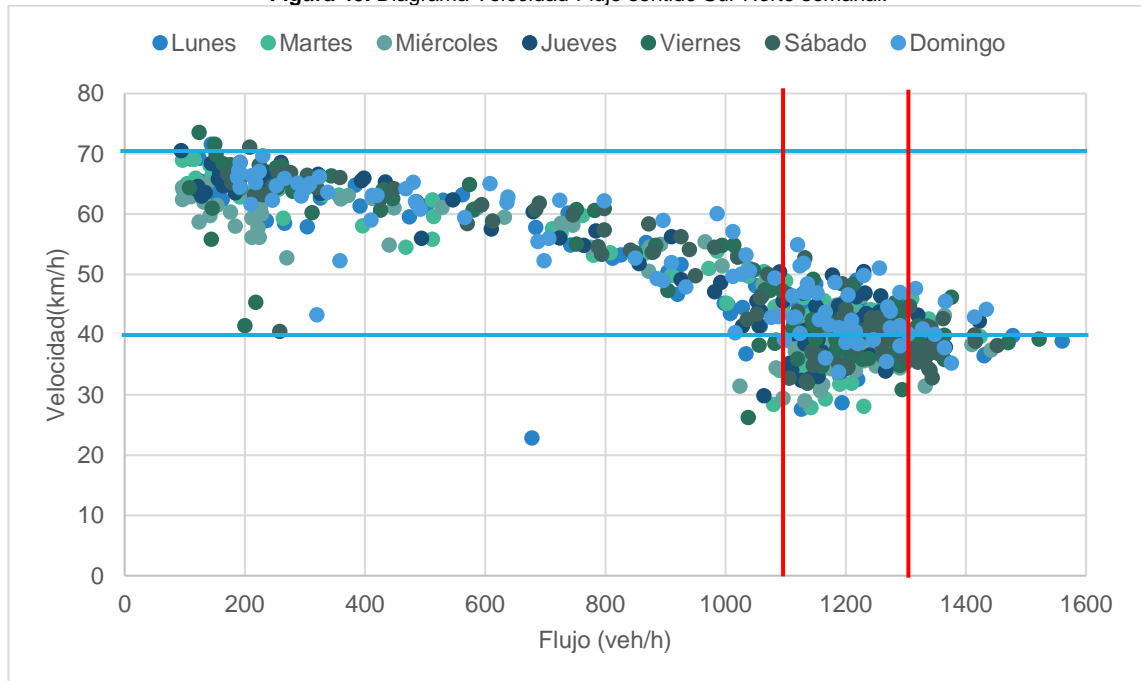
En el sentido de sur a norte:

- La Velocidad a flujo libre  $u_f = 70$  km/h.
- La Velocidad óptima  $u_m = 40$  km/h.
- Por consiguiente, los rangos de la capacidad varían de 1,100 a 1,350 veh/h/carril

En el sentido de norte a sur:

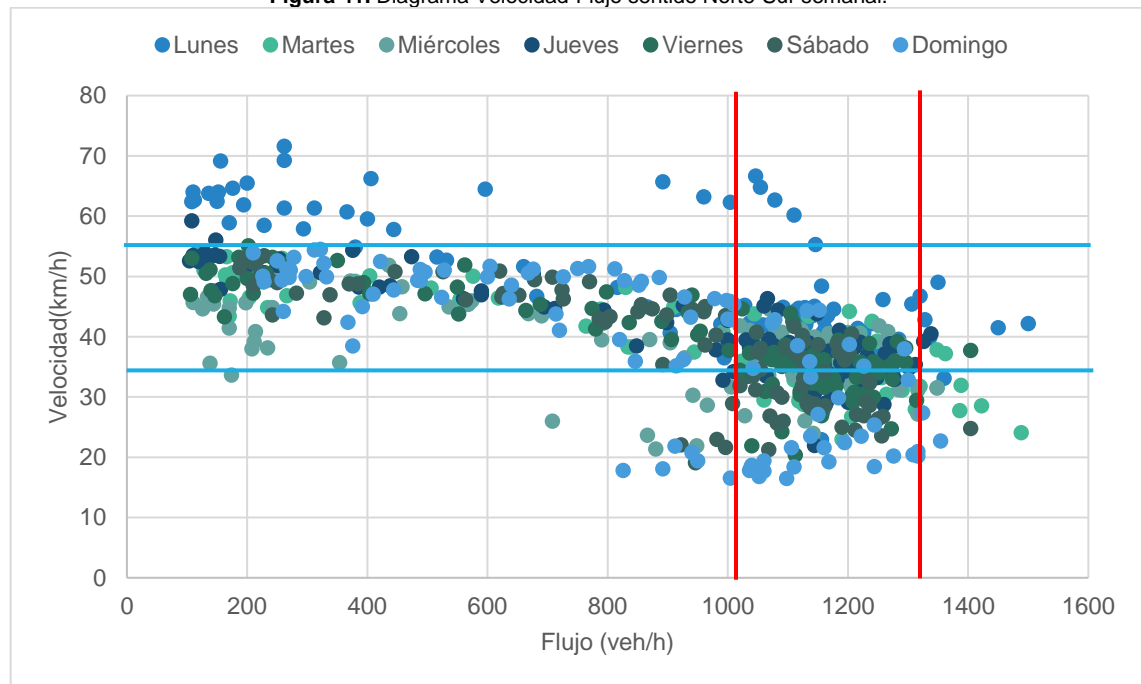
- La Velocidad a flujo libre  $u_f = 55$  km/h.
- La Velocidad óptima  $u_m = 35$  km/h.
- Por consiguiente, los rangos de la capacidad varían de 1,050 a 1,300 veh/h/carril

Figura 40. Diagrama Velocidad-Flujo sentido Sur-Norte semanal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Diagrama Velocidad-Flujo sentido Norte-Sur semanal.



Fuente: Elaboración propia.



## 4 Obtención de la capacidad.

Se presentan los hallazgos y análisis relacionados con la estimación de la capacidad a través de los 4 métodos referidos previamente.

