

# **DETERMINACIÓN DE LA TARIFA PARA UN ESQUEMA DE COBRO DE CONGESTIÓN PARA LOS CORREDORES PRINCIPALES DEL CENTRO DE MEDELLÍN**

**Modalidad: Exploratorio**

**MARÍA CAMILA BERNAL BOTERO  
MARIA PAULA ZULUAGA ARANGO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniería Civil**

**Andrés Pava Restrepo  
Docente Universidad EIA**



**UNIVERSIDAD EIA  
INGENIERÍA CIVIL  
ENVIGADO  
2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad EIA, por habernos brindado un espacio en sus instalaciones y por facilitarnos el programa PTV Vissim, por su formación y aportes.

A nuestro director de tesis, Andrés Pava Restrepo, por sus lineamientos técnicos y metodológicos sobre el tema.

# CONTENIDO

|  | pág.      |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>1. PRELIMINARES .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1.1 Planteamiento del problema.....</b>                                   | <b>14</b> |
| <b>1.2 Objetivos del proyecto.....</b>                                       | <b>15</b> |
| 1.2.1 Objetivo General.....  | 15        |
| 1.2.2 Objetivos Específicos .....  | 15        |
| <b>1.3 Marco de referencia .....</b>   | <b>16</b> |
| 1.3.1 Conceptos generales.....   | 17        |
| 1.3.2 Congestión vehicular .....   | 17        |
| 1.3.3 Estimación de costos.....  | 20        |
| 1.3.4 Esquema de cobro .....   | 24        |
| 1.3.5 Modelo de demanda.....   | 24        |
| <b>2. METODOLOGÍA .....</b>  | <b>28</b> |
| <b>2.1 Definir los métodos de cuantificación de costos.....</b>              | <b>28</b> |
| 2.1.1 Definir los métodos de cuantificación de costos directos .....         | 28        |
| 2.1.2 Definir los métodos de cuantificación de costos indirectos .....       | 28        |
| <b>2.2 Desarrollo del modelo microscópico .....</b>                          | <b>28</b> |
| 2.2.1 Obtener información de la vía.....                                     | 28        |
| 2.2.2 Definición de las horas en que se va a realizar el estudio.....        | 29        |
| 2.2.3 Realización de aforos .....  | 29        |
| 2.2.4 Montar el modelo con la información recolectada.....                   | 29        |
| 2.2.5 Calibrar el modelo por medio de la técnica GEH .....                   | 29        |
| <b>2.3 Determinación de la tarifa de cobro.....</b>                          | <b>30</b> |
| 2.3.1 Obtener las variables a partir del modelo .....                        | 30        |
| 2.3.2 Determinación de costos .....  | 30        |
| 2.3.3 Construir las curvas de costo individual y marginal.....               | 30        |
| 2.3.4 Determinar la tarifa del costo generado por la congestión .....        | 31        |
| <b>2.4 Identificar los cambios generados por el cobro .....</b>              | <b>31</b> |
| 2.4.1 Obtener las variables del modelo al implementar el cobro.....          | 31        |
| 2.4.2 Proponer un esquema de cobro .....                                     | 31        |
| <b>3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>                       | <b>32</b> |
| <b>3.1 Definición de los métodos de cuantificación de costos.....</b>        | <b>32</b> |
| 3.1.1 Definición de los métodos de cuantificación de costos directos .....   | 32        |
| 3.1.2 Definición de los métodos de cuantificación de costos indirectos ..... | 33        |
| <b>3.2 Desarrollo del modelo microscópico.....</b>                           | <b>36</b> |
| 3.2.1 Obtener información de la vía.....                                     | 36        |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.2.2      | Definir las horas en que se va a realizar el estudio.....   | 38        |
| 3.2.3      | Realización de aforos .....                                 | 40        |
| 3.2.4      | Desarrollo del modelo.....                                  | 44        |
| 3.2.4.8.   | Calibrar el modelo.....                                     | 49        |
| <b>3.3</b> | <b>Determinar la tarifa de cobro.....</b>                   | <b>53</b> |
| 3.3.1      | Obtener las variables a partir del modelo .....             | 53        |
| 3.3.2      | Determinar los costos.....                                  | 54        |
| 3.3.3      | Construir las curvas de costo individual y marginal.....    | 73        |
| 3.3.4      | Determinar la tarifa de cobro .....                         | 79        |
| <b>3.4</b> | <b>Identificar los cambios generados por el cobro .....</b> | <b>86</b> |
| 3.4.1      | Obtener las variables al implementar el cobro .....         | 86        |
| 3.4.2      | Proponer un esquema de cobro .....                          | 87        |
| <b>4.</b>  | <b>CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES.....</b>          | <b>89</b> |
| <b>5.</b>  | <b>Referencias .....</b>                                    | <b>91</b> |
| <b>6.</b>  | <b>ANEXOS .....</b>   | <b>95</b> |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Diferencias de vehículos entre el punto 10 y 7 .....                     | 42 |
| Tabla 2: Resultados GEH .....   | 50 |
| Tabla 3. Descripción corredores .....   | 53 |
| Tabla 4. Indicadores de costo de operación 2004-2006.....                         | 56 |
| Tabla 5: Resumen rendimientos de combustible.....                                 | 57 |
| Tabla 6. Valor subjetivo del tiempo por motivo de viaje.....                      | 62 |
| Tabla 7. Porcentaje viajes por motivo de viaje para moto. ....                    | 64 |
| Tabla 8. Porcentaje viajes por motivo de viaje para auto. ....                    | 64 |
| Tabla 9. Porcentaje viajes por motivo de viaje para taxi.....                     | 65 |
| Tabla 10. Porcentaje viajes por motivo de viaje para bus. ....                    | 66 |
| Tabla 11. Valor del tiempo por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia ..... | 66 |
| Tabla 12: Movilización y despacho de buses por empresa .....                      | 67 |
| Tabla 13: Tasa de ocupación por modo.....   | 69 |
| Tabla 14. Resumen resultado carros .....  | 78 |
| Tabla 15. Resumen resultados motos.....   | 78 |
| Tabla 16. Tarifa para motos.....  | 85 |
| Tabla 17. Tarifa para carros.....   | 86 |
| Tabla 18: Demanda de vehículos al implementar el cobro.....                       | 86 |
| Tabla 19: Cambio en valores de las variables evaluadas.....                       | 87 |
| Tabla 20: Recaudos para motos .....   | 88 |
| Tabla 21: Recaudos para carros.....   | 88 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1: Zona del centro de Medellín definida para el estudio .....                      | 19 |
| Ilustración 2: Diagrama típico de oferta y costo incluyendo el costo marginal .....            | 23 |
| Ilustración 3. Curva típica de demanda.....  | 25 |
| Ilustración 4: Probabilidad demanda de usuarios que pagan tarifa de cobro por congestión ..... | 26 |
| Ilustración 5: Contribución porcentual de las emisiones vehiculares en México. ....            | 34 |
| Ilustración 6: Fórmula para el cálculo de impuestos verdes. ....                               | 35 |
| Ilustración 7: Total población de Medellín. ....   | 35 |
| Ilustración 8: Corredores a evaluar .....  | 36 |
| Ilustración 9: Caracterización de las vías en la zona de estudio .....                         | 37 |
| Ilustración 10: Sentido de las vías en la zona de estudio .....                                | 38 |
| Ilustración 11: Volúmenes de vehículos por hora en el centro Medellín .....                    | 39 |
| Ilustración 12: Tráfico típico para cada día de la semana .....                                | 40 |
| Ilustración 13: Intersecciones aforadas.....   | 41 |
| Ilustración 14: Esquema de maniobras en intersecciones.....                                    | 43 |
| Ilustración 15: Red modelada en el software Vissim .....                                       | 45 |
| Ilustración 16: Áreas de conflicto .....   | 46 |
| Ilustración 17: Vehicle route.....   | 47 |
| Ilustración 18: Información semafórica.....  | 48 |
| Ilustración 19: Programación semafórica .....  | 49 |
| Ilustración 20: Mapa de calor Google Maps .....  | 51 |
| Ilustración 21: Mapa de calor modelo .....   | 52 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Ilustración 22. Costo individual tamo 1-4. ....                              | 54                                   |
| Ilustración 23: Precios de combustible en Colombia para octubre de 2019..... | 55                                   |
| Ilustración 24: Moro Honda PCX 125i .....                                    | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Ilustración 25: Chevrolet Spark GT .....                                     | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Ilustración 26: Consumo de combustible buses .....                           | 57                                   |
| Ilustración 27: Mapa SIT Origen (Viajes) .....                               | 62                                   |
| Ilustración 28: Mapa SIT Destino (Viajes) .....                              | 63                                   |
| Ilustración 29: Porcentaje por motivo de viaje para moto. ....               | 63                                   |
| Ilustración 30. Porcentaje por motivo de viaje para auto .....               | 64                                   |
| Ilustración 31. Porcentaje por motivo de viaje para taxi .....               | 65                                   |
| Ilustración 32. Porcentaje por motivo de viaje para bus .....                | 65                                   |
| Ilustración 33: Tasa de ocupación vehículo particular. ....                  | 67                                   |
| Ilustración 34: Velocidad vs Volumen para cada tramo.....                    | 74                                   |
| Ilustración 35: Curva de costo individual y marginal.....                    | 76                                   |
| Ilustración 36: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 1-4.....             | 80                                   |
| Ilustración 37: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 68 .....             | 80                                   |
| Ilustración 38: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 104 .....            | 81                                   |
| Ilustración 39: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 108.....             | 81                                   |
| Ilustración 40: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 1011 .....           | 82                                   |
| Ilustración 41: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 14.....             | 82                                   |
| Ilustración 42: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 68.....             | 83                                   |
| Ilustración 43: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 104.....            | 83                                   |
| Ilustración 44: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 108.....            | 84                                   |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 45: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 1011 ..... 85

## LISTA DE ANEXOS

pág.

