

Análisis del Flujo Vehicular y la Congestión que se Presenta en el Peaje Mesa de los Santos

Sandrith Marcela Vera Mendoza, Leidy Alexandra Camacho Camacho

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Luis David Arévalo Duran

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad Físico Mecánica

Escuela Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios, por permitirme culminar mi carrera, por darme sabiduría para afrontar las dificultades y todo el proceso que conllevó a terminar mis estudios, siempre está presente para darme fuerza y seguir adelante.

A mis padres que siempre me apoyaron y estuvieron para guiarme, darme sus consejos y regaños también; que estén en mi vida es el mejor regalo de Dios.

A mis hermanos que con sus palabras me motivaron para ser mejor, ustedes son luz en mi camino y que sean parte de mi es de gran orgullo.

A mis amigos del alma que con sus ocurrencias siempre sacaban una sonrisa, momentos inolvidables donde cada etapa de nuestras vidas seremos recordados.

SANDRITH MARCELA VERA MENDOZA

Dedicatoria

A Dios por darme la vida, sabiduría y esperanza de seguir adelante a pesar de los obstáculos presentes en el camino.

A mi Familia por todo su amor, apoyo y esa fuerza motivadora que no me dejo flaquear en ningún momento.

A mi novio por ser ese hombre incondicional que me brinda todo su amor y apoyo.

LEIDY ALEXANDRA CAMACHO CAMACHO

Agradecimientos

Los autores agradecen al ingeniero Luis Arévalo Duran por su constante apoyo y generosidad al brindarnos la oportunidad de adquirir su conocimiento y experiencia en el desarrollo del proyecto; donde su dirección fue fundamental para la creación de éste.

Y finalmente a familiares, compañeros y a la universidad Industrial de Santander que hicieron parte de este proceso educativo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Ubicación de la zona de estudio.....	15
3. Marco Teórico.....	15
4. Metodología.....	27
5. Resultados.....	28
6. Conclusiones	39
7. Recomendaciones.....	41
ReferenciaS Bibliográficas.....	42

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tiempo de vehículos que pasan en el transcurso de 15min en una distancia de 50m ...	29
Tabla 2. Valore obtenidos de los 150 vehículos	31
Tabla 3. Distribución de frecuencia de velocidades de punto	31
Tabla 4. Percentiles	33
Tabla 5. Tiempos de una estación de servicio	33
Tabla 6. Valores para la tasa de servicio.....	34
Tabla 7. Primer aforo vehicular	34
Tabla 8. Segundo aforo vehicular	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización del tramo de estudio en el departamento de Santander.....	14
Figura 2. Crecimiento de la población.....	16
Figura 3. Motorización e ingresos.....	18
Figura 4. Significado de la congestión.....	23
Figura 5. Sistemas de línea de espera.....	25
Figura 6. Localización del tramo de estudio para la velocidad.....	29
Figura 7. Histograma y polígono de velocidades de punto.....	33
Figura 8. Curva de frecuencia observada relativa.....	33
Figura 9. Curva de frecuencia acumulada relativa.....	33

Resumen

Título: Análisis del flujo vehicular y la congestión que se presenta en el peaje Mesa de los Santos±

Autor(es): Sandrith Marcela Vera Mendoza, Leidy Alexandra Camacho Camacho •

Palabras clave: congestionamiento, flujo, vehicular, densidad aforos

Descripción: Este trabajo se lleva a cabo con el fin de realizar el análisis del flujo vehicular y la congestión que presenta el peaje ubicado en la vía y con jurisdicción de la Mesa de los Santos Santander, mediante el cual se busca dar solución a la problemática que presenta actualmente referente al congestionamiento y las demoras en el sistema; esto se ejecutara mediante la realización de aforos vehiculares en los días y horas donde se presente el fenómeno de colas de vehículos de acuerdo con la información de flujos vehiculares máximos del estudio de la veeduría de la Cámara de Comercio de Bucaramanga. Se considerará tener en cuenta las características fundamentales del flujo vehicular las cuales abarcan el flujo, la velocidad y la densidad, como también la relación de demoras, la capacidad de la caseta, el fenómeno de colas y las relaciones que caracterizan el fenómeno de espera según la distribución de Poisson y un sistema de líneas de espera con varias estaciones de servicio y se define bajo el régimen $M/M/K$, donde k es el número de estaciones de servicio en el cual se tiene la expectativa de demostrar que la caseta con dos estaciones de servicio no tiene la capacidad de atender el congestionamiento que presenta y con ello mostrar la solución óptima que genere conformidad a los usuarios y comunidad en general.

±Trabajo de grado

•Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis David Arevalo Duran, Ingeniero Civil

Abstract

Title: Analysis of vehicular flow and congestion that occurs at the Mesa de los Santos toll±

Author: Sandrith Marcela Vera Mendoza, Leidy Alexandra Camacho Camacho•

Keywords: Congestion, vehicular Flow, speed, density, capacity.

Description: This work is carried out in order to carry out the analysis of the vehicular flow and the congestion presented by the toll located on the road and with the jurisdiction of the Mesa de los Santos Santander, through which it seeks to solve the problem presented currently concerning congestion and delays in the system; This will be carried out by carrying out vehicle gauging in the days and hours where the phenomenon of vehicle queues is presented in accordance with the information of maximum vehicle flows of the study of the oversight of the Chamber of Commerce of Bucaramanga. It will be considered to take into account the fundamental characteristics of the vehicular flow which include the flow, speed and density, as well as the ratio of delays, the capacity of the booth, the queue phenomenon and the relationships that characterize the waiting phenomenon according to Poisson distribution and a waiting line system with several service stations and is defined under the $M / M / K$ regime, where k is the number of service stations in which there is an expectation to show that the booth with two service stations does not have the capacity to meet the congestion it presents and thereby show the optimal solution that generates compliance to users and community in general.

±Bachelor Thesis

•Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis David Arévalo Duran, Ingeniero Civil

Introducción

En el transcurrir de los tiempos y con el avance del desarrollo de la sociedad, se ve reflejado el gran incremento en el flujo vehicular reportado en las vías y con un aumento notable los fines de semana. Viendo como problema el congestionamiento vehicular causado en diferentes puntos entre ellos las estaciones de peaje, surgió la tarea de realizar un estudio de flujo vehicular en un punto referente en horarios pico.