### 4.1 Manual de capacidad de carreteras (HCM).

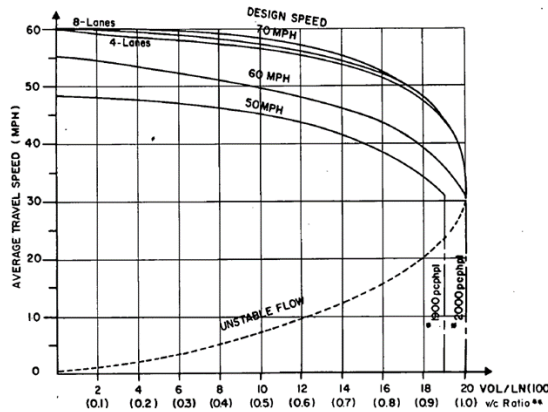
La capacidad del HCM se basa en los diagramas fundamentales de la teoría macroscópica (velocidad-flujo-densidad), el caudal vehicular presente en el vértice inferior de la gráfica velocidad-flujo se considera como la capacidad de la instalación. Si bien la metodología y teoría presentes en las diferentes versiones del manual HCM se han mantenido consistentes, se presentan variaciones en los comportamientos del flujo y en aplicaciones de algunos conceptos, como se mostró en la **Tabla 4. Comparación de la capacidad calculada en diferentes versiones del HCM (1965, 1985, 2000 y 2010).**

Los resultados obtenidos del análisis de las variables macroscópicas (ver **Figura 44**) presentan un comportamiento semejante a los datos presentados en el manual HCM del 85 (ver **Figura 42**), el cual tomaba en consideración las velocidades de diseño, posteriormente esta velocidad fue sustituida por la velocidad a flujo libre (ver **Figura 43**).

La principal razón respecto a las diferencias de comportamientos en torno al flujo vehicular se basa en las características geométricas, operativas y prevalecientes en el entorno de la zona de estudio. En el HCM 2010 (ver **Figura 43**) la velocidad a flujo libre se mantiene constante durante el periodo estable o un nivel de servicio óptimo (LOS C), hasta que comienzan a presentarse los problemas de saturación debido a una alta concentración vehicular y como consecuencia las velocidades comienzan a verse restringidas. Por otro lado, en el manual del 85, se presentan disminuciones abruptas en las velocidades de diseño, debido a diversos factores que no eran contemplados en un ajuste a la velocidad de diseño tales como: ancho de carril, ancho de acotamiento, tipo de cuerpo y número de accesos (contemplados en la fórmula de velocidad a flujo libre). Debido a la gran cantidad de accesos presentes en el tramo de estudio y las características

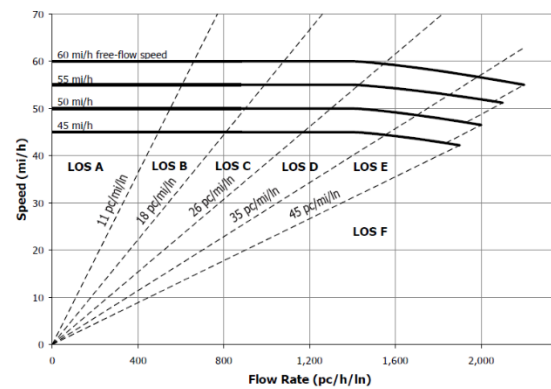
geométricas propias de la carretera, el comportamiento del gráfico de Velocidad-Flujo mostrado en **Figura 44** coincide con el comportamiento de la capacidad del HCM del 85, al no contar con acotamientos y una alta densidad vehicular (presenta una marcada tendencia de disminuciones constantes en las velocidad).

**Figura 42.** Curvas Velocidad-Flujo bajo condiciones óptimas.



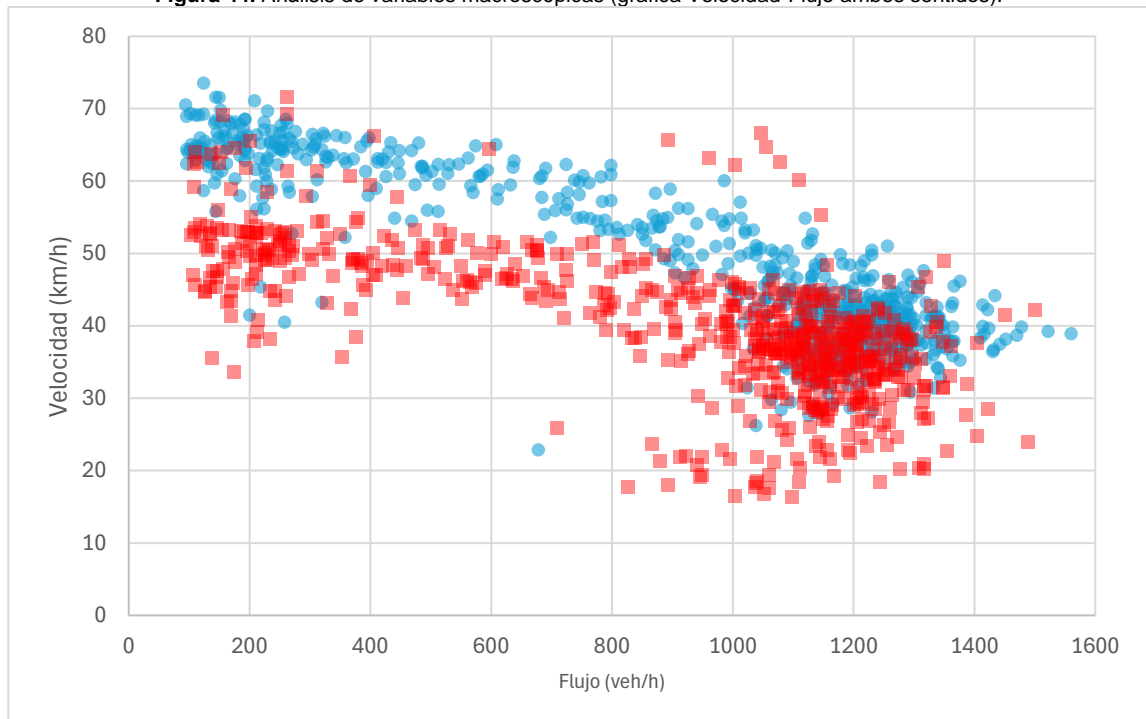
Fuente: HCM 1985.

**Figura 43.** Curvas Velocidad-Flujo bajo condiciones óptimas.



Fuente: HCM 2010.

**Figura 44.** Análisis de variables macroscópicas (gráfica Velocidad-Flujo ambos sentidos).



Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con el manual HCM 1985, la capacidad en el sentido de sur a norte es igual a 1,900 veh/h/carril, mientras que en el sentido de norte a sur es igual a 1,700 veh/h/carril (ver **Tabla 13**).