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| ANEXO A. Aforo vehicular .....    | 83 |
| ANEXO B. Calibración modelo ..... | 83 |
| ANEXO C. Modelo PTV Vissim.....   | 83 |
| ANEXO D. Calculo costos .....     | 83 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## RESUMEN

Debido al creciente número de vehículos en las ciudades y la necesidad de realizar desplazamientos urbanos, principalmente en automóviles, se ha incrementado la congestión y la contaminación, afectando así la calidad de vida de los habitantes. Entre el 2005 y 2012 en la ciudad de Medellín el tiempo de viaje se ha incrementado un 32%, a pesar de contar con la restricción del denominado “pico y placa” desde el año 2005; además, las velocidades más bajas se presentan en el sector del centro de la ciudad, con valores entre 5 y 13 km/h (Gonzalez Calderón, 2009).

Por otro lado, analizando los casos internacionales, tales como Londres, Singapur, Milán y Estocolmo, donde se han implementado peajes urbanos en los cuales su precio incorporan los costos por la congestión y contaminación; por ejemplo, en Estocolmo, la concentración de monóxido de carbono en el área restringida se redujo un 14% y el tráfico un 18% como resultado de la medida, lo cual demuestra que este sistema influye directamente en la utilización del vehículo privado y en el mejoramiento de la movilidad de las ciudades utilizando las vías existentes (García, 2018).

Aunque en la ciudad de Medellín se han realizado estudios con el fin de conocer la disposición de los usuarios a pagar una tarifa por congestión, aún no se conocen los costos exactos que son causados por la congestión y contaminación, lo cual no nos permite internalizar este costo a los usuarios. Es por esto por lo que en este proyecto se busca establecer una tarifa de cobro que tenga en cuenta los costos individuales y exógenos generados por la congestión en las zonas céntricas de la ciudad, más específicamente en tres corredores representativos del centro de Medellín (*La Playa, Palacé y Colombia*), debido a que es en estas zonas donde se genera mayor congestión gracias a la cantidad de actividades económicas que se realizan en ellas. Y a partir de la curva de demanda realizada por la Universidad Nacional y del desarrollo de un modelo microscópico que permite estimar las variables de evaluación en los corredores congestionados, se estime el flujo de vehículos con el que contaría la red de transporte en el escenario hipotético de una implementación de un cobro por congestión, con el fin de establecer la tarifa para un esquema de cobro que permita trasladar estos costos a los usuarios que causan conjuntamente la congestión, específicamente en el vehículo privado que es el modo con mayor presencia en el centro según la encuesta origen destino (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## ABSTRACT

Due to the increasing number of vehicles in cities and the need to carry out urban displacements, mainly in cars, congestion and pollution have increased, affecting the quality of life of the inhabitants. Medellín is not the difference, in the city between 2005 and 2012 the time required to travel the same number of kilometers has increased by 32%, despite, since 2005 we have the "Pico y Placa." Where the lowest speeds occur in the downtown area, with values between 5 and 13 km / h (Gonzalez Calderón, 2009).

On the other hand, analyzing international cases, such as London, Singapore, Milan and Stockholm, where urban tolls have been implemented in which their price includes costs for congestion and pollution; For example, in Stockholm, the concentration of carbon monoxide in the restricted area was reduced by 14% and traffic by 18% as a result of the measure, which demonstrates that this system directly influences the use of the private vehicle and the Improvement of city mobility using existing roads (García, 2018).

Although studies have been carried out in the city of Medellín in order to know the willingness of users to pay a congestion fee, the exact costs that are caused by congestion and contamination are still unknown, which does not allow us to internalize this cost to users. That is why this project seeks to establish a collection rate that takes into account the individual and exogenous costs generated by congestion in the downtown areas of the city, more specifically in three representative corridors of Medellín downtown (La Playa, Palacé and Colombia), because it is in these areas where the greatest congestion is generated thanks to the amount of economic activities carried out in them. And with the demand curve made by the National University in 2012 and the development of a microscopic model that allows us to estimate the evaluation variables in congested corridors, the flow of vehicles with which the transport network in the hypothetical scenario would count with the implementation of a congestion charge, in order to establish the rate for a charging scheme that allows these costs to be transferred to users who jointly cause congestion, specifically in the private vehicle that is the mode with the greatest presence in the center according to the destination origin survey (Metropolitan Area of the Aburra Valley, 2017).

## INTRODUCCIÓN

Medellín en el 2018 ocupó el quinto lugar en Latinoamérica con mayor congestión y el décimo octavo a nivel mundial según el Inrix, ya que en promedio los ciudadanos pasan 58 horas anuales en embotellamientos (INRIX, 2018). A pesar de que en la ciudad desde el 2005 se ha implementado el denominado “pico y placa” el tiempo de traslado desde entonces ha aumentado aproximadamente un 32% y en la zona céntrica se presentan las velocidades más bajas, con valores entre 5 y 13 km/h (Gonzalez Calderón, 2009).

Teniendo en cuenta dicho problema, este documento se apoya en metodologías existentes para calcular el costo que es generado por la congestión en la zona céntrica de la ciudad, considerando tres corredores para su estimación, los cuales son la Avenida Colombia (calle 50) desde la Avenida Oriental (carrera 46) hasta la Avenida Regional (carrera 62), la Avenida La Playa (calle 52 hasta la Plaza Botero y calle 53 que se convierte en la Avenida de Greiff) desde la Avenida oriental (carrera 46) hasta la Plaza Minorista, más específicamente hasta la carrera 57, y la Avenida Palacé (carrera 50 hasta la Plaza Botero y carrera 51 que se convierte en Bolívar) desde la avenida San Juan (calle 44) hasta la avenida Oriental (calle 57b), siendo estos los que presentan mayor demanda y menores velocidades en la zona (Solarte, 2015). Para esto se definen métodos existentes de cuantificación de costos asociados a variables medibles en un corredor congestionado, como tiempo de recorrido, consumo de combustible, distancia recorrida, emisiones de NOx, entre otros.

Para obtener dichas variables es necesario desarrollar un modelo microscópico estático con la herramienta PTV Vissim. Estos costos están divididos en dos categorías, la primera conocida como costos individuales, la cual se define como aquellos costos que repercuten directamente sobre los usuarios que están inmersos o participan en el flujo del tráfico y la segunda, corresponde al costo marginal, que se refiere al costo para toda la sociedad que se genera a partir de la suma de los costos individuales y los que se generan al resto de la sociedad por congestionar la red, tales como costos por contaminación atmosférica, cambio climático y contaminación acústica. A partir de los costos marginales e individuales para diferentes demandas se generan ambas curvas, las cuales con la curva de demanda propuesta por la Universidad Nacional en el 2012 se determina la tarifa de cobro y por último se identifican los efectos generados en la red con el sistema de cobro en las variables medidas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

# 1. PRELIMINARES

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al creciente número de vehículos en las ciudades y la necesidad de realizar desplazamientos urbanos, principalmente en automóviles, se han generado perjuicios a la sociedad como, por ejemplo, la congestión y contaminación afectando la calidad de vida de los habitantes. Es por estas situaciones que en diferentes ciudades latinoamericanas se han implementado diversas soluciones que buscan mitigar dicho problema de manera práctica.

Medellín no es la excepción, según el Inrix, empresa que realiza estudios basados en un análisis del tránsito de 1,360 ciudades examinan los desplazamientos urbanos y la condición del tráfico en 38 países, la ciudad se encuentra en la posición número 18 a nivel mundial y 5 en América Latina con mayor congestión, ya que en promedio los ciudadanos pasan 58 horas anuales en embotellamientos (INRIX, 2018). En la ciudad entre el 2005 y 2012 el tiempo de transporte requerido para recorrer un mismo número de kilómetros ha incrementado un 32%, a pesar de contar, desde el 2005 con el denominado “Pico y Placa”. En la ciudad, para realizar un viaje promedio de 8,75 kilómetros se necesita 35 minutos. Sin embargo, este tiempo puede variar dependiendo de la velocidad en la red de transporte, las cuales oscilan entre los 5 y 26 km/h. Las velocidades más bajas se presentan en el sector del centro de la ciudad, con valores entre 5 y 13 km/h (Gonzalez Calderón, 2009).

La medida del “Pico y Placa”, cuyo objetivo principal es buscar una solución a la saturación de las vías para lograr así una mejor movilidad, consiste en restringir de acuerdo con el último dígito de la placa la circulación de vehículos particulares (con excepción para algunos casos según el servicio que prestan como ambulancias, vehículos oficiales, escolares y otros) durante las horas pico de la mañana (7:00 am - 8:30am) y de la tarde (5:30pm - 7:00pm). Además, esta medida busca objetivos adicionales como lo son el: disminuir los tiempos de viaje, incrementar el uso de transporte público, disminuir los riesgos de accidentalidad, y reducir la contaminación (Posada Henao, Farbiarz Castro, & González Calderón, 2010)

Sin embargo, se ha observado que a pesar de la restricción, que actualmente corresponde al 40 % de los vehículos, la reducción en la congestión es de tan solo del 10 % en las horas “pico” y adicionalmente se presenta un aumento del 8 % de la congestión en las horas valle, generando que el rango de tiempo de la medida tienda a aplicarse durante todo el día, lo cual es inconveniente (Posada Henao, Farbiarz Castro, & González Calderón, 2010). Gracias a diferentes análisis realizados en la ciudad se puede afirmar que el crecimiento de vehículos automotores reduce con el tiempo la efectividad de la medida del Pico y Placa, consecuencia de que los conductores con ingresos más altos compran un carro adicional (Robles, Ñañes, & Quijano, 2009).