Los análisis que se realizarán serán basados en información de aforos de campo para estimar variables tales como el flujo, la velocidad y la densidad vehicular en términos de tasa de flujo, volumen, intervalos simples, intervalos promedio, velocidad temporal y espacial, velocidad media de recorrido, distancias de recorrido y tiempos de marcha, etc. Para este estudio se toma como referencia el peaje Mesa de los Santos Piedecuesta que se encuentra ubicado a la entrada del sector plano de la Mesa de los Santos, que desde tiempo atrás ha venido reportando congestión vehicular, hecho que se ha vuelto usual al final de cada periodo de descanso y por el cual la comunidad se ha visto afectada. La finalidad de proyecto es dar solución que lleve a resolver esta problemática que vive el sector y que impacte positivamente a los usuarios de la vía.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Identificar el fenómeno vehicular y la congestión que se presenta en el sector del peaje de la Mesa de los Santos y proponer soluciones a esta problemática.

1.2 Objetivos específicos

Realizar aforos vehiculares en los días y horas en donde se presenta el fenómeno de congestión y colas de vehículos.

Analizar el congestionamiento y el análisis de las distintas variables relacionadas con el flujo vehicular.

Determinar la relación de demoras, la capacidad de la caseta de peaje, el fenómeno de colas y las relaciones que caracterizan el fenómeno de espera.

Plantear soluciones para mitigar el fenómeno de espera.

2. Ubicación de la zona de estudio

La figura 1 muestra la ubicación del proyecto en estudio que consiste en el peaje de la Mesa de los Santos (Santander), está localizado a 45 minutos y a 62 kilómetros de la ciudad de Bucaramanga, pertenece a la Provincia de Soto y se halla al Oriente del Departamento de Santander. A cargo de la Gobernación de Santander.



Figura 1. Localización del tramo de estudio en el departamento Santander. Adaptado de Google Maps.

3. Marco Teórico

En la actualidad se hace presente el problema del incremento del flujo vehicular, las tendencias demográficas mundiales ponen de manifiesto una fuerte concentración de la población en los centros urbanos. A nivel mundial, cerca del 50% de la población reside actualmente en ciudades. En América Latina, ese porcentaje asciende al 76%, mientras que en Colombia es del 75%. Esta tendencia es el resultado de procesos migratorios, que resultan de cambios en la economía, de la

concentración de las inversiones públicas, y de numerosos aspectos políticos, sociales y culturales (*Figura 2*). En los países en desarrollo las grandes ciudades han crecido en tamaño y cantidad - en estos países ya hay 12 de más de 10 millones de habitantes. Adicionalmente, las ciudades intermedias también han crecido significativamente - la población en aquellas con 500 mil a un millón de habitantes se duplicó durante los últimos 25 años. En las próximas décadas se espera que todo el crecimiento demográfico se concentre en las ciudades.

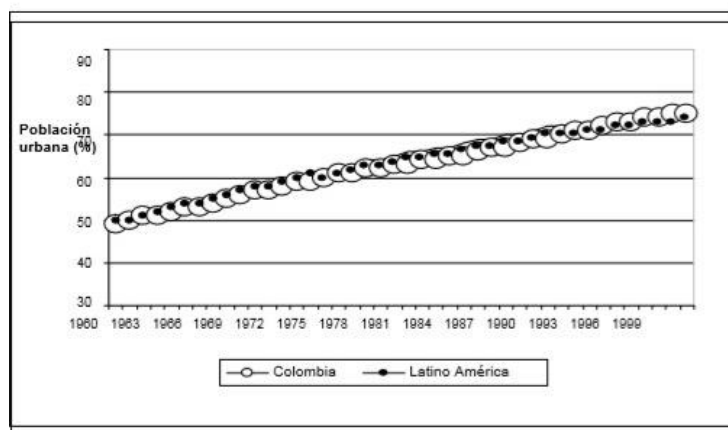


Figura 2. Crecimiento de la población. Adaptado de World Development Indicators.

Las ciudades se han ido consolidando paulatinamente como fuentes del crecimiento de los países, apoyadas en economías de aglomeración para la producción de bienes y servicios. Las actividades más productivas de la economía normalmente se ubican en los centros urbanos, concentrando de esta manera la generación de riqueza. En muchos países del mundo más del 80% del PIB se genera en las ciudades, y la comunidad de negocios observa con atención las condiciones que ofrece cada ciudad para localizar sus actividades, en el marco de un proceso de globalización creciente.

En las grandes ciudades del país como Bogotá, Medellín, Santiago de Cali, Barranquilla, Bucaramanga, Cartagena y Pereira se genera cerca del 70% del PIB y se concentra el 50% de la población nacional (aprox. 17 millones de personas).

Situación actual del transporte y retos futuros.

El crecimiento de las ciudades, la motorización y la expansión del área urbana le generan crecientes desafíos al sistema de transporte, al punto que las soluciones que adopten las ciudades al respecto pueden condicionar su competitividad futura en un sistema económico crecientemente globalizado. La experiencia internacional evidencia una muy alta correlación entre el PIB per cápita y la cantidad de vehículos por habitante (*Figura 3*). Esta tendencia representa un desafío para las ciudades en el mediano plazo, ya que la motorización mal gestionada puede tener efectos muy negativos sobre la pobreza y sobre la eficiencia de la economía urbana. Este es el caso, por ejemplo, de la inversión para ampliar la capacidad vial, la cual genera convergencia en tiempo, ruta y modo de viaje en aquellas vías donde se mejoran las condiciones de viaje y constituye una destinación de recursos inequitativa. En efecto, el gráfico 2 muestra que Colombia presenta un nivel de motorización por ingreso per cápita relativamente alto y que se encuentren en un punto donde sus decisiones de política pueden inducir un crecimiento más sostenible.