**Tabla 13.** Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con el HCM 1985.

Método	Sur-Norte		Norte Sur	
	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)
<b>HCM, 1985</b>	1,900	50	1,700	48

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Método de Van Aerde (VAM)

El modelo de Van Aerde representa la relación velocidad-flujo calibrado en base a los parámetros de avance variable descritos anteriormente, en el sentido de sur a norte se obtuvo una capacidad de 1,378 veh/h/carril, mientras que en el sentido de norte a sur se obtuvo una capacidad de 1,298 veh/h/carril (ver **Tabla 14**).

**Tabla 14.** Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con método VAM

Método	Sur-Norte		Norte Sur	
	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)
<b>VAM</b>	1,378	46	1,298	38

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 45** se muestra la curva velocidad-flujo obtenida a partir de los datos macroscópicos y la curva resultante del modelo de Van Aerde, se puede notar que:

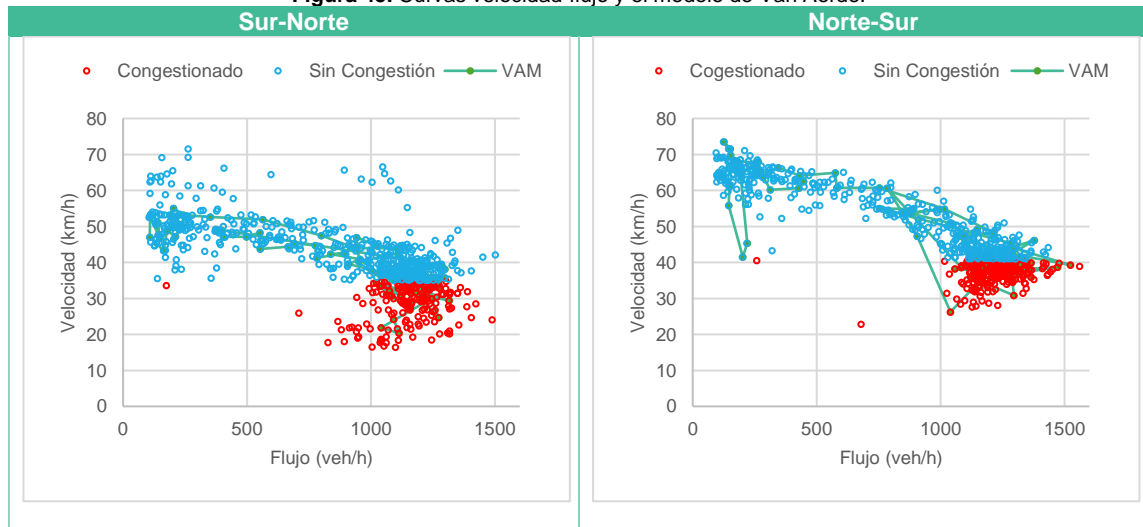
La capacidad en el modelo VAM se encuentra en el punto máximo observado.

Las velocidades superiores a 60 km/h (FFS) registran flujos pequeños, se encuentran en el régimen no congestionado.

Los rangos que se encuentran entre las velocidades a flujo libre (60 km/h) y la velocidad óptima (41 km/h) se mantiene en el régimen no congestionado. La disminución en la velocidad está relacionada directamente con los niveles de servicio.

Con velocidades menores 41 km/h se encuentra el régimen congestionado, las velocidades se ven seriamente restringidas formando cuellos de botella incrementando tiempos de espera por la presencia de filas.

Figura 45. Curvas velocidad-flujo y el modelo de Van Aerde.



Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Método de límite de producto (PLM)

El modelo PLM representa la relación entre el flujo vehicular y la capacidad que presenta la carretera en asimilar dicho flujo, en el sentido de sur a norte se obtuvo una capacidad de 1,382 veh/h/carril, mientras que en el sentido de norte a sur se obtuvo una capacidad de 1,306 veh/h/carril (ver **Tabla 15**).

Tabla 15. Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con método PLM.

Método	Sur-Norte		Norte Sur	
	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)
PLM	1,382	36	1,306	34

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 46** se presentan las curvas de supervivencia con una confianza del 95%, esta deriva de las estimaciones probabilísticas de que la capacidad en la carretera colapse. Se implementó el uso de un software de análisis estadístico (NCSS: Statistical Software) para resolver el análisis de supervivencia de Kaplan-Meier, se puede notar que:

La curva muestra que la capacidad calculada mediante el modelo PLM se encuentra en un punto de quiebre. Este punto representa el límite en el que la carretera puede manejar el flujo de vehículos sin colapsar o experimentar congestión significativa.

En el sentido de sur a norte podemos notar que:

Con flujos de hasta 1,254 veh/h se tienen porcentajes de supervivencia superiores al 50%. De lo anterior podemos interpretar que, para este flujo, la carretera opera en condiciones óptimas, las velocidades son cercanas a la velocidad de flujo libre y se tiene libertad para rebasar.

En el rango de 1,116-1,382 veh/h, se observa un declive pronunciado en la curva de supervivencia. Realizando un análisis retrospectivo, esta caída pronunciada en las probabilidades de supervivencia pueden compararse con las disminuciones en la velocidad que se presentan al aumentar los flujos vehiculares, si bien aún se mantiene en un flujo no congestionado, la libertad de rebase comienza a verse afectada por un aumento en la densidad vehicular.

La capacidad máxima sostenible de la carretera se alcanza con un flujo de 1,382 veh/h, a partir de este punto, comienzan los problemas de congestión en donde prácticamente toda libertad de maniobra y velocidades se ven seriamente restringida (cerca de 0%).