Por otro lado, analizando los casos internacionales, tales como Londres, Singapur, Milán y Estocolmo, donde se han implementado peajes urbanos en los lugares de mayor congestión y contaminación, los cuales en su precio incorporan los costos por la congestión

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

y la contaminación, se ha demostrado que esta medida ha dado resultados positivos. En Estocolmo, la concentración de monóxido de carbono en el área restringida se redujo un 14% y el tráfico un 18% como resultado de la medida. Estas medidas de movilidad basadas en un mecanismo de precios donde se internalizan los costos a los usuarios del transporte privado influyen directamente en la utilización del vehículo privado y en el mejoramiento de la movilidad de las ciudades utilizando las vías existentes (García, 2018).

Aunque en la ciudad de Medellín se han realizado varios estudios con el fin de conocer la demanda de usuarios que están dispuestos a pagar unos valores supuestos de una tarifa por congestión, aun no se conoce el valor exacto de esta teniendo en cuenta los costos internos y externos que son causados por la congestión, lo cual no permite internalizar estos costos a los usuarios. Es por esto que en este proyecto se busca establecer una tarifa de cobro que tenga en cuenta los costos individuales y exógenos generados por la congestión en los principales corredores del centro de Medellín a partir de un modelo microscopio y la curva de demanda propuesta por la Universidad Nacional y así poder proponer un esquema de cobro que permita trasladar estos costos a los usuarios que causan conjuntamente la congestión.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General**

Establecer la tarifa para un esquema de cobro de congestión a partir de las curvas de demanda existentes y los costos externos e individuales causados por la congestión en la zona céntrica de Medellín, específicamente en los corredores de La Playa, Palacé y Colombia.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Definir los métodos existentes de cuantificación de costos para los efectos individuales y exógenos causados por la congestión asociados a las variables medibles en un corredor congestionado.
- Desarrollar un modelo microscópico calibrado que permita estimar las variables de evaluación en los corredores congestionados para establecer el costo generalizado individual y marginal.
- Determinar la tarifa de cobro con las curvas de ofertas obtenidas a partir de las variables que el modelo arroja como resultado y la curva de demanda propuesta por la Universidad Nacional.
- Identificar los efectos que genera el sistema de cobro en las variables medidas por el modelo para hacer una comparación entre la situación del tráfico inicial y del tráfico al implementar el cobro.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### 1.3 MARCO DE REFERENCIA

Actualmente la demanda y complejidad en los sistemas de congestión de tráfico urbano han venido creciendo, generando un interés mayor para realizar estudios sobre este tema tanto en entornos académicos, como por parte de administraciones gubernamentales alrededor del mundo. Adicionalmente, se ha observado que la implementación de sistemas de cobro por congestión para resolver los problemas de movilidad a nivel mundial ha sido una de las soluciones más estudiadas en los últimos años. A continuación, se presentan algunos casos realizados que han implementado esta política.

En la ciudad de Madrid los docentes Guzmán, De la Hoz y Pfaffenbichler realizaron un análisis del impacto que tendría implementar una tarifa por congestión o contaminación en dicha ciudad, enfocándose principalmente en el impacto a medio y largo plazo sobre la movilidad y la contaminación en la ciudad. El estudio se hizo utilizando el software Vissim. En este estudio se estimó la tarifa de peaje óptima para reducir un 50% las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas en Madrid y la reducción del uso del vehículo privado en un 10% para el año horizonte. Como resultado del análisis, se obtuvo que las emisiones de CO<sub>2</sub> y el uso del auto privado en el centro de Madrid con la implementación del cobro por congestión serían del 34% y 10% respectivamente (Guzmán García, de la Hoz, & Pfaffenbichler, 2008).

Por otro lado, la Universidad de Antioquia estudió desde la perspectiva económica la necesidad de implementar un peaje urbano en la ciudad de Medellín, teniendo en cuenta una tasa de congestión que maximice el bienestar social bajo este sistema. Este análisis con información obtenida en otras investigaciones y encuestas obtuvo la relación costo-beneficio, curvas de oferta y demanda para las zonas de Laureles y El Poblado. Después de analizar los resultados obtenidos se concluyó que es recomendable implementar un peaje por congestión en la ciudad, ya que el beneficio neto de la implementación de la medida es positivo (Gonzalez Calderón, Posada Henao, & Sánchez Díaz, 2011).

En Medellín, la Universidad Nacional de Colombia inicialmente determinó la aceptación de los usuarios a pagar un peaje urbano de forma simultánea con la medida del pico y placa. Este análisis se realizó a 100 usuarios de vehículo privado mediante la técnica de preferencias declaradas. El modelo indicó que sólo el 4% de los encuestados estarían dispuestos a pagar la tarifa del peaje para evitar la restricción del pico y placa (Álvarez Valencia, 2009).

Por último, en el 2015 la misma institución desarrolló un proyecto en la ciudad de Medellín principalmente en la zona céntrica, el cual consistió en realizar un análisis mediante el software PTV Vissim 14 de un escenario hipotético de cobro por congestión, que posteriormente se comparó con un escenario base. Este esquema estipuló cobro tanto para entrar como para salir de la zona restringida. La tarifa de cobro implementada se determinó teniendo en cuenta el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2014 – 2018, “Todos Por un Nuevo País”, en el numeral 3 del artículo 32 “Otras Fuentes de Financiación para los Sistemas de Transporte”, donde se establece que la tarifa será el valor promedio de dos (2) pasajes del servicio de transporte público en el municipio o distrito estudiado. Por lo que, para el caso de Medellín, se tendría un valor de \$4.000 por cada evento (entrada o salida), ya que el valor promedio de un pasaje es de aproximadamente \$2.000. Este estudio pudo concluir

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



que el escenario de cobro por congestión arroja buenos resultados para mejorar la movilidad del centro de la ciudad de Medellín, sin embargo, es necesario realizar algunos cambios y medidas adicionales para poder llegar a obtener mejores resultados (Solarte Portilla, 2015).

### 1.3.1 Conceptos generales

Para mejor entendimiento del tema, es necesario aclarar algunos conceptos de gran utilidad para los lectores como lo son:

**Nivel de servicio:** Es una medida cualitativa que permite describir las condiciones de operación de un flujo vehicular, las cuales están en términos de la velocidad, el tiempo recorrido, la libertad de realizar maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial. Nos indica la calidad del servicio que presta la vía a los usuarios; el grado de satisfacción que experimenta el conductor al transitar por la vía (Solarte Portilla, 2015).

**Demanda:** Este concepto se refiere a la cantidad de individuos que desean utilizar determinada infraestructura. Para el caso de una vía, dicha demanda depende de las características de ésta y su conexión con el resto de la red vial. La teoría económica manifiesta que este parámetro está relacionado directamente con el costo de utilizar la vía (University College London & Universidad de los Andes, 2013).

**Capacidad vial:** Se entiende por capacidad vial el máximo número de vehículos que puede transitar en un periodo de tiempo determinado por un punto o tramo de una vía en ambos sentidos si es el caso. La capacidad de una vía y el nivel de servicio están directamente relacionados. Tanto el método colombiano del INVIAS, como el método del Consejo de Investigaciones del Transporte de los Estados Unidos (TRB por su sigla en inglés) para el diseño de una vía parten de una capacidad vial ideal (Solarte Portilla, 2015).

**Oferta vial:** Es el volumen máximo de vehículos que pueden desplazarse o circular en un espacio físico.

### 1.3.2 Congestión vehicular

La congestión del tráfico ha recibido múltiples definiciones, que varían dependiendo el autor y la situación histórica. El diccionario de la real academia española la define como “la acción o el efecto de obstruir o entorpecer el paso, la circulación o el movimiento de algo”. Sin embargo, las definiciones más antiguas reducen el concepto de la congestión a un problema entre la oferta y demanda de la vía, teniendo en cuenta que existe una capacidad máxima del sistema. Con base en esto se puede definir como “un fenómeno que surge cuando la demanda supera a la oferta, es decir, cuando en un mismo instante de tiempo, quiere viajar más gente que la que el sistema puede albergar” (Domínguez Varela, 2007).

Por otro lado, la congestión desde un punto de vista teórico puede definirse como la reducción de la velocidad de circulación debido al aumento del volumen vehicular dentro de una vía. La situación de congestión comienza entonces en el momento en que el ingreso de un vehículo adicional en la vía entorpece el desplazamiento de los demás y se intensifica

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

a medida que la cantidad de vehículos aumenta, lo que genera un incremento en el tiempo de desplazamiento para los usuarios (University College London & Universidad de los Andes, 2013).

Existen diferentes indicadores de congestión que facilitan determinar si una vía se encuentra en situación de congestión y su grado de congestión. Estos indicadores pueden ser: tiempo medio de viaje por persona, velocidad media de viaje, demora en la vía, kilómetros de vía congestionada, tiempo de congestión, entre otros (Domínguez Varela, 2007)

La congestión no se debe considerar como algo malo, sino como algo necesario, indicativo de crecimiento y desarrollo económico. El objetivo no es hacerla desaparecer, sino mitigarla e intentar reducir los costos que ésta produce. Desde la perspectiva de la eficiencia económica se considera que la ausencia absoluta de congestión induce a un uso ineficiente de la infraestructura vial soportado por una inversión importante de recursos para mantener una velocidad a flujo libre en las vías de la ciudad. El problema con la congestión desde una visión económica empieza cuando el nivel de congestión es superior al nivel socialmente óptimo y esto se atribuye principalmente al hecho de que los usuarios no son conscientes de los costos que generan al usar las vías (University College London & Universidad de los Andes, 2013).