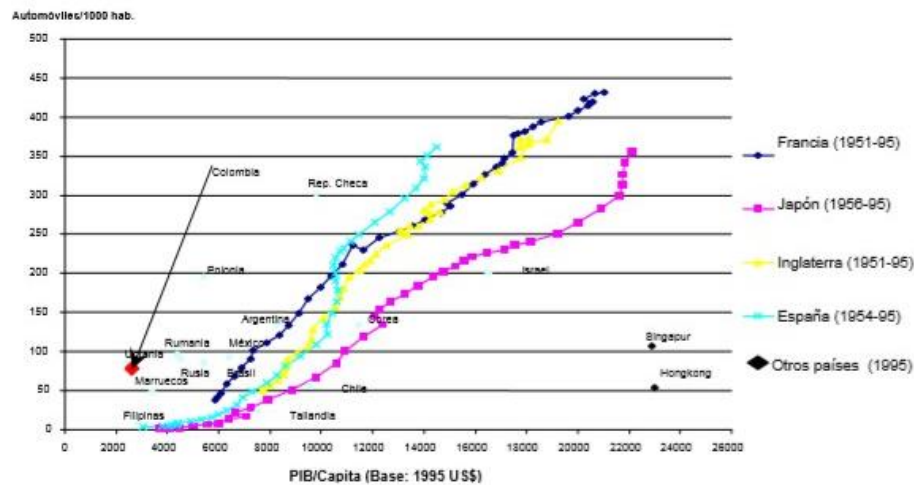


Figura 3. Motorización e ingresos. Adaptado de Banco Mundial (2002), Ciudades en Movimiento.

Lo anterior implica que a medida que los centros urbanos se desarrollen y aumenten los ingresos familiares, los usuarios de transporte público procurarán adquirir y utilizar vehículos privados en mayor proporción. Esta tendencia es evidente en Colombia – en menos de una década y media (1989-2002) el parque automotor en Colombia ha crecido más de un 125%, mientras que el PIB per cápita ha aumentado solo un 10% durante este mismo periodo. Esta tendencia inducirá a un aumento de la congestión de las ciudades, debido a que la provisión de nueva infraestructura para albergar los nuevos vehículos estará limitada por: i) reducidos espacios físicos disponibles; ii) costos de inversión muy superiores a la capacidad fiscal de los municipios; y iii) velocidad de construcción de las obras de la malla vial inferiores al crecimiento del número de vehículos que ingresan al sistema. De otra parte, las ciudades colombianas han utilizado tradicionalmente la infraestructura existente en forma ineficiente privilegiando su uso a los vehículos de transporte privado, los cuales movilizan en promedio únicamente el 25% de las personas que viajan en las ciudades (Documento Conpes, 2003, p.4).

Mediante el análisis del flujo vehicular se puede comprender las características y comportamientos del tránsito, requisitos fundamentales para el sistema de transporte. El objetivo al abordar el análisis del flujo vehicular, es principalmente, dar a conocer algunas metodologías e investigaciones, y sus aplicaciones más relevantes, con un particular énfasis en la distribución de los vehículos en una vialidad, y también las distribuciones estadísticas empleadas en el proyecto y control de tránsito (Cal, Reyes y Cárdenas, 2007, p.276-277).

Características fundamentales del flujo vehicular.

- El flujo
- La velocidad
- La densidad

Estas variables pueden ser remplazadas por variables asociadas, como el volumen, el intervalo, el espaciamiento, la distancia y el tiempo.

VARIABLES RELACIONADAS CON EL FLUJO.

Tasa del flujo o flujo (q) y volumen (q).

Es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. La tasa es pues el número de vehículos N que pasan durante un intervalo de tiempo específico T a una hora, expresada en veh/seg o veh/hora.

$$q = \frac{N}{T}$$

Intervalo simple (hi).

Es el intervalo de tiempo entre el paso de los vehículos consecutivos, generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

Intervalo promedio (h).

Es el promedio de todos los intervalos simples h_i existente entre diversos vehículos que simulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en segundos por vehículo y se calcula de la siguiente forma:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N - 1}$$

Donde:

h = intervalo promedio

N = Número de vehículos

$N - 1$ = Número de intervalos

h_i = Intervalo simple, entre vehículo i y el vehículo $i+1$

También se puede plantear la tasa de flujo de la siguiente relación

$$h = \frac{1}{q} \rightarrow \left(\frac{s}{veh} \right)$$

Variables relacionadas con la velocidad.

La velocidad de punto.

Se denomina velocidad de punto a aquella velocidad de los vehículos que recorren distancias relativamente pequeñas (25, 50, 70, 100 metros). Los estudios de la velocidad de punto se conducen para estimar la distribución de velocidades de vehículos en una corriente del tráfico, en una localización particular en una carretera.

La velocidad instantánea.

Es la velocidad que tiene un móvil en un instante de tiempo.

La velocidad media temporal.

Es la velocidad media de todos los vehículos que pasan por un perfil fijo de la carretera en un cierto periodo de tiempo

La velocidad media espacial.

Es la velocidad media de todos los vehículos que en un instante determinado están en un tramo de carretera dado.

La velocidad de recorrido.

Es la velocidad media conseguida por el vehículo a recorrer un tramo determinado de carretera.

La velocidad de marcha.

Es el resultado de dividir la distancia recorrida entre el tiempo durante el cual el vehículo estuvo en movimiento (Cal, Reyes y Cárdenas, 2007, p.259-264).

Variables relacionadas con la densidad.

La densidad o concentración.

Es el número N de vehículos que ocupa una longitud específica, d, de una vialidad en un momento dado.

$$K = \frac{N}{d}$$

Espaciamiento simple (si).

Es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, usualmente expresada en (m) y medida entre sus defensas traseras.

Espaciamiento promedio (s).

Es el promedio de todos los espaciamientos simples s (Cal, Reyes y Cárdenas, 2007, p.283).

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_i}{N - 1}$$

donde:

s = intervalo promedio

N = Número de vehículos

$N - 1$ = Número de intervalos

s_i = Intervalo simple, entre vehículo i y el vehículo $i+1$

También se puede plantear la tasa de flujo de la siguiente relación

$$s = \frac{1}{k} \rightarrow \left(\frac{m}{veh} \right)$$

Análisis de la congestión.