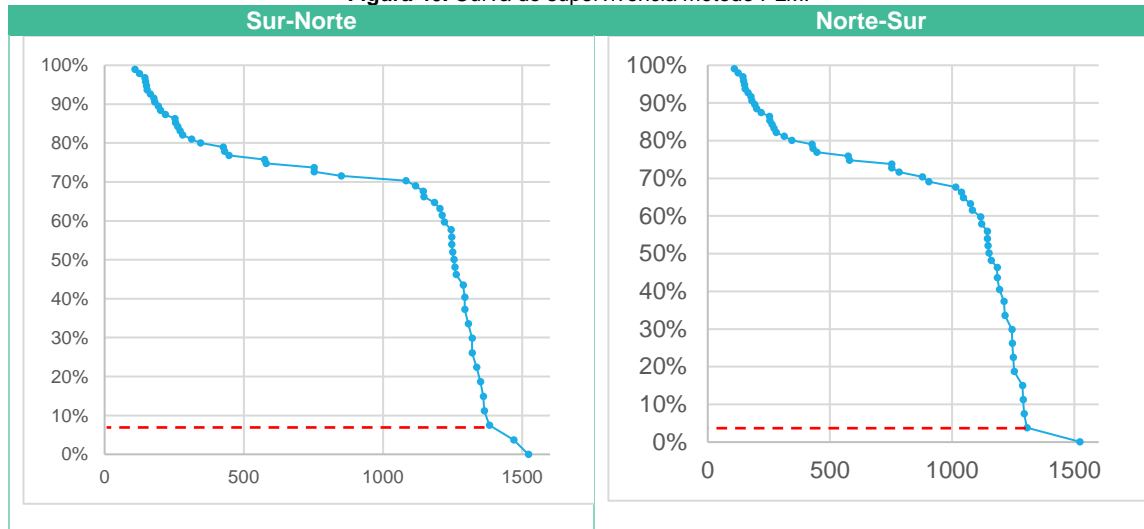
En el sentido de norte a sur podemos notar que:

Con flujos de hasta 1,160 veh/h se tienen porcentajes de supervivencia superiores al 50%.

En el rango de 1,014-1,306 veh/h, se observa un declive pronunciado en la curva de supervivencia.

La capacidad máxima sostenible de la carretera se alcanza con un flujo de 1,306 veh/h.

Figura 46. Curva de supervivencia método PLM.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Método del índice de flujo sostenible (SFI)

El modelo SFI representa la confiabilidad de que una carretera cumpla correctamente con un funcionamiento adecuado hasta saturarse, en el sentido de sur a norte se obtuvo una capacidad de 1,227 veh/h/carril, mientras que en el sentido de norte a sur se obtuvo una capacidad de 1,165 veh/h/carril (ver **Tabla 16**).

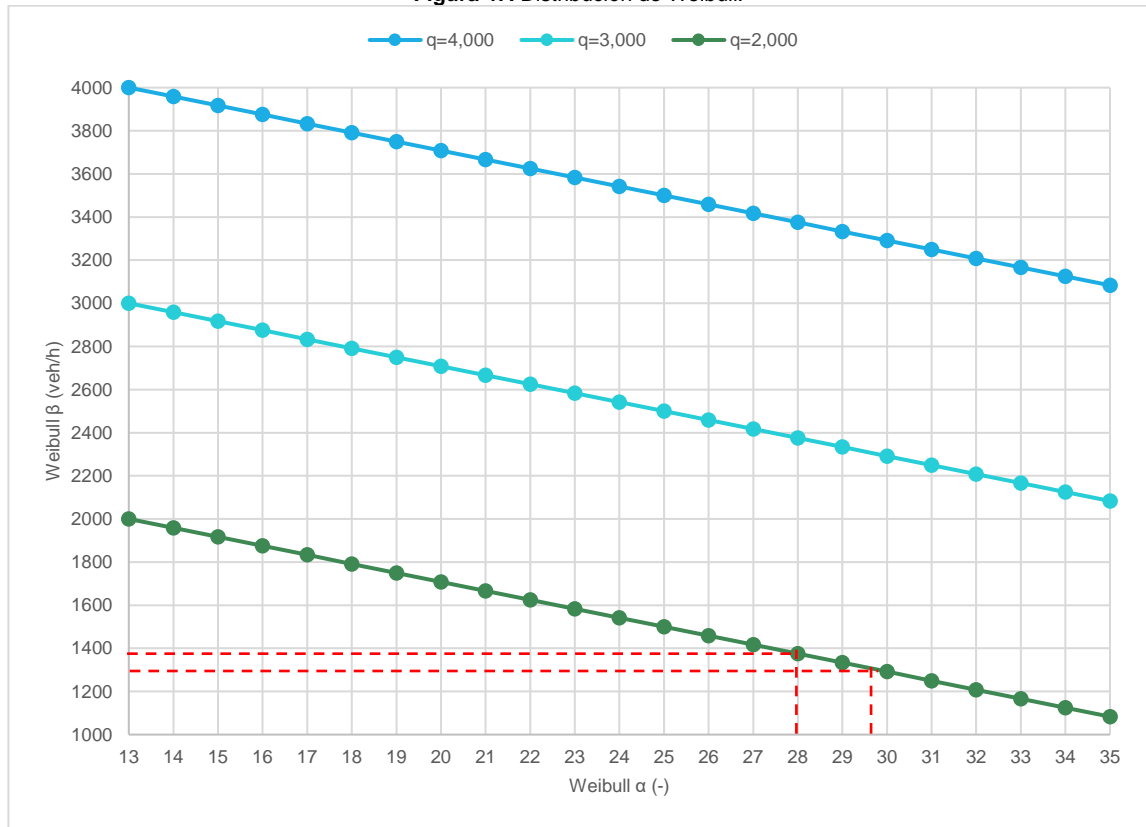
Tabla 16. Capacidad en una carretera de carriles múltiples de acuerdo con método SFI.

	Sur-Norte	Norte-Sur
Método	Capacidad (veh/h/carril)	Capacidad (veh/h/carril)
PLM	1,227	1,165

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 47** se presenta la distribución de Weibull, puesto que los intervalos de confianza al 95% son relativamente pequeños, se infiere que el volumen óptimo es un indicador estable de la capacidad de la carretera, de esta manera con las capacidades de 1,382 y 1,306 veh/h/carril obtenidas a partir del método PLM es que se obtiene el parámetro escala de la distribución de Weibull de  $\alpha = 28$  y 29.7 respectivamente.

Figura 47. Distribución de Weibull.



Fuente: Elaboración propia.