Existen muchas técnicas de recogida de datos de tráfico y de congestión, entre estas se pueden definir dos tipos de técnicas según el origen de los datos: la recolección manual y la automática. Los datos pueden ser recopilados manualmente mediante la observación visual, por medio de los centros de gestión de tráfico, la policía o los observadores privados. Por otro lado, también pueden ser recogidos por sistemas de detección por control remoto o automáticos, donde se encuentran los detectores de lazo o espiras y las cámaras de televisión. Estos sistemas resultan muy eficientes, sin embargo, no se encuentran distribuidas a lo largo de toda la red de transporte, lo cual los convierte en un sistema de medición que no cuenta con una fiabilidad del 100% (Domínguez Varela, 2006).

Según un análisis de aplicación realizado en Barcelona, un estudio de congestión vial se puede definir en diferentes etapas y realizar mediante dos tipos de trabajos: el de campo, que consiste en recopilar datos de la red, y el trabajo de exploración, que se trata de recoger los datos, definiendo la elaboración del estudio en las siguientes etapas:

- 1. Determinación del área de estudio:** Los objetivos principales son la delimitación de la zona a tratar y el estudio de las características de la zona (distribución de los núcleos urbanos, importancia, población, etc.) y del entorno. Generalmente la delimitación de la zona a estudiar está marcada por un área metropolitana, área de influencia o simplemente por una frontera política como puede ser la de una región, provincia, comunidad o país. Otro de los puntos importantes consiste en definir las características de la zona en la que se realiza el estudio. Esto puede realizarse a lo largo de toda una región o en el entorno de una ciudad y es importante ya que determina los umbrales de congestión (Domínguez Varela, 2006). Para este caso la zona definida se muestra a continuación:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### Ilustración 1: Zona del centro de Medellín definida para el estudio



Tomado de: Solarte (2015)

**2. Determinación de las vías de estudio:** Una vez definida la zona de estudio se deben clasificar los tipos de vías que conforman la malla vial. Principalmente se seleccionan las vías básicas de conexión: accesos a la ciudad, vías de conectividad, vías hacia los puntos de conexión, etc (Domínguez Varela, 2006). Teniendo en cuenta los principales corredores del centro se determina que las vías de estudio para este estudio son la Avenida Colombia (calle 50) desde la Avenida Oriental (carrera 46) hasta la Avenida Regional (carrera 62), la Avenida La Playa (calle 52 hasta la Plaza Botero y calle 53 que se convierte en la Avenida de Greiff) desde la Avenida oriental (carrera 46) hasta la Plaza Minorista, más específicamente hasta la carrera 57, y la Avenida Palacé (carrera 50 hasta la Plaza Botero y carrera 51 que se convierte en Bolívar).

**3. Recogida y tratamiento de los datos:** El paso siguiente consiste en determinar las técnicas que se usarán para la recolección de datos. Las más utilizadas en el ámbito de la congestión son las cámaras de tráfico, los detectores de lazo, los radares de velocidad y los vehículos flotantes. A partir de este conjunto de técnicas el responsable de la red vial ha de gestionar los recursos para obtener el mayor número de datos que representa lo mejor posible la realidad y permite un adecuado procesamiento (Domínguez Varela, 2006). Los datos que se tienen en cuenta para este modelo son el volumen vehicular en 12 puntos representativos de la zona de de estudio, obtenidos mediante aforos manuales; señalización semafórica entregada por la Secretaria de Movilidad de Medellín y las características de los corredores como ancho de carril, número de carriles, entre otros, los cuales fueron obtenidos por visitas de campo y revisión bibliográfica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**4. Determinación del umbral de congestión:** Después de conocidos los datos se debe determinar el punto donde empieza la congestión. El criterio de determinación de este umbral se ha de establecer antes de empezar el estudio, pero obviamente, éste se deberá adaptar a las características y tipo de datos disponible. Para este caso la curva de oferta que se obtiene a partir del modelo permite establecer el punto donde empieza la congestión, es decir, cuando la curva deja de tener un comportamiento lineal recto.

**5. Representación y análisis de los resultados:** Una vez se han procesado los datos, se aplicará la metodología de cálculo, seguida del análisis y la comprobación de la lógica de los resultados. La metodología de análisis dependerá del objetivo que se quiera cumplir. En este caso se trata de un modelo realizado con el software PTV – Vissim, en el cual a partir de los datos recolectados se crea la red para así conformar la zona de estudio y poder obtener las variables necesarias para conocer los costos de congestión, como lo son el consumo de combustible, el tiempo de recorrido, la distancia recorrida y los gramos de gases contaminantes.

### 1.3.3 Estimación de costos

Actualmente se cuenta con varias metodologías que nos permiten estimar los costos debidos a la congestión, desde métodos muy sencillos a supremamente complejos y detallados. Por lo tanto, es importante conocer la importancia de este factor en el estudio para poder determinar cuál método se debe implementar. A continuación, se muestran algunos métodos implementados en diferentes estudios.

El primer método es mediante funciones de volumen - demora o también conocidas como funciones de congestión, ya que consideran el efecto de la capacidad vial sobre los tiempos de viaje. La función utilizada para calcular el tiempo de viaje es la siguiente (Solarte Portilla, 2015):

$$t = t_0 * f\left(\frac{v}{c}\right)$$

Donde;

t: Tiempo de viaje en la vía.

t<sub>0</sub>: Tiempo de viaje a flujo libre.

v: Volumen de vehículos en la vía.

c: Capacidad de la vía.

A partir del tiempo de viaje en la vía se puede calcular el costo marginal adicionándole al tiempo de viaje los tiempos impuestos a los demás usuarios del escenario cuando un nuevo vehículo ingresa al sistema (Solarte Portilla, 2015).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$\text{Costo marginal} = t + v * \frac{\partial t}{\partial v}$$

Como se puede evidenciar esta metodología permite establecer el incremento en el tiempo debido al aumento de volumen vehicular, sin embargo, se aplica en corredores sencillos, sin efecto de semaforización e incorporación de vías anexas, por lo tanto cada enlace del corredor (tramo) tendrá una función diferente, además sus valores no aplican a nuestras dinámicas de movilidad.

El autor Artur Domínguez Varela (2006) elaboró una metodología que permite calcular los costes de la congestión de forma sencilla y amplia, teniendo en cuenta todos los aspectos que influyen en éste, teniendo en cuenta técnicas innovadoras a partir de la consulta a otros estudios y la revisión de diferentes proyectos europeos. Como lo son el incremento de consumo de combustible, el incremento de mantenimiento, el incremento de accidentes de tráfico y los daños ambientales que incluyen la contaminación atmosférica, el cambio climático y el incremento de la contaminación acústica. Adicionalmente tiene en cuenta los costos generados por la pérdida de tiempo, cuyo peso en el coste global es siempre superior al 80%. Esta metodología utiliza la variable de la velocidad para el cálculo del costo por congestión, por lo que es muy importante definir las velocidades medias para poder realizar el estudio. En esta metodología se discriminan los costos en dos tipos:

**Costos directos:** son aquellos que repercuten directamente sobre los usuarios que están inmersas o participan en el flujo del tráfico. Sin embargo, solo se tienen en cuenta los costes que soportan directamente los ocupantes de los vehículos, es decir, que no se tendrán en cuenta los costes directos del transporte, ya que muchos de ellos no varían al estar sometidos a un tráfico congestionado, como lo son los impuestos, costos de propiedad o seguros. Los costos que se tendrán en cuenta, ya que son los más relevantes son los siguientes: costos por el consumo de combustible, mantenimiento del vehículo, accidentalidad y por pérdidas de tiempo.

**Costos indirectos:** son aquellos que no están inmersos dentro del flujo circulatorio congestionado. Como lo son los impactos al medio ambiente y a la salud de los seres vivos. Los más relevantes son los costos por la contaminación atmosférica, el cambio climático y de contaminación acústica. Adicionalmente se pueden tener en cuenta las pérdidas de tiempo de los empleados, cuyo peso suele recaer sobre las empresas.

Para implementar esta metodología son necesarios programas tan simples como Microsoft Excel y Visual Basic. A pesar de la simplicidad en los cálculos, este método intenta representar todos los modos de transporte. Sin embargo, no incluye las motocicletas y autobuses urbanos, debido a que las motocicletas son difíciles de detectar y sus velocidades suelen ser mayores que las de los vehículos, por lo que el impacto de la congestión sobre estas es mucho menor. Por el contrario, las velocidades medias en la normalidad suelen ser menores para los autobuses y una de las suposiciones de este método consiste en que para el cálculo de los costes se consideran las mismas velocidades

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

para todos los tipos de vehículos. Algunas de las desventajas de este método es que no se tiene en cuenta que el grado de saturación puede ser variable a lo largo del día. Normalmente en la noche, la capacidad de la vía aumenta, ya que las interacciones urbanas son menores y el ciclo semafórico es más favorable. Sin embargo, esta suposición interfiere muy poco en el resultado, ya que las menores capacidades ocurren en periodo diurno, que es cuando se produce la congestión. En conclusión, este modelo permite de forma relativamente rápida y exacta extraer los costes de congestión (Domínguez Varela, 2007). Cabe resaltar que debido a las diferencias que se presentan en los consumos de combustible y lubricantes, en las emisiones de gases contaminantes y en el costo del tiempo de los usuarios de los dos medios de transporte es relevante evaluar los costos de estos diferenciados.