En general la capacidad de un sistema es el número máximo de entidades que pueden ser procesados por unidad de tiempo. De allí que, la congestión ocurre porque el sistema tiene una capacidad limitada y porque la demanda colocada y el proceso mismo tienen un carácter aleatorio. Considérese un sistema con una capacidad de μ entidades por unidad de tiempo, conocida también como tasa de servicio. Como se vio en el capítulo 10, la capacidad es la tasa máxima y su inverso es el intervalo máximo; puede decirse que cada entidad consume un tiempo promedio t_p en ser procesado (servidor) de:

$$t_p = \frac{1}{\mu}$$

Si las entidades llegan a una tasa λ por unidad de tiempo, entonces el tiempo total de procesamiento t_T por entidad será de:

$$t_T = \begin{cases} t_p, & \text{para } \lambda \leq \mu \\ \infty, & \text{para } \lambda > \mu \end{cases}$$

Esto se ilustra en la parte a) de la *figura 4*.

Si $\lambda > \mu$, puede ocurrir que: (1) el sistema colapse, esto es, que exista una completa congestión tal que no se procesen unidades ($tT = \infty$); (2) se forme una cola de espera que crece cada vez más ($t_p \rightarrow \infty$); o (3) bajo condiciones de estado no estacionarias, solamente cuando $\lambda > \mu$ por un intervalo limitado de tiempo, la cola que se forma eventualmente se disipa. Por otra parte, si λ y/o μ son variables aleatorias, incluso cuando $\lambda < \mu$, las colas se pueden formar. Por lo anterior, en cualquier condición de estado (estacionario o no), el tiempo total de procesamiento tT , por unidad, es igual al tiempo promedio de procesamiento t_p más el tiempo de demora tD . Esto es:

$$t_T = t_p + t_D$$

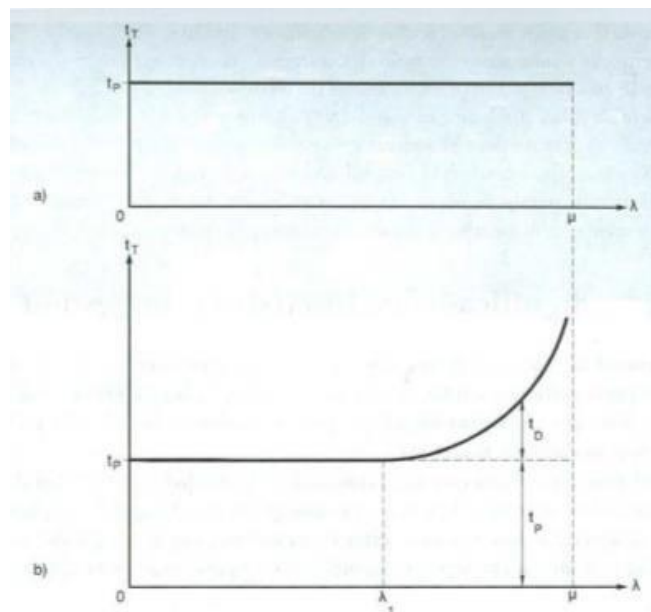


Figura 4. Significado de la congestión. Adaptado de Cal R. Reyes M. y Cárdenas J. (2007). Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones. México 8ª Edición. Editorial Alfaomega.

El significado práctico de la congestión se ilustra en la parte b) de la figura 4, cuya explicación analítica es la siguiente:

Para el rango de llegada, $0 < \lambda < \lambda_1$, no hay congestión, $tT = tP$, ya que $tD = 0$.

Para $\lambda > \lambda_1$, existe congestión puesto que $tD > 0$, o lo que es lo mismo $tT > tP$.

Si λ se incrementa hasta que se aproxime a μ , las demoras tD se incrementaran aún más. Para cualquier nivel de demanda λ mayor que la capacidad μ , $\lambda > \mu$, la cola crecerá infinitamente si el nivel de demanda permanece constante. Si λ varia, entonces a cola empezara a disiparse, siempre y cuando λ caiga por debajo de μ .

Elementos de un sistema de filas de espera

De aquí en adelante, se usará indistintamente el término cola, fila o línea de espera. Para caracterizar un fenómeno de espera en un sistema vial de servicios, es necesario responder a interrogantes tales como:

- ¿A qué hora empieza y termina el congestionamiento?
- ¿Cuál es el número medio de vehículos en el sistema?
- ¿Cuál es el número medio de vehículos en la cola?
- ¿Cuál es el tiempo medio en el sistema
- ¿Cuál es el tiempo medio de espera o demora media?
- ¿Cuál es la longitud máxima de cola?
- ¿Cuál es la demora máxima?
- ¿Cuál es la demora total de todo el tránsito?
- ¿Cuál es la proporción de tiempo en que se utiliza el sistema?
- ¿Cuál es la proporción de tiempo cuando el sistema permanece inactivo?

Se genera una cola cuando los usuarios (vehículos) llegan a una estación de servicio cualquiera, ya sea, por ejemplo, un estacionamiento, una intersección con semáforos 0 no, un "cuello de botella", un enlace de entrada a una autopista, un carril especial de vuelta, etc. La prestación del servicio para cada llegada toma cierto tiempo y puede ofrecerlo una o más estaciones. En la figura 3 se muestran esquemáticamente diversos sistemas de filas de espera.

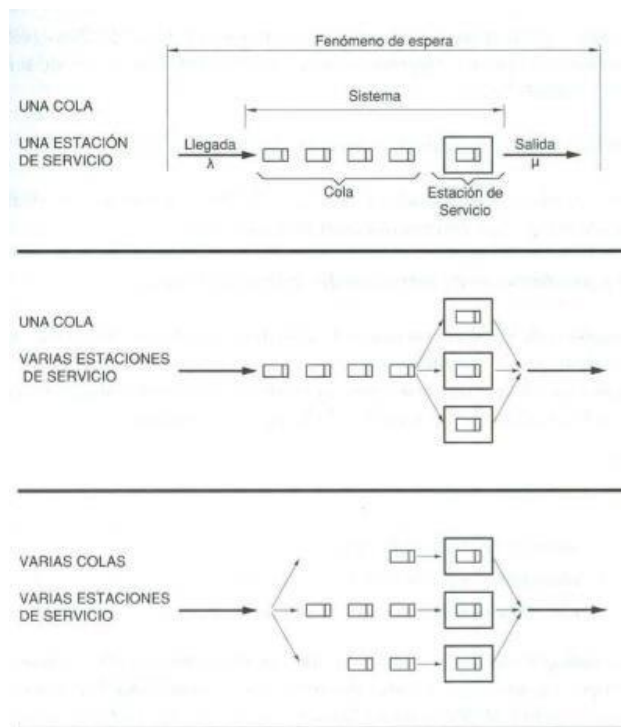


Figura 5. Sistema de filas de espera. Adaptado de Cal R. Reyes M. y Cárdenas J. (2007). Ingeniería de Transito. Fundamentos y aplicaciones. México 8ª Edición. Editorial Alfaomega.