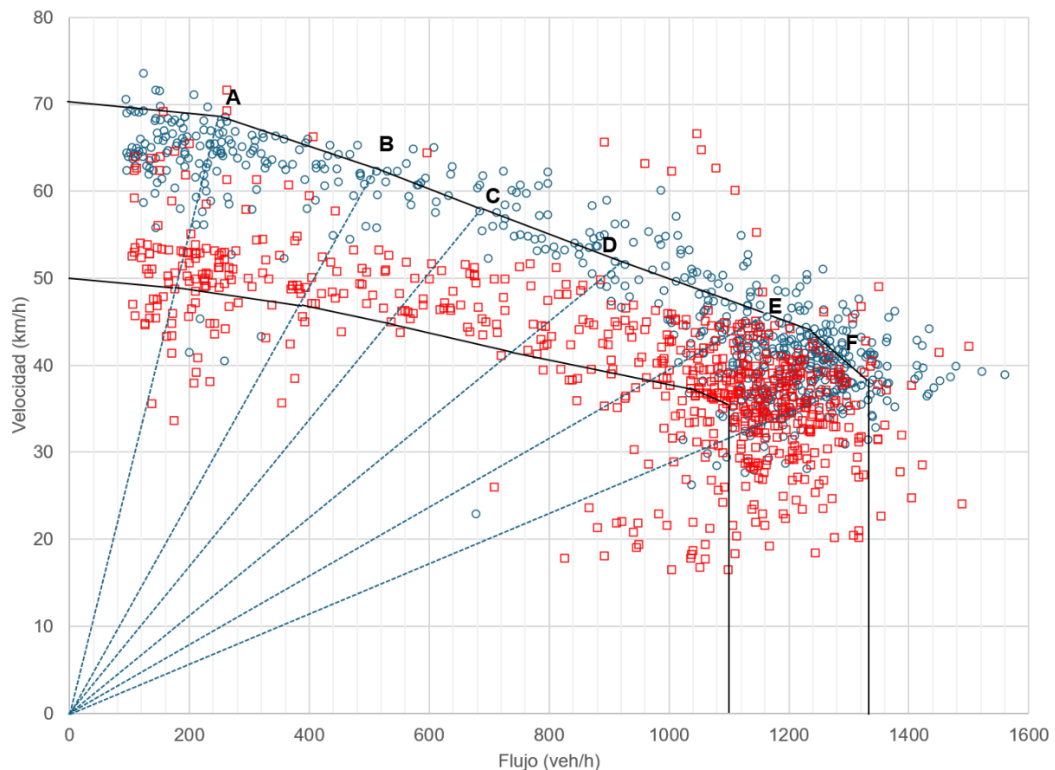


## 5 Nivel de servicio (LOS).

A partir de las comparaciones realizadas en el capítulos anteriores, se muestra que existen diferencias notables con los nomogramas del HCM en todas sus versiones (1965, 1985, 2000, 2010) tanto en la tendencia como en el orden de magnitud de la capacidad, por tal motivo el cálculo del nivel de servicio se realizó a partir de los resultados de las variables macroscópicas.

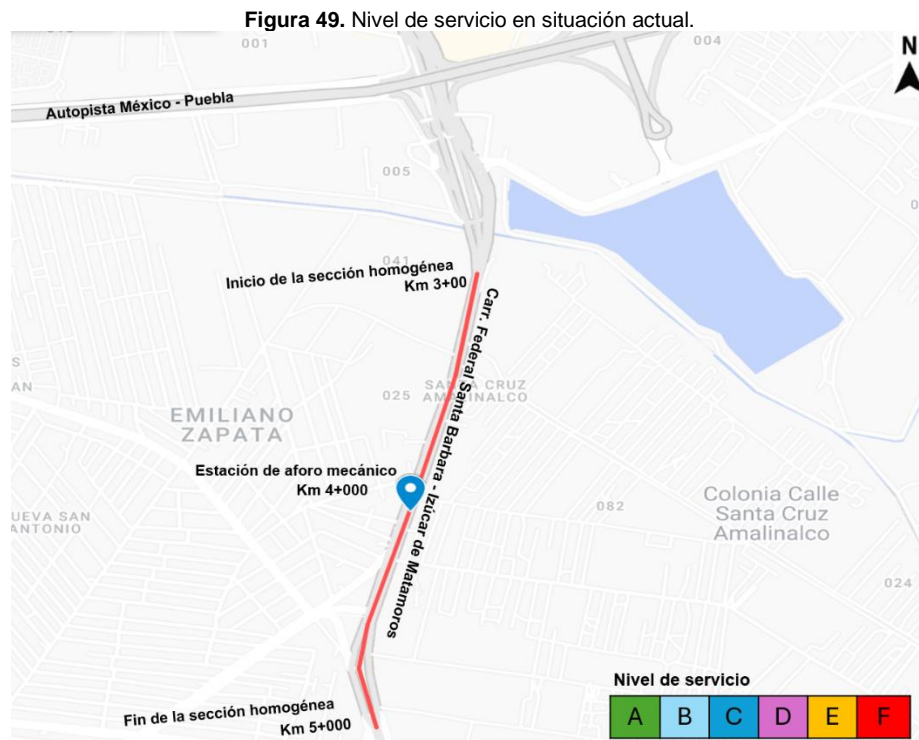
En la **Figura 48** se muestra la relación de los rangos del nivel de servicio con las curvas de velocidad-flujo resultantes en el caso de estudio, estas proporcionan una representación visual de cómo varían los niveles de servicio en función del comportamiento de las variables macroscópicas. Se distinguen los límites superior (sur-norte) e inferior (norte-sur) y teniendo en cuenta que la capacidad se define como el número máximo de vehículos que pueden transitar por un punto de una carretera de manera sostenida, se observa un grupo de puntos más concentrados y en rangos de flujo más altos en un rango de 1,100 a 1,350 veh/h.

**Figura 48.** Relación flujo-velocidad del tramo de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Se determinó que el nivel de servicio se encuentra en nivel F, la demanda de la carretera excede su capacidad, el flujo vehicular se encuentra en un estado de congestión severa, las velocidades de circulación son muy bajas y formación de filas propiciado una limitada libertad de maniobra con paradas y arranques frecuentes, la comodidad y seguridad de los usuarios es mínima debido al estrés y molestia causados por las demoras.



Fuente: Elaboración propia.

A partir de la metodología del HCM 1985 se determinó una densidad de 33 veh/km obteniendo como resultado un nivel de servicio D. En efecto, lo anterior implica una subestimación en los niveles de comodidad y conveniencia presentes en una carretera de dos carriles. Suponiendo que los niveles de servicio se interpretan en una escala de 1 a 6 donde 1 es igual al nivel de servicio “F” y 6 es igual al nivel de servicio “A” hablamos de una calificación de 1 contra 3, lo anterior representa una variación de 200%. Esta variación porcentual significativa subraya la discrepancia entre la evaluación teórica y las condiciones reales observadas en la carretera.

En la **Tabla 17** se presenta una comparativa detallada entre los límites de densidad del nivel de servicio (LOS) establecidos en el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM) del 85 y los datos empíricos obtenidos en el tramo en estudio. A través de esta comparación, se puede observar que el tramo alcanza su capacidad máxima según por definición, independientemente de la densidad del tráfico.