El costo para cada una de las variables a evaluar puede ser determinado por diversos métodos planteados por diferentes autores, sin embargo, a continuación, se presentan algunos de los métodos con los que será posible cuantificar el impacto de las variables representado en dinero:

- **Costos generados por el consumo de combustible**

A pesar de las metodologías presentadas por diferentes autores, en el caso del software PTV-Vissim se arroja como resultado de la simulación de un viaje la cantidad de combustible promedio que los vehículos consumen en su recorrido, por lo que se hace sencillo el cálculo del costo de este ya que a partir de la cantidad y de su valor comercial se logra obtener el costo total que debe asumir cada vehículo, diferenciando el rendimiento de cada tipo de vehículo.

- **Costos generados por el consumo de lubricantes**

Según la metodología implementada por Pablo Emilio Muñoz en un estudio similar realizado en la ciudad de Bogotá, el consumo de lubricantes se relaciona con el consumo de combustible de los vehículos como un porcentaje correspondiente a un 1.4%. (Muñoz Puentes, 2014)

- **Costos generados por la contaminación**

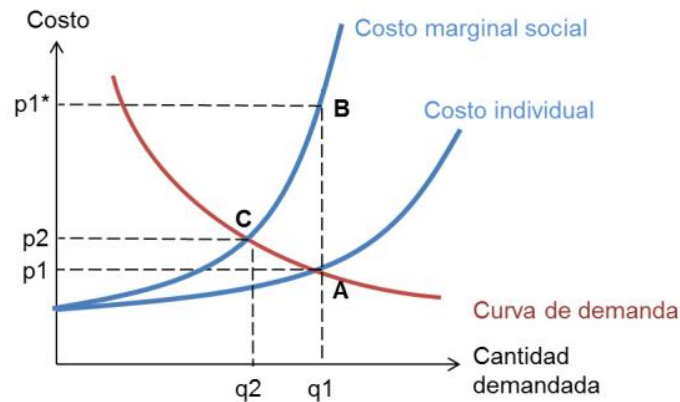
Una de las formas para evaluar los costos relacionados a la contaminación emitida por los vehículos es según los impuestos a la gasolina, ACPM y el carbono consignados en las reformas tributarias del 2012 y 2016 en Colombia, las cuales contemplan un gravamen por galón de gasolina para los vehículos. (Portafolio, 2019)

Por último, es importante mencionar que la principal variable en la medición de los costos de congestión radica en el costo de oportunidad del tiempo de los usuarios para sus desplazamientos, compuesto por dos elementos, el primero conocido como el costo individual, que puede definirse como lo que le cuesta a cada individuo el tiempo de movilizarse por la red de transporte (costo individual), y, el segundo, corresponde al costo social, que se refiere al costo para toda la sociedad que se genera a partir de la suma de los costos individuales y el que estos generan al resto de la sociedad por congestionar la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

red de transporte (Posada, Corrales, & García, 2016). El costo individual de la congestión hace que el individuo esté dispuesto a asumir un costo de uso de su medio de transporte (costo directo) mayor al que soportaría en ausencia de la solución al problema de congestión con el fin de desplazarse más rápido.

### Ilustración 2: Diagrama típico de oferta y costo incluyendo el costo marginal



Tomado de: University College London-Universidad de los Andes (2013)

Como se muestra en la ilustración 2 las curvas de costo individual y marginal social están directamente relacionadas con la variación de la demanda vehicular, se evidencia adicionalmente que el costo social marginal es mayor que el costo individual, esto debido a que este es el costo interno más un costo adicional que cada individuo que utiliza el sistema les trae a los demás.

La diferencia entre  $p_1$  y  $p_1^*$  es el costo que cada individuo genera a los demás por la utilización simultánea de la vía, en la situación en que el equilibrio se diera en A. El punto de equilibrio C es el óptimo social, puesto que en este punto todos los usuarios internalizan el costo generado a los demás, reduciendo las pérdidas en tiempo debidas al excesivo volumen vehicular y haciendo más eficiente la utilización de la vía (University College London & Universidad de los Andes, 2013).

Adicionalmente, se tiene un costo marginal social, el cual son los costos indirectos causados por la congestión (daños ambientales, contaminación acústica, emisiones de gases, entre otros) que afectan tanto a usuarios presentes en el escenario de congestión como usuarios que no lo estén. Este costo marginal social, incluye el costo individual y un costo externo generado indirectamente por a usuario que no se encuentran en el sistema vial.

La diferencia entre  $p_1$  y  $p_2$  es la tarifa que se debe cobrar en el esquema. Ya que el punto c es el equilibrio óptimo social, puesto que en este punto todos los usuarios internalizan el

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

costo generado a los demás, reduciendo las pérdidas en tiempo debidas al excesivo volumen vehicular y haciendo más eficiente la utilización de la vía.

#### 1.3.4 Esquema de cobro

Los esquemas de cobro son considerados una buena forma de que los efectos generados por el vehículo particular se vean reflejadas en el costo de su uso. La tarifa para realizar el cobro es flexible y para determinar su valor es necesario tener en cuenta las condiciones actuales de congestión de la vía y el tipo de zona por la cual se quiere transitar.

Es importante conocer la modalidad de cobro para los usuarios que se movilicen en la zona restringida. Un estudio realizado en el 2013 por la Universidad de los Andes y la University College London propone considerar las siguientes posibilidades:

**Cobro por entrada en la zona:** los usuarios deben pagar la tarifa cada vez que ingresen a la zona, este pago permite moverse libremente por la malla vial de la zona sin recargos.

**Cobro por movimiento en la zona:** los usuarios adicionalmente a la tarifa de entrada deben pagar para movilizarse dentro de la malla vial restringida. Los usuarios que se encuentren en la zona no deben pagar la tarifa de entrada, pero sí la de movilidad.

**Cobro por distancia recorrida:** se cobra de acuerdo con la distancia recorrida en la malla vial de la zona restringida. Es de utilidad cuando la restricción es una sola vía, ya que se conoce el punto de entrada y salida.

Para la escogencia de la tecnología de cobro es necesario tener en cuenta las características del esquema y de la infraestructura que se va a intervenir para su puesta en marcha. Actualmente existen dos tipos de sistemas de cobro tecnológicos, los electrónicos y los no electrónicos que permiten la identificación de vehículos que pasan por un punto determinado. Entre los sistemas de cobro no electrónico se encuentran el sistema de papel y el cobro en plazas. Por otro lado, hay sistemas electrónicos basados en infraestructura de pórticos o postes con reconocimiento automático de placas por video (ANPR) o cobro a flujo ininterrumpido (DSRC), adicionalmente hay sistemas en equipos vehiculares con tecnologías de localización vehicular (VPS) y sistemas de redes de telefonía celular (Grange & Troncoso, 2014).

#### 1.3.5 Modelo de demanda

La demanda de servicios del transporte es cualitativa y diferenciada. Existen una amplia gama de demandas específicas de transporte que se diferencian por hora del día, día de la semana, motivo del viaje, tipo de mercancía, velocidad y frecuencia, etcétera. La demanda de transporte es una demanda derivada, es decir, no es un fin en sí misma. Con la excepción del turismo, la gente viaja para satisfacer ciertas necesidades en sus destinos (trabajo, salud, entretenimiento) (Ortúzar, 2012).

Un modelo de demanda busca predecir los flujos futuros del sistema ante diferentes situaciones es importante y requiere, en cierta medida, conocer el comportamiento humano,

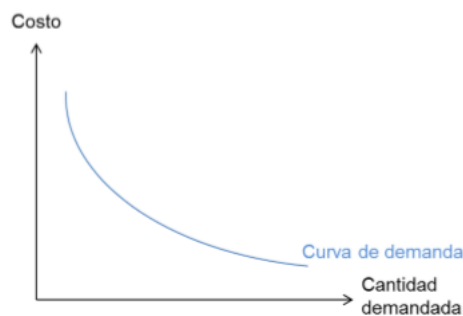
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



características de uso del suelo, economía y otros, por lo que se debe hacer análisis de información sociodemográfica, de los planes de ordenamiento territorial y de desarrollo, y de acción de la región (Posada & González, 2010)

La demanda se refiere a la cantidad de individuos que desean utilizar determinada infraestructura. Para el caso de una vía, los individuos deciden utilizarla o no dependiendo de las características de ésta y su relación con el resto de la red de transporte. La teoría económica dice que la cantidad de individuos que demandan el uso de la vía depende del costo de utilizarla (University College London & Universidad de los Andes, 2013). En la Ilustración 3. Curva típica de demanda se muestra una curva de demanda típica.

### Ilustración 3. Curva típica de demanda



Fuente: (University College London & Universidad de los Andes, 2013)

Es importante tener en cuenta que para el desarrollo de la curva de demanda es fundamental la elasticidad, en el caso del peaje por congestión es fundamental realizar un estudio en detalle de las decisiones de diferentes tipos de usuarios ante el cobro, por ejemplo, aplicando una encuesta de preferencias declaradas y tener en cuenta que esta elasticidad varía en función del volumen vehicular .

El modelo de demanda en el escenario hipotético de cobro por congestión lo crea “El estudio de variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particular” a partir de los resultados del “Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín Fase I”, realizado en el año 2012 por la Universidad Nacional de Colombia. En este estudio se realizaron 1646 encuestas a población caracterizada previamente con base al estudio de la encuesta origen destino de viajes en el AMVA 2012. Las características de la población objetivo fueron en especial: que posea auto particular, que acostumbre a viajar a las zonas con restricción de pico y placa en las horas pico am y pico pm, y que, además, el motivo de los viajes sea de trabajo o estudio (Solarte Portilla, 2015).