Los vehículos llegan al sistema a una tasa de llegadas λ . Entran a la estación de servicio si está desocupada, donde son atendidos a una tasa media de servicio μ , equivalente a la tasa de salidas. Si la estación de servicio está ocupada se forman en la cola a esperar ser atendidos. Frecuentemente, tanto la tasa de llegadas como la tasa de servicios varían, causando que también varíe la formación de colas. Se define la cola como el número de vehículos que esperan ser servidos, sin incluir aquellos que actualmente están siendo atendidos. Para considerar de una manera apropiada un sistema de filas de espera se requiere tener en cuenta la naturaleza de su comportamiento, puesto que tanto las llegadas como los servicios varían con el tiempo. En este sentido, el comportamiento de la cola y los modelos necesarios para describirla, o caracterizarla, dependen de la representación explícita de los siguientes elementos que conforman el proceso:

1. Las llegadas (demanda) o características de entrada:

Las llegadas pueden ser expresadas en términos de tasas de flujo (vehículos/ hora) o intervalos de tiempo (segundos/ vehículo). Su distribución puede ser de tipo determinístico o probabilístico.

2. Los servicios (capacidad) o características de salida:

También pueden ser expresados como tasas de flujo o intervalos. Su distribución también puede ser de tipo determinístico o probabilístico.

3. El procedimiento de servicio o disciplina de la cola:

En la mayoría de los sistemas viales el procedimiento de servicios consiste en que el primero que llega es el primero que sale. El régimen que define las características de un fenómeno de espera se denota por tres valores alfanuméricos representados de la siguiente manera:

a/b/c

Donde:

a - identifica el tipo de llegadas

b - identifica el tipo de servicios o salidas

c - identifica el número de estaciones de servicio

Así, por ejemplo, un fenómeno de espera con un régimen D/D/1 supone llegadas y salidas de tipo determinístico o a intervalos uniformes con una estación de servicio. Por otra parte, un régimen M/M/1 supone llegadas y salidas de tipo probabilístico (se simboliza con la letra M pues se asume que el proceso es del tipo de modelo de Markov) o distribuidas exponencialmente con una estación de servicio (Cal, Reyes y Cárdenas, 2007, p.329-332).

Análisis probabilístico de líneas de espera.

Por tratarse de una introducción al análisis probabilístico de líneas, o filas de espera, sólo se presentarán los dos modelos más generales y sencillos de mayor aplicación en problemas de

tránsito. Más aún, las relaciones que se muestran son completamente válidas solamente para condiciones de estado estacionario, esto es, ellas solamente se aplican cuando los patrones de llegadas y servicios se sostienen por largos períodos. Por lo tanto, este enfoque no se puede aplicar a aquellas situaciones de máxima demanda en las cuales los flujos de llegadas λ exceden la capacidad μ . De allí que, para tener condiciones de flujo en estado estacionario debe cumplirse que $\lambda < \mu$. Es importante aclarar, como se mencionó anteriormente, que, aunque las llegadas son menores que las salidas, siempre existe la posibilidad de formación de colas, por el mismo carácter aleatorio del proceso.

Sistema de líneas de espera con una estación de servicio.

A continuación, se analizará el sistema de líneas de espera con una estación de servicio, llegadas distribuidas de acuerdo a una distribución de Poisson, tiempos de servicio exponenciales y disciplina de servicio "el que llega primero es servido primero". Como puede verse, este sistema de filas de espera se define bajo el régimen M/M/1, para el cual se han desarrollado una serie de medidas de efectividad que permiten identificarlo. Estas relaciones son los resultados que se observarían después de que el sistema haya estado en operación por un largo tiempo, tal que los promedios y las probabilidades no cambian mientras que éste se mantenga en funcionamiento (Cal, Reyes y Cárdenas, 2007, p.343).

4. Metodología

Inicia con la revisión de documentos en las bases bibliográficas del tema propuesto como (documentos conpes, 2003). Libro relacionado con el tránsito (Cal, Reyes y Cárdenas, 2007). (Cámara de comercio de Bucaramanga, 2018,2019), etc. Se plantea la investigación de la

importancia de intervenir en el peaje de la Mesa de los Santos para dar solución de la problemática que presenta.

Se tomará la información para un día y horas específicas de acuerdo con la información de flujos vehiculares máximos del estudio de la veeduría de la Cámara de Comercio de Bucaramanga publicado en el 2016.

Realizar el análisis del flujo vehicular y congestionamiento tomando como referencia las tres variables principales (densidad, flujo vehicular y velocidad) reportadas durante las visitas a campo.

Analizar las líneas de espera según la distribución de Poisson, tiempos de servicios exponenciales y disciplina de servicio, con una línea de espera y varias estaciones de servicio.

Se estudia las posibles soluciones para dar movilidad a la congestión presentada en la Mesa de los Santos.

5. Resultados

Para la velocidad

En la entrada del Pony parque hacia el peaje Mesa de los Santos se tomó un tramo de 50 m donde se contaron 122 vehículos durante 15 min y se cronometraron los siguientes tiempos (tabla 1).



Figura 6. Localización del tramo de estudio para la velocidad. Adaptado de Google Maps.

Se desea calcular: la tasa de flujo, intervalo promedio, velocidad media espacial, densidad, espaciamiento promedio.

Tabla 1.