El HCM 1985 proporciona una serie de rangos de densidad para clasificar el nivel de servicio, que van desde el nivel A (densidad  $\leq 12$  veh/h/carril) hasta el nivel F (densidad  $> 44$  veh/h/carril). Sin embargo, los datos empíricos recopilados en el tramo en estudio indican que la capacidad de la carretera se alcanza antes de lo previsto por estos umbrales teóricos. Esto sugiere que, en la práctica, factores adicionales como las características geométricas de la carretera, el comportamiento de los conductores y las condiciones particulares influyen significativamente en la capacidad real de la carretera. Al comparar los límites de densidad teóricos con los datos empíricos, se evidencia que el tramo en estudio experimenta condiciones de flujo forzado y congestión severa a densidades más bajas de las esperadas (densidad  $> 26$  veh/h/carril).

**Tabla 17.** Comparativa de límites de densidad en los niveles de servicio

Fuente	Nivel de servicio	Límite inferior (sur-norte)		Límite superior (norte-sur)	
		Velocidad (km/h)	Densidad (veh/h/carril)	Velocidad (km/h)	Densidad (veh/h/carril)
HCM, 1985	A	70	$\leq 12$	50	$\leq 20$
	B	70	$\leq 20$	50	$\leq 28$
	C	70	$\leq 28$	50	$\leq 36$
	D	70	$\leq 36$	50	$\leq 44$
	E	70	$\leq 44$	50	$\leq 52$
	F	70	$> 44$	50	$> 52$
Datos empíricos	A	72	0	50	$> 4.5$
	B	72	$> 4.5$	50	$> 9.0$
	C	72	$> 9.0$	50	$> 12.0$
	D	72	$> 12.0$	50	$> 18.0$
	E	72	$> 18.0$	50	$> 26.0$
	F	72	$> 26.0$	50	

Fuente: Elaboración propia.

## 6 Análisis comparativo

Las ventajas y las desventajas de cada método se resumen en la **Tabla 18**.

**Tabla 18.** Ventajas y desventajas entre los métodos de estimación de capacidad.

Método	Ventajas	Desventajas
HCM	<p>Aplicación sencilla.</p> <p>No requiere la identificación de averías.</p> <p>Entrega un valor de capacidad único.</p> <p>Presenta cierto nivel de ajuste de acuerdo con la oferta-demanda.</p> <p>Fácil de entender.</p>	<p>Se determinó que el HCM puede subestimar o sobreestimar la capacidad de una carretera en México debido a las grandes diferencias encontradas con las variables macroscópicas.</p> <p>No se pueden representar impactos negativos tales como: malas condiciones climáticas o accidentes de tráfico.</p>
VAM	<p>Aplicación sencilla.</p> <p>No requiere la identificación de averías.</p> <p>No precisa de cálculos exhaustivos o laboriosos.</p> <p>Base en la teoría macroscópica de flujo vehicular.</p> <p>Retorna un valor único de capacidad.</p>	<p>Los valores de capacidad no están directamente vinculados a eventos de avería por tal motivo el método no es del todo efectivo en segmentos que no captan todo el espectro del régimen fluido y congestionado.</p>
PLM	<p>Estima la capacidad basándose en una función de distribución de probabilidad.</p> <p>La función de distribución de capacidad proporciona flexibilidad en elección del valor de capacidad basado en el desglose de probabilidad que sea apropiado para una aplicación dada.</p>	<p>Requiere la identificación de averías.</p> <p>Requiere cálculo intensivo de datos.</p> <p>No aplicable en sitios donde predomine el régimen fluido.</p>
SFI	<p>Estima la capacidad realizando un análisis de confiabilidad incrementando la confiabilidad de los resultados.</p> <p>Retorna un valor único de capacidad.</p>	<p>Requiere cálculo intensivo de datos.</p> <p>Requiere la identificación de averías.</p> <p>Complemento del método PLM.</p> <p>No aplicable en sitios donde predomine el régimen fluido.</p>

Fuente: Elaboración propia.

## Resumen de resultados

Se presenta un resumen general de los resultados alcanzados:

- **Recolección de datos:** Se llevó a cabo la recolección de datos de aforos vehiculares individuales. Esta recolección se realizó durante un período de 7 días, registrando datos las 24 horas del día en una carretera de dos carriles. Estos datos proporcionaron una muestra representativa y robusta para el análisis posterior.
- **Integración de la base de datos:** Esta base de datos comprende las observaciones del estudio de caso, una carretera de dos carriles con flujo continuo. La integración de estos datos permitió un análisis sistemático y eficiente.
- **Análisis del entorno:** Se realizó un análisis detallado del entorno de la carretera. Este análisis permitió identificar los efectos potenciales sobre la circulación y las variables macroscópicas de la configuración del tramo de estudio. Este paso es crucial para entender cómo el entorno puede influir en el flujo de tráfico y la capacidad de la carretera.
- **Establecimiento de la metodología:** Se estableció una metodología para la evaluación de la capacidad vial de las carreteras. Esta metodología incluye la recolección de información de datos individuales, su validación y un procesamiento orientado al análisis de la teoría macroscópica del flujo vehicular. Esta metodología proporciona un marco sólido para evaluar la capacidad de la carretera.
- **Construcción de diagramas bidimensionales:** Se construyeron diagramas bidimensionales de las variables macroscópicas del tránsito, que incluyen el flujo, la velocidad y la concentración. A partir de estos diagramas, se estimó la capacidad de la carretera utilizando cuatro métodos diferentes. Estos diagramas proporcionan una representación visual clara de las características del tráfico.
- Se identificaron los efectos de la nocturnidad, el entorno y la composición vehicular en la capacidad de la carretera. Estos factores pueden tener un

impacto significativo en la capacidad de la carretera y su identificación permite una comprensión más completa de la capacidad de la carretera.

- **Comparativa entre los métodos de cálculo:** Finalmente, se realizó una comparativa entre los cuatro métodos de cálculo utilizados para obtener la capacidad vial. Esta comparativa proporciona una visión más completa de la capacidad de la carretera y permite identificar el método que proporciona los resultados más precisos y útiles.