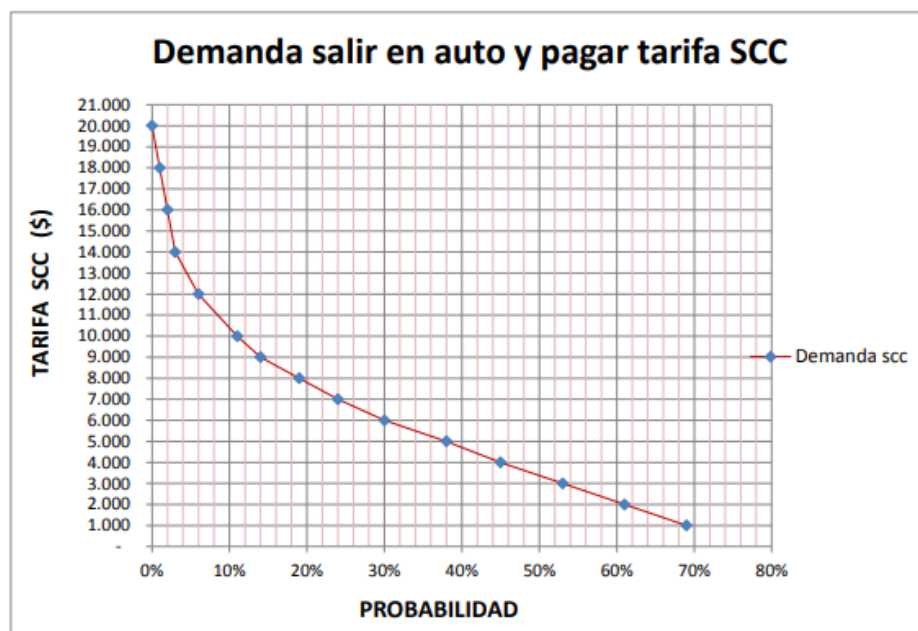
El estudio cubre todas las áreas que tenían influencia de la medida de pico y placa en el 2012, en la que se encuentra el centro de Medellín, objeto del presente estudio. Los resultados del estudio permitieron obtener un modelo de elección discreta construido a partir de encuestas de preferencias declaradas y encuestas de preferencias reveladas, en un escenario hipotético de implementación de un sistema de cobro por congestión que

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

reemplazaría la medida de pico y placa. De esta forma, el enunciado general de la encuesta que se hizo a cada individuo decía: “Imagínes que el pico y placa es eliminado de la ciudad y en cambio usted podría viajar en automóvil sin ninguna restricción en las horas pico de la mañana y de la tarde, pagando un cobro por congestión que le permitirá viajar desde y hacia ciertas zonas de la ciudad como el Centro, Laureles, Belén y El Poblado. Esta tarifa deberá pagarse tanto para la mañana (6:30am y 8:30am) como en la tarde (5:30pm y 7:30pm). La restricción por congestión aplica de lunes a viernes en los dos periodos pico del día” (Solarte Portilla, 2015).

El estudio presentó como resultado un modelo de elección discreta general para el área estudiada. Los resultados de estos modelos permitieron obtener curvas de probabilidades de la demanda para las diferentes alternativas de elección. En este caso se utilizará la curva de probabilidad de la demanda para los usuarios que saldrían durante las horas de aplicación y pagarían la tarifa de cobro por congestión. En la ilustración 4 se indica la curva de la probabilidad de la demanda para los usuarios de auto particular que saldrían y pagarían la tarifa de cobro por congestión para diferentes valores de la tarifa, analizado desde el modelo general (Solarte Portilla, 2015).

#### **Ilustración 4: Probabilidad demanda de usuarios que pagan tarifa de cobro por congestión**



Tomado de: Solarte Portilla (2015)

En este estudio se propone hacer uso de esta curva para el modelo de demanda, con la cual se va a determinar la tarifa óptima que logre cubrir los costos externos generados por la congestión a partir de la probabilidad encontrada por la investigación planteada para determinar los usuarios que estarían dispuestos a pagar la tarifa y la curva de oferta

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

encontrada a partir de los resultados del modelo en el software PTV-Vissim y de los costos generados por la congestión. La propuesta de hacer uso de esta curva se debe a que esta considera el cobro de la zona de estudio en específico que se está evaluando en este proyecto.

Con respecto a la modelación en el software ya mencionado, es importante resaltar que al montar y correr el modelo se requiere de una calibración que garantice que este si representa el comportamiento real de la malla vial. Uno de los métodos de calibración es mediante la expresión estadística GEH, donde se utilizan los volúmenes vehiculares obtenidos en las intersecciones aforadas para compararlos con los obtenidos del software para los mismos movimientos, aplicando la siguiente expresión estadística (ASITT S.A.S, 2016).

$$GEH = \sqrt{\frac{(V \text{ observado} - V \text{ simulado})^2}{0.5(V \text{ observado} + V \text{ simulado})}}$$

Donde,

V observado: Se refiere al volumen real

V simulado: Es el volumen que es arrojado por el modelo

Adicionalmente se considera que en los casos donde el valor del GEH sea menor de 5 ( $GEH < 5$ ), en el 85% de los diferentes tipos de vehículos y ningún valor de GEH debería ser mayor al 12 ( $GEH < 12$ ), el cumplimiento de estas condiciones establece que el modelo se encuentra calibrado y validado para realizar las evaluaciones correspondientes (ASITT S.A.S, 2016).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## **2. METODOLOGÍA**

Para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos se hace necesario seguir ciertas pautas o pasos dentro de la investigación, de esta manera partiendo de un conocimiento más avanzado de las teorías y modelos involucrados, así como de la problemática misma, se alcanzará un buen desarrollo del estudio.

### **2.1 DEFINIR LOS MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE COSTOS**

Para la determinación de los costos se utilizara la metodología propuesta por Artur Domínguez Varela (2007), la cual consiste en tener en cuenta tanto los costos directos o individuales (aumento del combustible, mantenimiento, entre otros) como los indirectos o exógenos (contaminación auditiva, emisiones, entre otros).

#### **2.1.1 Definir los métodos de cuantificación de costos directos**

Los costos individuales más importantes corresponden a los costos relacionados con la pérdida de tiempo, los cuales son determinados de acuerdo con los resultados arrojados por el modelo y con el costo subjetivo del tiempo para cada modo o con la metodología propuesta por Domínguez siempre y cuando se cuente con la información requerida; los costos generados por el incremento en el consumo de combustible, del cual existen actualmente un gran número de metodologías desarrolladas en diferentes investigaciones basadas en la velocidad promedio de los vehículos; y el costo relacionado con el consumo de lubricante para cada modo, el que será determinado mediante una relación directa entre este y el gasto de gasolina. Muchas de las variables para determinar estos costos ya han sido determinados, por lo que se tendrán en cuenta para el desarrollo de este estudio.

#### **2.1.2 Definir los métodos de cuantificación de costos indirectos**

Los costos indirectos más significativos corresponden a los generados por las emisiones de gases o la contaminación ambiental. Para este caso en específico se tendrán en cuenta que existen diferentes investigaciones cuyo resultado es el valor de las emisiones a tener en cuenta para este estudio (NO<sub>x</sub> y CO), por lo cual se realizará una revisión de dichos estudios para determinar un el valor de este basado en las metodologías planteadas para así determinar el costo de las emisiones arrojadas por el modelo.

### **2.2 DESARROLLO DEL MODELO MICROSCÓPICO**

#### **2.2.1 Obtener información de la vía**

Para poder realizar el modelo es necesario contar con información como señalización, semaforización, número y ancho de carril. Para los ciclos semaforicos y la señalización se solicitó a la Secretaria de Movilidad de Medellín y el número y ancho de carriles se tomará en campo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### **2.2.2 Definición de las horas en que se va a realizar el estudio**

Para esta actividad se debe conocer el corredor que se va a modelar, se procederá a introducir en la plataforma Google Maps el punto de partida, que en este caso será el inicio del corredor, y el punto destino, que será el punto final del corredor. La plataforma arrojará el tiempo que se demora un vehículo en recorrer dicho corredor en las diferentes horas del día, lo que supone que a mayor demoras mayor demanda de vehículos. Cabe aclarar que se tomará una ventana de observación de 3 horas, la cual corresponde a la de la hora pico de máxima demanda constatada en Google Maps opción traffic.

### **2.2.3 Realización de aforos**

El aforo se hará para conocer la composición vehicular, el volumen de vehículos y las maniobras que estos pueden realizar en la vía (vehículos que entran y que salen de la vía). Como se tienen varias intersecciones es necesario realizar varias tomas de datos a las horas pico determinadas anteriormente, para esto se realizará en los días típicos, los cuales son lunes martes, miércoles, jueves y viernes. La toma de datos se hará por medio de conteos realizados por personas y ayudas digitales (Cámaras fotográficas) en las entradas, salidas y algunas intersecciones que representen la mayor cantidad de trafico de los corredores. Este conteo se realiza ya que el modelo será estático, además permitirá su posterior calibración.

### **2.2.4 Montar el modelo con la información recolectada**

Será un modelo microscópico en el software PTV-Vissim, al cual se le incorporan las características del corredor (señalización, semaforización, intersecciones, entre otros) y para la entrada vehicular se tendrán en cuenta los aforos realizados. Será un modelo estático, el cual asume que durante el periodo modelado se mantienen las mismas condiciones de demanda y presupone la existencia de una situación de equilibrio, en otras palabras, la demanda, vehículos que realizan viajes en la red, así como la red son constantes en el tiempo (Cuellar, 2016). Sin embargo, en la realidad, la demanda de viajes cambia significativamente durante el día, y aún la red vial puede tener características que dependen del tiempo (Logistics, 2012).