Tiempo de vehículos que pasaron en el transcurso de 15min en una distancia de 50 m

n° de vehículos	tiempo (s)	tiempo*n° vehículos
3	5,0	14,88
2	5,5	11,02
9	6,0	54
3	6,5	19,44
5	6,7	33,3
3	6,8	20,28
20	7,0	139,8
6	7,5	44,88
10	7,7	77
10	8,0	80,4
12	8,6	102,84
2	8,8	17,52
16	9,8	157,44
3	10,3	30,96
2	10,7	21,3
14	11,0	154
2	11,8	23,56
		1002,62

Tasa de flujo q:

$$q = \frac{N}{T} = \frac{122Veh}{15min} \left(\frac{60min}{1h} \right) \quad (6)$$

$$q = 488 \frac{Veh}{h}$$

Intervalo promedio:

$$h = \frac{1}{q} = \frac{1}{488 \left(\frac{veh}{h} \right)} \left(\frac{3600seg}{1h} \right) \quad (7)$$

$$h = \frac{1}{q} = 7,38 \left(\frac{seg}{veh} \right)$$

Velocidad media espacial: Ve

$$Ve = \frac{d}{t} = \frac{d}{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{iti})}{n}} = \frac{d}{\frac{\sum_{i=1}^{122} (f_{iti})}{122}} \quad (8)$$

$$Ve = \frac{d}{t} = 21,90 \frac{Km}{h}$$

Velocidad media temporal: Vt

$$Vt = \frac{d}{t_i} = \frac{1Km}{1000m} \left(\frac{3600seg}{1h} \right) \quad (9)$$

Densidad: k

$$K = \frac{q}{V_e} = \frac{488}{21,9} \quad (10)$$

$$K = \frac{Q}{V_e} = 22,3 \cong 22 \frac{veh}{Km}$$

Espaciamento promedio: δ

$$\delta = \frac{1}{k} \left(\frac{1000m}{1Km} \right) \quad (11)$$

$$\delta = \frac{1}{k} = 45,45 \left(\frac{m}{veh} \right)$$

En el mismo tramo de 50 m se cronometra el tiempo de 150 vehículos con el fin de realizar un análisis estadístico para determinar el comportamiento de las velocidades de punto, y de esta forma determinar las 4 clases de percentiles.

Tabla 2.*Valores obtenidos de los 150 vehículos*

Velocidad mínima	19,93
Velocidad máxima	55,56
rango	35,62
n° intervalos	10
Paso	4
N	150

Tabla 3.*Distribución de frecuencia de velocidades de punto*

Intervalo de clase grupos de velocidad		punto medio	Frecuencia Observada		Frecuencia Acumulada	
Km/h		vi (Km/hora)	Absoluta fi	Relativa $(fi/n) \cdot 100$	Absoluta fia	Relativa $(fia/n) \cdot 100$
19,93	23,93	22	10	6,7	10	7
23,93	27,93	26	25	16,7	35	23
27,93	31,93	30	38	25,3	73	49
31,93	35,93	34	40	26,7	113	75
35,93	39,93	38	22	14,7	135	90
39,93	43,93	42	11	7,3	146	97
43,93	47,93	46	3	2,0	149	99
47,93	51,93	50	0	0,0	149	99
51,93	55,56	54	1	0,7	150	100

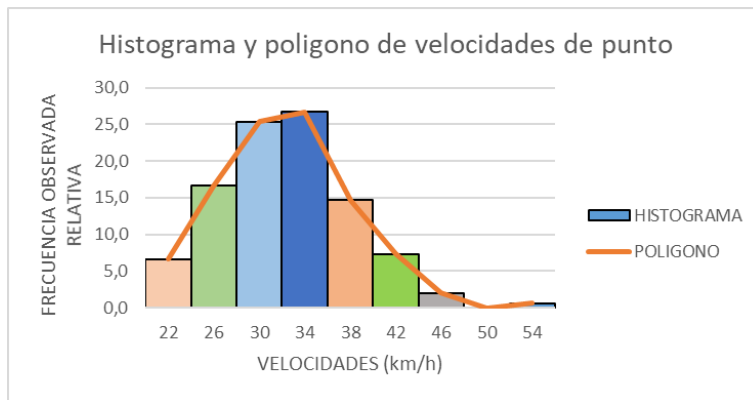


Figura 7. Histograma y polígono de velocidades de punto.

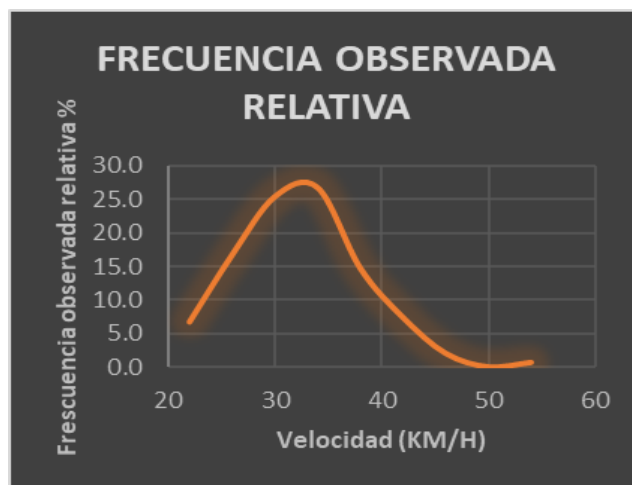


Figura 8. Curva de frecuencia observada relativa.

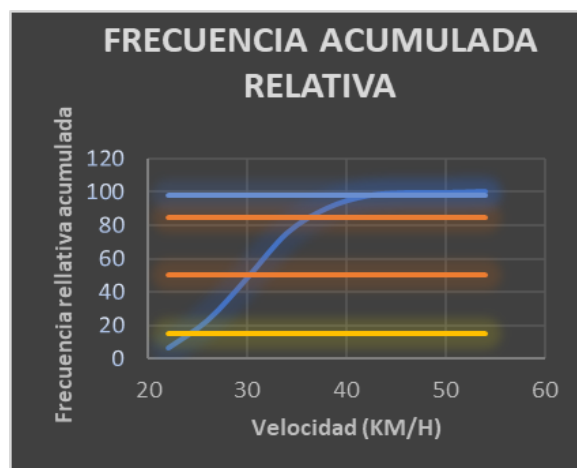


Figura 9. Curva de frecuencia acumulada relativa.