En la **Tabla 19** se presenta el resumen resultados de variables macroscópicas, obteniendo:

**Tabla 19.** Resumen de resultados de las variables macroscópicas.

Indicador	Resultado
TDPA (vehículos)	68,855
HP viernes (horas)	07:00
HV viernes (horas)	03:00
K'	0.057
D	0.503
Sur-Norte	
u <sub>r</sub> (km/h)	70
u <sub>m</sub> (km/h)	40
q <sub>m</sub> (veh/h/carril)	1,100-1,350
Norte-Sur	
u <sub>r</sub> (km/h)	55
u <sub>m</sub> (km/h)	35
q <sub>m</sub> (veh/h/carril)	1,050-1,300

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 20** se presenta el resumen resultados de la capacidad, obteniendo:

**Tabla 20.** Resumen de Resultados de la capacidad

Método	Sur-Norte		Norte Sur	
	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)	Capacidad (veh/h/carril)	Velocidad óptima (km/h)
HCM, 1985	1,900	50	1,700	48
VAM	1378	46	1298	38
PLM	1382	36	1306	34
SFI	1227	NA	1165	NA
Promedio	1417	41	1367	48
Desv. Estándar	328	8	231	7
Mediana	1302	38	1,302	48

Fuente: Elaboración propia, NA=no aplica.

## **Conclusiones.**

La presente tesis corresponde a un análisis empírico para determinar la capacidad en una carretera de dos carriles por sentido además de comparar el resultado del proceso de la evaluación del desempeño, planificación y organización en la determinación de la capacidad planteada en las diferentes versiones del manual HCM con los resultados obtenidos a partir de datos individuales en el sitio de estudio. Se obtuvo una muestra de datos de aforos individuales (por vehículo) con clasificación vehicular con registros de 7 días durante 24 horas para una carretera de dos carriles. Con esta información se integró una base de datos que constituyen las observaciones del estudio de caso.

Se realizó el análisis del entorno y se identificaron los efectos potenciales sobre la circulación y las variables macroscópicas de la configuración del tramo de estudio.

Se estableció una metodología para la evaluación de la capacidad vial de carreteras que incluye la colecta de información de datos individuales, validación y procesamiento orientado al análisis de la teoría macroscópica del flujo vehicular, la construcción de diagramas bidimensionales de las variables macroscópicas del tránsito (flujo, velocidad y concentración) y la estimación de la capacidad. La metodología se complementó con la estimación de la capacidad vial a través de los 4 métodos referidos previamente. Al respecto, se encontraron diferencias menores entre los métodos VAM, PLM Y SFI, aunque el comportamiento de las variables macroscópicas muestra que existen diferencias notables con los nomogramas del HCM en todas sus versiones (1965, 1985, 2000, 2010) tanto en la tendencia como en el orden de magnitud de la capacidad.

Se aplicó la metodología desarrollada para el estudio de caso, se analizaron las relaciones macroscópicas a través de los diagramas bidimensionales convencionales. Se identificaron los efectos de nocturnidad, entorno y composición vehicular. Se obtuvieron hallazgos relevantes que muestran la incompatibilidad de los diagramas de las relaciones macroscópicas respecto al

Manual de Capacidad de Estados Unidos del año 2010 el cual se emplea de manera generalizada en México para el análisis de las carreteras.

### **Respuesta a las preguntas de investigación:**

¿Cuál es la capacidad de una carretera de dos carriles de la red nacional? La capacidad se determinó a partir de la comparación entre los métodos ya presentados obteniendo variación promedio del 7.5% entre los 4 métodos, se obtuvo una capacidad promedio de 1417 veh/h/carril en sentido sur-norte y 1367 veh/h/carril en sentido norte-sur.

¿Qué factores influyen de manera importante en la capacidad de una carretera nacional? Los principales factores que afectan la capacidad son:

**Diseño geométrico:** La capacidad de una carretera puede verse afectada por su diseño geométrico, incluye el número de carriles, ancho de los carriles, la longitud, pendientes, tipo de terreno, rampas de acceso, la presencia de carriles de aceleración y desaceleración y retornos.

**Condiciones de circulación prevaeciente en la carretera de estudio:** Análisis de obstáculos y particularidades presentes en el entorno.

**Condiciones del tráfico:** Incluye la composición del tráfico, la proporción de vehículos pesados, la velocidad de los vehículos, la distancia entre vehículos, el comportamiento de los conductores, flujos y densidades vehiculares (variables macroscópicas).

**Regulaciones de tráfico:** Las regulaciones de tráfico, como los límites de velocidad y las restricciones de adelantamiento.

**Condiciones ambientales:** Las condiciones ambientales, como el clima y la iluminación, también afectan la capacidad de una carretera. Por ejemplo, la lluvia, la nieve y la niebla pueden reducir la visibilidad y hacer que los conductores reduzcan su velocidad, lo que a su vez puede reducir la capacidad de la carretera.

¿Qué implicaciones tendría en la planeación de carreteras mexicanas que el comportamiento de las variables macroscópicas del tránsito, los niveles de



servicio y la capacidad difieran de la práctica nacional basada en los manuales de capacidad de Estados Unidos? El principal problema de utilizar un manual sin tomar en cuenta las implicaciones propias de las carreteras mexicanas (características geométricas, condiciones del tráfico y de circulación) es que la capacidad puede ser sobreestimada. La sobreestimación de la capacidad de una carretera puede tener varias implicaciones, tanto en el corto como en el largo plazo:

**Subutilización de la Infraestructura:** Una carretera puede no estar siendo utilizada a su máxima capacidad, lo que puede ser un desperdicio de recursos. Caso contrario, una carretera sobreutilizada puede llevar a la congestión del tráfico y propiciar un desgaste acelerado de la infraestructura lo que significa problemas de planificación a largo plazo y problemas de inversión.

**Impacto Ambiental Innecesario:** La construcción de carreteras tiene un impacto significativo en el medio ambiente. Si se sobreestima la capacidad de una carretera, esto puede llevar a un impacto ambiental innecesario, incluyendo la pérdida de hábitats naturales y exceso de contaminación.

Al contrastar el TDPA de la estación maestra con los reportados en 2022 en datos viales de la SICT, se tuvieron variaciones sustanciosas debido a un desfase temporal de un año y ubicaciones diferentes de los puntos de medición de ambas fuentes. La diferencia entre el TPDA llega a ser hasta de un 21%. Se realizó el análisis del entorno y se identificaron los efectos potenciales sobre la circulación y las variables macroscópicas de la configuración del tramo de estudio.