Mientras que en los modelos dinámicos es necesario encontrar las posibles rutas para elegir la mejor opción, luego evaluar las alternativas, los modelos de asignación se originan a partir de la teoría de elección discreta. El procedimiento de asignación dinámica en VISSIM se basa en la idea de iterar simulación. Eso significa que una red modelada se simula no solo una vez sino repetitivamente y los conductores eligen sus rutas a través de la red en función del viaje costo que han experimentado durante las simulaciones anteriores (Martin Fellendorf, 2010). El modelo se presenta en el Anexo C.

### **2.2.5 Calibrar el modelo por medio de la técnica GEH**

En este caso para conocer si el modelo realizado si cumple con la realidad se comparará el volumen vehicular arrojados por el modelo con el de los aforos realizados.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El Índice Geoffrey E. Havers (GEH), permite comparar dos volúmenes vehiculares de una misma red (volumen observado y volumen modelado), con el propósito de cuantificar la calibración de modelos de simulación. El valor de GEH proporciona un indicador de la calibración del modelo respecto al ajuste de volúmenes, con base en los siguientes parámetros:

- $GEH < 5$  se considera que los volúmenes presentan un buen ajuste.
- $5 < GEH < 10$  se requieren ajustes adicionales.
- $10 < GEH$  los volúmenes no están ajustados correctamente

Adicionalmente se realizará una comparación teniendo en cuenta la velocidad media de los corredores arrojada por el programa mediante un mapa de calor y el proveído por Google Maps con el fin de analizar si el comportamiento del tráfico en la red creada en el modelo es semejante al comportamiento del tráfico real que se muestra en Google Maps.

## **2.3 DETERMINACIÓN DE LA TARIFA DE COBRO**

### **2.3.1 Obtener las variables a partir del modelo**

Después de tener el modelo calibrado se podrá correr con diferentes volúmenes de tráfico con el fin de obtener los valores de demoras, velocidades, consumo de combustible y emisiones que este arroje como resultado para cada volumen determinado. Se variará el volumen aforado, para así establecer diferentes volúmenes en la red, lo cual permite ver la variación de los costos teniendo en cuenta la demanda. Adicionalmente se segmentará por vehículo de 4 y 2 ruedas teniendo en cuenta que la ocupación y el comportamiento en el espacio viarios es diferente.

### **2.3.2 Determinación de costos**

A partir de los valores de las variables encontradas para cada volumen de tráfico y las metodologías planteadas en el numeral 5.1 se determinarán todos los costos por congestión que son generados por las diferentes demandas. Para determinar estos costos será necesario multiplicar los valores hallados anteriormente por la cantidad de cada ítem (demora, consumo de combustible, emisiones, etc.) arrojada por el modelo como resultado para cada valor de volumen de tráfico. Por ejemplo:

Costos ambientales = Cantidad de emisiones arrojada por el modelo X Costo emisiones

### **2.3.3 Construir las curvas de costo individual y marginal**

Para construir estas curvas se tendrán en cuenta los costos encontrados en el numeral 2.3.2 para los diferentes valores de demanda, los cuales corresponden al costo relacionado a la pérdida del tiempo, del combustible y de lubricantes para el costo individual, y a la suma del costo individual y el de las emisiones de CO y NOx para el costo marginal. Es importante mencionar que al costo marginal en el momento en que comienza la congestión

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

se le incrementa el sobre costo marginal de los vehículos de servicio público y los camiones, debido a que estos deben entrar a la zona de cobro por necesidad y los vehículos particulares son quienes deben asumir el impacto que estos generan representado con el costo marginal de los mismos.

#### **2.3.4 Determinar la tarifa del costo generado por la congestión**

Para esto es necesario, a partir de las curvas marginal, individual y de demanda, conocer los puntos de intersección entre la curva de demanda e individual y de la curva de demanda y marginal. La curva de demanda a usar será la propuesta por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, basada en encuestas realizadas para un estudio desarrollado por el mismo. Se encontrará la diferencia entre los valores de precio en dichos puntos, obteniendo la tarifa general que debe ser cobrada para cubrir los efectos externos generados por la congestión. Para obtener la tarifa individual es necesario dividir la tarifa general por la demanda encontrada en el punto de intersección entre la curva marginal y de demanda.

### **2.4 IDENTIFICAR LOS CAMBIOS GENERADOS POR EL COBRO**

#### **2.4.1 Obtener las variables del modelo al implementar el cobro**

Analizar las curvas de costo marginal e individual con el fin de hacer una comparación entre el valor inicial de las mismas, el cual corresponde a la demanda obtenida con los aforos, y al implementar la tarifa, lo cual permite encontrar los cambios que genera el sistema de cobro.

#### **2.4.2 Proponer un esquema de cobro**

Proponer un esquema de cobro teniendo en cuenta la infraestructura con la que se cuenta y la que sería posible implementar en los corredores donde se desarrolló el estudio.

## **3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **3.1 DEFINICIÓN DE LOS MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE COSTOS**

#### **3.1.1 Definición de los métodos de cuantificación de costos directos**

- **Costos generados por el consumo de combustible**

Uno de los costos directos relacionados a la congestión corresponde al consumo de combustible, el cual se relaciona con la velocidad a través de diferentes modelos, resultado de experimentos en condiciones reales de distintos tipos de vehículos. Este se considera directo ya que recae sobre los conductores de los vehículos.

En un escenario de congestión, el consumo de combustible sufre un aumento debido a tres motivos principales: el tiempo extra en que el vehículo se encuentra en circulación, el mayor consumo a causa de transitar a bajas velocidades, y el gran número de aceleraciones y desaceleraciones que se producen en esta condición (Domínguez Varela, 2007).

Este exceso de consumo genera un incremento en los costos de operación de los vehículos. Según lo anterior y teniendo en cuenta que el software arroja como resultado un consumo de combustible total para el tiempo de viaje de cada recorrido, el costo generado por el consumo de combustible será obtenido mediante el valor del combustible que utiliza cada tipo de vehículo (ACPM o gasolina), el consumo de combustible promedio arrojado por el modelo y la relación entre el rendimiento de cada tipo de vehículo con el rendimiento de un auto particular, ya que la información arrojada por el modelo es para vehículos equivalentes. Estas expresiones serán expuestas específicamente a lo largo del desarrollo de este trabajo.

- **Costos generados por el incremento de lubricantes**

El consumo de lubricantes está directamente relacionado con el consumo de combustible, siendo el consumo de lubricantes un 1.4% del consumo de combustible, este porcentaje es utilizado para determinar el costo generado por los mismos. (Muñoz Puentes, 2014)

- **Costos relacionados con la pérdida de tiempo**

Este costo representa el valor del tiempo de las personas que se encuentran en el vehículo, ya que se refiere a lo que podría producir si en lugar de estar esperando en una zona de congestión, recibiera un pago en ese tiempo como compensación de realizar una actividad productiva o si no dejará de percibir ganancias causadas por los retrasos.

Para determinar este valor es necesario conocer tres variables importantes, el porcentaje por motivo de viaje a la zona, para esto es necesario consultar la encuesta origen - destino realizada por el Área Metropolitana del Valle de Aburra, el valor subjetivo del tiempo por motivo de viajes y la tasa de ocupación por cada tipo de vehículos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, el costo total relacionado con la pérdida de tiempo por modo será el valor por minuto del tiempo total de viaje que será arrojado como resultado del modelo.

### **3.1.2 Definición de los métodos de cuantificación de costos indirectos**

Los costos indirectos o costo marginal incluyen el costo individual encontrado con los métodos definidos anteriormente, los costos generados por la contaminación o emisiones de diferentes gases contaminantes y el costo marginal total generado por los vehículos que no se les cobra la tarifa por congestión, ya que estos costos deben ser asumidos por los usuarios de los vehículos particulares (carros y motos) debido a que tanto los vehículos de transporte público como los de carga no tienen opción en realizar su viaje a la zona, sin embargo el efecto de los vehículos privados afecta su operación, razón por la cual los vehículos privados deben asumir los sobrecostos que se generan en el momento que comienza la congestión. El valor que debe ser asumido es el costo extra que se tiene en el momento que se genera la congestión, por lo que se debe encontrar el promedio del costo marginal cuando no se presenta congestión y restarlo al valor total del costo marginal correspondiente a cada volumen que se esté evaluando. Debido a que este costo debe ser asumido por el total de vehículos a los que se les esté generando el cobro, la manera en la que se repartirá este costo será a partir del volumen de vehículos, asumiendo que las motos corresponden a 0.5 automóviles debido a la conversión de una unidad de motocicleta a automóvil equivalente para lograr la homogenización del flujo.

A continuación, se presenta la metodología que será implementada para determinar los costos generados por la contaminación:

- **Costos generados por la contaminación**

Las emisiones a tener en cuenta son las emitidas por el tubo de escape como producto de la quema del combustible (sea éste gasolina, ACPM u otros como gas licuado o biocombustibles) y comprenden a una serie de contaminantes tales como: el monóxido y bióxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno y las partículas (Los vehículos automotores como fuentes de emisión, 2008).