Tabla 4.
Percentiles

PERCENTIL	VELOCIDAD(KM/H)	DEFINICIÓN
15	24	valor mínima velocidad
50	30	valor media velocidad
85	35,5	Velocidad operación
98	42,5	Velocidad de diseño

Para el tiempo de espera en la caseta

Se toma el tiempo de atención de los vehículos que llegan a una de las estaciones de servicio de la caseta por 1 horas, para obtener un tiempo promedio y con ello calcular la tasa de servicio μ , cabe señalar que el valor calculado es de una sola estación de servicio y ese valor se usa para las 2 o más estaciones de servicio que están o se pueda implementar en el peaje.

Tabla 5.
Tiempos de una estación de servicio

3:15pm		3:30pm		3:45pm		4:00pm	
13,58	14,47	8,61	9,11	17,34		34	11,8
12,09	4,88	5,83	11,06	11,61	4,72	9,25	14,22
5,58	8,17	9,71	29,73	9,47	14,52	13,63	28,76
9,36	10,91	9,62	16,26	14,07	6,97	12,39	27,6
12,77	23,66	16,95	28,62	10,66	4,21	9,62	41,67
15,61	17,16	18,74	14,61	38,9	19,23	9,88	12,08
20,06	11,88	12,14	6,28	9,81	14,06	8,59	18,46
12,01	15,05	20,94	8,93	7,48	4,08	21,69	17,71
6,57	13,66	10,84	13,26	13,66	10,86	4,39	8,31
16,62	8,92	21,7	20,16	13,17	13,43	8,98	11,75
13,52	15,95	12,67	12,81	10,11	10,09	19,93	9,68
13,94	22,53	10,17	20,77	14,19	15,93	8,19	8,46
9,12	10,86	20,77	16,64	14,22	14,28	16,52	15,41
22,01	27,12	11,3	9,32	7,11	11,97	9,3	12,15
8,56	6,57	11,36	15,72	13,15	14,67	13,29	6,29
6,27	7,39	14,86	14,75	7,27	7,1	26,56	44,05
12,06	25,78	12,08	8,31	14,68	13,65	11,75	8,98
12,82	11,91	20,45	22,85	29,25	8,81	10,94	23,85
19	5,9			9,82	11,5	9,89	5,69
6,58	10,14			16,11	13,09	13,41	10,69
15,12	8,62						

$$\mu = \frac{3600}{13,87} = 259,55 \cong 260 \frac{veh}{h}$$

Tabla 6.*Valores para la tasa de servicio*

N° de vehículos	157	veh/h
Dos casetas	314	veh/h
Tiempo promedio	13,87	Segundos
Tasa de servicio	260	veh/h

Para el congestionamiento

De acuerdo con la información de flujos vehiculares máximos del estudio de la veeduría de la Cámara de Comercio de Bucaramanga publicado en el 2016 se analiza que los días de mayor congestionamiento son los fines de semana cuando hay festivos, por tal razón se llevaron a cabo los aforos vehiculares los días 13 de octubre y 10 de noviembre del 2019.

Aforo vehicular**Tabla 7.***Primer aforo vehicular*

intervalo de tiempo	Volumen cada 15min	Volumen por Hora
4:00-4:15	83	391
4:15-4:30	101	
4:30-4:45	102	
4:45-5:00	105	
5:00-5:15	108	507
5:15-5:30	138	
5:30-5:45	130	
5:45-6:00	131	
6:00-6:15	143	554
6:15-6:30	155	
6:30-6:45	121	
6:45-7:00	135	
7:00-7:15	154	602
7:15-7:30	147	
7:30-7:45	136	
7:45-8:00	165	

Tabla 8.*Segundo aforo vehicular*

intervalo de tiempo	Volumen cada 15min	Volumen por Hora
4:00-4:15	127	453
4:15-4:30	94	
4:30-4:45	110	
4:45-5:00	122	
5:00-5:15	146	581
5:15-5:30	155	
5:30-5:45.	133	
5:45-6:00	147	
6:00-6:15	130	494
6:15-6:30	127	
6:30-6:45	120	
6:45-7:00	117	
7:00-7:15	132	550
7:15-7:30	146	
7:30-7:45	126	
7:45-8:00	146	

Para resolver la capacidad del sistema de casetas es necesario plantear la situación en condiciones no saturadas, esto es realizar el análisis de tal manera que los vehículos que llegan en una hora sean inferiores al máximo que se registró en los aforos, así:

Un volumen horario de 453 vehículos llega a la caseta de cobro de 2 servicios, cada una de las cuales puede atender máximo 260 vehículos por hora, según registros obtenidos en el sistema.

Por lógica el volumen de tránsito horario que llega se distribuye en partes iguales en las 2 estaciones. Determinar lo siguiente:

$$k=2$$

a) Tasa de llegada λ

$$\lambda = 453 \text{ vehículos/hora}$$

$$\lambda = 0,126 \text{ vehículos/seg}$$

b) Tasa de servicio μ

$$\mu = 260 \text{ vehículos/hora}$$

$$\mu = 0,072 \text{ vehículos/seg}$$

c) Probabilidad de tener 0 vehículos en el sistema $p(0)$

$$p(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{k\mu}{k\mu - \lambda}} \quad (12)$$

$$p(0) = 0,0689$$

d) Probabilidad de tener exactamente n vehículos en el sistema $p(n)$

para $0 \leq n < k$

$$p(n) = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n * p(0) \quad (13)$$

$$p(1) = 0,11997$$

para $n \geq k$

$$p(n) = \frac{1}{k!k^{n-k}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n * p(0) \quad (14)$$

$$p(2) = 0,1045$$

e) Longitud promedio de la línea de espera \bar{Q}

$$\bar{Q} = \frac{\lambda \mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)!(k\mu - \lambda)^2} * p(0) \quad (15)$$

$$\bar{Q} = 5 \text{ vehículos}$$

f) Numero promedio de vehículos en el sistema \bar{n}

$$\hat{n} = \bar{Q} + \frac{\lambda}{\mu} \quad (16)$$

$$\hat{n} = 7 \text{ vehículos}$$

g) Tiempo promedio de espera en la línea de espera t_q

$$t_q = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)!(k\mu - \lambda)^2} * p(0) \quad (17)$$