Las metodologías desarrolladas en esta tesis presentan ciertas limitaciones que se deben tomar en cuenta:

El cálculo de la capacidad se realiza por un carril, para el caso de una carretera de dos carriles aún no se cuenta con un proceso que permita representar las características de rebase de vehículos que se presenta en carreteras de carriles múltiples, este fenómeno de rebase mejora el flujo vehicular ya que permitiría



superar obstáculos o vehículos pesados que por las condiciones viales deben transitar a velocidades bajas.

La metodología del HCM 2010 no permite representar impactos negativos en la carretera tales como: malas condiciones climáticas, accidentes de tráfico, cruces de ferrocarril u operaciones por obras en la carretera, caso contrario, con la metodología PLM tales efectos pueden ser representados a través de eventos de “falla o avería” permitiendo analizar que implicaciones o efectos repercuten en la capacidad. Tales efectos quedan fuera de los alcances de esta tesis.

La hipótesis planteada se verifica al demostrar que, mediante la teoría macroscópica, es posible identificar la capacidad vial de una carretera. Además, se ha comprobado no es viable utilizar el manual HCM 2010 para el cálculo de dicha capacidad, ya que se observó una diferencia significativa en el comportamiento de las variables macroscópicas y los nomogramas del HCM. Se determinó que el HCM puede subestimar o sobreestimar la capacidad de una carretera en México, llevando a decisiones de planificación y diseño que no optimizan el rendimiento. Por tal motivo es necesario revisar y adaptar las metodologías utilizadas para el cálculo de la capacidad vial, ya que incorporan enfoques más precisos y contextualmente relevantes.

Aun así, estos resultados no son definitivos puesto que sería necesario evaluar el comportamiento en más carreteras del país.

## Referencias

- AASHTO. (2018). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Agyemang-Duah, K., and Hall, F. L. (1991). *Freeway capacity drop and the definition of capacity*. Washington, DC: Transportation Research Record.
- Anuar, K., Habtemichael, F., & Cetin, M. (2015). *Estimating Traffic Flow Rate on Freeways from Probe Vehicle Data and Fundamental Diagram*. Mid-Atlantic Transportation Sustainability Center.
- Asgharzadeh, M. & Kondyli, A. (2018). Comparison of highway capacity estimation methods. Transportation Research Record.
- Brannolte, U. (1991). *Highway Capacity and Level of Service: Proceedings of the international symposium, Karlsruhe, 24-27 July 1991*. CRC Press.
- González, C. F. (2023). *Estudio de tráfico y movilidad en relación con la implantación de un centro comercial en Madrid. [Trabajo fin de master]*. Santander: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.
- Hernández, S. Devesa, H. Torres, G. Cruz, G. Arroyo, J. Gonzáles, J. (2020). *Guía para la ejecución de trabajos de campo para la determinación de la oferta y la demanda de los estudios de tránsito para el transporte carretero. Publicación Técnica 581*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Heshami, S., Kattan, L., Gong, Z., Aalami, S. (2019). *Deterministic and Stochastic Freeway Capacity Analysis Based on Weather Conditions*. Journal of Transportation Engineering.
- IMT. (2023, Diciembre 30). *Red Nacional de Caminos*. Retrieved from <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>



- INEGI. (2023, Diciembre 31). *Estadística Mensual de Vehículos de Motor Registrados en Circulación*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx>
- Kaplan, E. L.; Meier, P. (1958). *Nonparametric estimation from incomplete observations*. American Statistical Association.
- Liu, Z., Lyu, C., Wang, Z., Wang, S., Liu, P., & Meng, Q. (2023). *A Gaussian-Process-Based Data-Driven Traffic Flow Model and Its Application in Road Capacity Analysis*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- May, F. (1990). *Traffic flow fundamental*. Inglewood: Prentice Hall.
- Metrocount. (2018). *MTE Traffic data specialists v.5.05*. Australia: Metrocount.
- Minderhoud, M. M., Botma, H., and Bovy, P. H. L. (1997). *Roadway capacity estimation methods explained and assessed*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- ONU. (2007). *World Population Prospects: The 2006 Revision*. United Nations New York: ONU.
- Persaud, B. N., and Hurdle, V. F . (1991). *Highway capacity and level of service : proceedings of the International Symposium on Highway Capacity*. Karlsruhe, Germany: Balkema.
- Salvador et al. (2020). *Guía para la ejecución de trabajos de campo para la determinación de la oferta y la demanda de los estudios de tránsito para el transporte carretero. Publicación Técnica 581*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Shojaat, S., J. Geistefeldt, S. A. Parr, L. Escobar, and B. Wolshon. (2017). *Applying the Sustained Flow Index to Estimate Freeway Capacity*. Washington, D.C: Transportation Research Board.



- Shojaat, S., Mamdoohi, A. R., Saffarzadeh, M., & Parr, S. A. (2016). *A New Parametric Model for Freeway Capacity Based on Stochastic Approach: Case of an Iranian Freeway*. Transportation Research Board.
- SICT. (2018). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*. SICT.
- SICT. (2023, Diciembre 31). *Datos viales*. Retrieved from <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-serviciostecnicos/datos-viales/>
- SICT. (2023, Diciembre 25). *Capacidad y Niveles de Servicio en la Red Carretera*. Retrieved from <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-serviciostecnicos/datos-viales/>
- SICT. (2023, Diciembre 25). *Dirección General de Conservación de Carreteras*. Retrieved from <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-serviciostecnicos/datos-viales/>
- Torres, G. González, J. Arroyo, J. Hernández, S. (2018). *Estimación de niveles de servicio y velocidad de operación en segmentos de carreteras de dos carriles y carriles múltiples. Aplicación del Highway Capacity Manual. Publicación técnica 525*. SanFandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Transportation Research Board . (2014). *Innovative Applications of the Highway Capacity Manual 2010*. Transportation Research Board .
- Transportation Research Board. (1985). *HCM 1985 Highway Capacity Manual*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- Transportation Research Board. (2000). *HCM 2000 Highway Capacity Manual*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- Transportation Research Board. (2010). *HCM 2010 Highway Capacity Manual*. Washington, DC: Transportation Research Board.



- Transportation, O. D. (2011). *FHWA Vehicle Classification Scheme*. Federal Highway Administration.
- Van Aerde, M. (1995). *Single regime speed-flow density relationship for congested and uncongested highways*. Washington, DC: Transportation Research.
- Vázquez, R. trad. (1991). *Manual de capacidad vial 1985. Una visión ejecutiva. Publicación Técnica 17*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Zhao, L., & Laurence, R. (2015). *An analysis of four methodologies for estimating highway capacity from ITS data*. Journal Of Modern Transportation.