$$t_q = 44 \text{ seg/vehículos}$$

h) Tiempo promedio gastado en el sistema t_s

$$t_s = t_q + \frac{1}{\mu} \quad (18)$$

$$t_s = 57 \text{ seg/vehículos}$$

Para buscar el mejoramiento de las condiciones de servicio de peaje, se analiza el ejercicio para 3 estaciones de servicios con la misma línea de espera y los datos iniciales de 2 estaciones para que sea probado la disminución del congestionamiento de la Mesa de los Santos. Es decir, plantear una condición M/M/3

$$k=3$$

a) Tasa de llegada λ

$$\lambda = 453 \text{ vehículos/hora}$$

$$\lambda = 0,126 \text{ vehículos/seg}$$

b) Tasa de servicio μ

$$\mu = 260 \text{ vehículos/hora}$$

$$\mu = 0,072 \text{ veh\u00edculos/seg}$$

c) Probabilidad de tener 0 veh\u00edculos en el sistema $p(0)$

$$p(0) = 0,09$$

d) Probabilidad de tener exactamente n veh\u00edculos en el sistema $p(n)$

Para $0 \leq n < k$

$$p(1) = 0,1569$$

$$p(2) = 0,1367$$

Para $n \geq k$

$$p(3) = 0,0794$$

e) Longitud promedio de la l\u00ednea de espera \bar{Q}

$$\bar{Q} = 0 \text{ veh\u00edculos}$$

f) Numero promedio de veh\u00edculos en el sistema \bar{n}

$$\bar{n} = 2 \text{ veh\u00edculos}$$

g) Tiempo promedio de espera en la l\u00ednea de espera t_q

$$t_q = 2 \text{ seg/veh\u00edculos}$$

h) Tiempo promedio gastado en el sistema t_s

$$t_s = 16 \text{ seg/veh\u00edculos}$$

6. Conclusiones

Efectuando los aforos se denota el congestionamiento en los fines de semana que incluyen festivo por movilidad de la comunidad de sus alrededores, con el fin de descansar y confirmando lo dicho por el documento (Veeduría Mega Obras Santander, 2019, p.15).

De acuerdo a las velocidades encontradas según el análisis estadístico de la tabla 6. *Percentiles* se pudo comprobar que las velocidades son muy bajas debido a las condiciones del flujo vehicular, donde se encontró que a la velocidad mínima que deben ir los vehículos para que no generen congestión es de 30 km/h y la velocidad máxima según los estudios realizados es de 36 km/h.

Los resultados obtenidos en los cálculos para el flujo vehicular y el congestionamiento demuestran la problemática del peaje de la Mesa de los Santos.

Al analizar el congestionamiento bajo el régimen M/M/K de una línea de espera con varias estaciones de servicio se denota que la espera en la línea del sistema es de 44 s/veh a la cual toca anexar que este cálculo se llevó a cabo con un valor menor a la hora crítica ya que no cumple con la siguiente afirmación donde $\lambda < \mu k$.

Para el análisis de la solución se anexa una estación de servicio donde representa notablemente la disminución del tiempo de espera con respecto al análisis con dos estaciones de servicio y con ello generaría un comportamiento positivo al congestionamiento actualmente.

Mientras que, con dos servicios, el número promedio de vehículos en el sistema es de 7 vehículos, al realizar el ejercicio con tres servicios la cola en el sistema disminuyó sustancialmente, a dos vehículos.

Mediante un análisis estadístico se pudo evidenciar, el comportamiento de las velocidades de punto que tienen 150 vehículos en la vía Mesa de los Santos, donde nos muestra que la mayoría de los vehículos van con velocidades de 30km/h a 34km/h.

Se reafirmó el domingo 26 de enero de 2020 donde se tomaron velocidades bajas durante 15 minutos lo cual hace congestión en el peaje y efectúa la problemática que conlleva la Mesa de los Santos.

Como se dijo anteriormente, es importante recalcar que el ejercicio de Poisson para las condiciones reales de saturación, no fue posible realizar, por lo que es de esperarse que la implementación de tres servicios no sea suficiente, para la disminución de la línea de espera y que la implementación de 4 servicios logre que la oferta del servicio, sea mayor que la demanda o por lo menos que se disminuyan sustancialmente la cola o línea de espera.

7. Recomendaciones

Dada las condiciones del flujo vehicular se requiere de por lo menos dos servicios más, para que la cola de vehículos se disminuya sustancialmente.

Los ejecutores del proyecto por parte de los interesados deben realizar un análisis de beneficio de tiempo de usuarios, con el escenario actual y con la implementación de 4 o por lo menos tres servicios más.

Aunque no hace parte del presente proyecto también es necesario advertir del alto riesgo que presenta la intersección con la vía a Bogotá en el sector de tres esquinas.

Se observo soluciones alternas a la congestión del peaje donde se encontró un sistema tipo parqueadero privado y el pago se efectuaría en la Mesa de los Santos (Veeduría Mega Obras Santander, 2018, p.18).

Por otro lado, se podría implementar un sistema parecido a Sunpass donde cada automóvil tiene un sello en el vidrio con un código de barras o una imagen, que se captura cuando pasa por el radar en la carretera y se carga el cobro al propietario del vehículo.

Es bueno resaltar que la congestión se presenta en mayor proporción los fines de semana, debido a la demanda necesaria en la vía se pueden implementar peajes portátiles que solo funcionen los fines de semana teniendo en cuenta el costo beneficio.

Referencias Bibliográficas

Cal R., Reyes M, y Cárdenas J. (2007). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. México: 8ª Edición. Editorial Alfaomega.

Cámara de Comercio de Bucaramanga. (2018). *Informe público de veeduría mega obras Santander. Concesión vial Mesa de los Santos*.
<https://www.camaradirecta.com/media/01daffc00dfb44a0b177b88501d61973ded9260d.pdf>

Cámara de Comercio de Bucaramanga. (2019). *Informe público de veeduría mega obras Santander. Concesión vial Mesa de los Santos*.
<https://www.camaradirecta.com/media/a5f9d02f0e99f00df087737212914324e02b0f05.pdf>

Documento Conpes 3260. Diciembre 15 de (2003). *Política Nacional de Transporte Urbano y Masivo*. Bogotá, D.C.