Las emisiones producidas por las fuentes móviles que se tendrán en cuenta para este estudio son las de que mayor impacto generan en el costo, las cuales son el carbono (CO<sub>2</sub>) y el óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) como se evidencia en la Fuente: (Los vehículos automotores como fuentes de emisión, 2008)

### Ilustración 5: Contribución porcentual de las emisiones vehiculares en México.

| Ciudad o zona                     | Contaminante |                 |                 |                 |                    |     |                  |                   |            |
|-----------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----|------------------|-------------------|------------|
|                                   | CO           | NO <sub>x</sub> | NH <sub>3</sub> | SO <sub>2</sub> | COT/<br>GOT/<br>HC | COV | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | Partículas |
| ZMVM <sup>1</sup>                 | 99           | 82              | 22              | 50              | 25                 | 36  | 24               | 59                | NE         |
| ZMG <sup>2</sup>                  | 100          | 91              | NE              | 30              | 57                 | NE  | NE               | NE                | 78         |
| ZMM <sup>3</sup>                  | 100          | 64              | NE              | 8               | 66                 | NE  | NE               | NE                | 11         |
| ZMVP <sup>4</sup>                 | 96           | 81              | NE              | 3               | 51                 | NE  | 5                | NE                | NE         |
| ZMVT <sup>5</sup>                 | 100          | 90              | NE              | 16              | 58                 | NE  | NE               | NE                | 65         |
| Salamanca <sup>6</sup>            | 87           | 38              | NE              | 1               | 74                 | NE  | 11               | NE                | NE         |
| Cd. Juárez <sup>7</sup>           | 91           | 51              | NE              | 2               | 55                 | NE  | 9                | 18.2              | NE         |
| Mexicali <sup>8</sup>             | 91           | 81              | NE              | 25              | 61                 | NE  | 1                | NE                | NE         |
| Tijuana–<br>Rosarito <sup>9</sup> | 94           | 82              | NE              | 3               | 48                 | NE  | 4                | NE                | NE         |

Fuente: (Los vehículos automotores como fuentes de emisión, 2008)

Para tener una referencia sobre la magnitud de CO<sub>2</sub> en Colombia, es importante mencionar que las emisiones debidas a estos combustibles representan cerca del 27% de las emisiones totales del país, es decir cerca de 51 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MINAMBIENTE, 2017). Estas emisiones son arrojadas por el modelo como un total de gramos de carbono para un recorrido en específico. Para determinar este costo se remitió a un artículo publicado en el sitio web Portafolio en enero del 2019, donde se refieren a los impuestos a la gasolina, el ACPM y el carbono según varios mandatos consignados en las reformas tributarias del 2012 y 2016. Según este artículo el gravamen para las emisiones de CO<sub>2</sub> por galón de gasolina es de \$148 pesos colombianos y para el ACPM es de \$166 (Portafolio, 2019). Como se evidencia el valor para el galon de ACPM es mas costo que el de la gaolina, ya que se determina según los factores de emisión de CO<sub>2</sub> que cada uno de estos genera.

Para el valor de NO<sub>x</sub> se utilizó la metodología presentada por Pizarro (2018), para calcular los impuestos verdes en Chile, la formula utilizada se muestra en la Ilustración 6. Donde CCAj es la calidad del aire de la zona y toma valores entre 1.2 y 1 para zonas saturadas y sin declaración respectivamente. En Medellín la calidad de aire es baja, por lo tanto, se toma un valor de 1.2 para este cálculo. Por último, la población para Medellín en el 2019 es de 2'901.948 habitantes (Cifuentes, 2018) obteniendo un valor por gramo de NO<sub>x</sub> de \$ 25.79.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Ilustración 6: Fórmula para el cálculo de impuestos verdes.**

$$T_{ij} = 0,1 * CCA_j * CSC_{pci} * Pobj$$

|               |  |                 |              |                 |     |              |     |      |       |
|---------------|--|-----------------|--------------|-----------------|-----|--------------|-----|------|-------|
| $T_{ij}$      | • Impuesto por tonelada del contaminante "i" emitido en la comuna "j", en US\$/Ton.  |                 |              |                 |     |              |     |      |       |
| $CCA_j$       | <table border="1"> <tr> <td>Zona Saturada</td> <td>Zona Latente</td> <td>Sin declaración</td> </tr> <tr> <td>1,2</td> <td>1,1</td> <td>1</td> </tr> </table>   | Zona Saturada   | Zona Latente | Sin declaración | 1,2 | 1,1          | 1   |      |       |
| Zona Saturada | Zona Latente   | Sin declaración |              |                 |     |              |     |      |       |
| 1,2           | 1,1  | 1               |              |                 |     |              |     |      |       |
| $CSC_{pci}$   | • Costo social per cápita de la contaminación para el contaminante "i".<br><table border="1"> <tr> <td>Contaminante</td> <td>MP</td> <td>SO2</td> <td>NOX</td> </tr> <tr> <td>Costo (US\$)</td> <td>0,9</td> <td>0,01</td> <td>0,025</td> </tr> </table> | Contaminante    | MP           | SO2             | NOX | Costo (US\$) | 0,9 | 0,01 | 0,025 |
| Contaminante  | MP   | SO2             | NOX          |                 |     |              |     |      |       |
| Costo (US\$)  | 0,9  | 0,01            | 0,025        |                 |     |              |     |      |       |
| $Pobj$        | • Población de la comuna "j", proyección oficial para cada año del INE   |                 |              |                 |     |              |     |      |       |

Fuente: (Pizarro, 2018)

**Ilustración 7: Total población de Medellín.**

| TOTAL POBLACION |           |           |           |            |             |              |              |               |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| Año             | Total     | Hombres   | Mujeres   | 0 a 4 años | 5 a 14 años | 15 a 49 años | 50 a 64 años | 65 años y mas |
| 2005            | 2.499.080 | 1.138.523 | 1.360.557 | 218.884    | 436.209     | 1.372.714    | 323.219      | 148.052       |
| 2006            | 2.525.902 | 1.150.743 | 1.375.159 | 221.233    | 440.891     | 1.387.447    | 326.688      | 149.642       |
| 2007            | 2.553.012 | 1.163.094 | 1.389.919 | 223.608    | 445.623     | 1.402.339    | 330.194      | 151.248       |
| 2008            | 2.580.414 | 1.175.577 | 1.404.836 | 226.008    | 450.406     | 1.417.390    | 333.739      | 152.872       |
| 2009            | 2.608.109 | 1.188.194 | 1.419.914 | 228.433    | 455.240     | 1.432.603    | 337.320      | 154.512       |
| 2010            | 2.636.101 | 1.200.947 | 1.435.154 | 217.391    | 437.713     | 1.406.736    | 398.110      | 176.150       |
| 2011            | 2.664.394 | 1.213.837 | 1.450.557 | 219.725    | 442.411     | 1.421.834    | 402.383      | 178.041       |
| 2012            | 2.692.991 | 1.226.865 | 1.466.126 | 222.083    | 447.160     | 1.437.095    | 406.702      | 179.952       |
| 2013            | 2.721.894 | 1.240.033 | 1.481.862 | 224.466    | 451.959     | 1.452.519    | 411.067      | 181.883       |
| 2014            | 2.751.108 | 1.253.342 | 1.497.767 | 226.876    | 456.810     | 1.468.108    | 415.479      | 183.835       |
| 2015            | 2.780.636 | 1.266.794 | 1.513.842 | 218.452    | 436.753     | 1.429.076    | 473.658      | 222.696       |
| 2016            | 2.810.480 | 1.280.390 | 1.530.090 | 220.797    | 441.441     | 1.444.414    | 478.741      | 225.087       |
| 2017            | 2.840.644 | 1.294.132 | 1.546.512 | 223.167    | 446.179     | 1.459.917    | 483.880      | 227.502       |
| 2018            | 2.871.133 | 1.308.022 | 1.563.111 | 225.562    | 450.967     | 1.475.586    | 489.073      | 229.944       |
| 2019            | 2.901.948 | 1.322.061 | 1.579.887 | 227.983    | 455.808     | 1.491.423    | 494.322      | 232.412       |
| 2020            | 2.933.094 | 1.336.250 | 1.596.844 | 224.618    | 446.878     | 1.471.390    | 525.799      | 264.409       |

Fuente: (Cifuentes, 2018)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 3.2 DESARROLLO DEL MODELO MICROSCÓPICO

### 3.2.1 Obtener información de la vía

El estudio fue realizado para el centro de la ciudad de Medellín, sin embargo, en el modelo se tendrán en cuenta tres de los principales corredores del mismo: la Avenida Colombia (calle 50) desde la Avenida Oriental (carrera 46) hasta la Avenida Regional (carrera 62), la Avenida La Playa (calle 52 hasta la Plaza Botero y calle 53 que se convierte en la Avenida de Greiff) desde la Avenida oriental (carrera 46) hasta la Plaza Minorista, más específicamente hasta la carrera 57, y la Avenida Palacé (carrera 50 hasta la Plaza Botero y carrera 51 que se convierte en Bolívar). Estos corredores fueron elegidos debido a que logran atravesar todo el anillo que conforma la zona del centro de la ciudad y que, además, corresponden a algunos de los corredores más concurridos y congestionados de la zona, brindando información importante acerca de la cantidad de vehículos que ingresan y salen de la zona de estudio.

#### Ilustración 8: Corredores a evaluar



Fuente: Elaboración propia

Estos corredores fueron elegidos debido a que atraviesan completamente la zona del centro de la ciudad, el cual se muestra en la Ilustración 8: Corredores a evaluar. Las vías que conforman el anillo son la Avenida Oriental, Avenida Echeverry (calle 58), Avenida Ferrocarril y Calle San Juan. El cobro por congestión estaría exento en estas vías y su

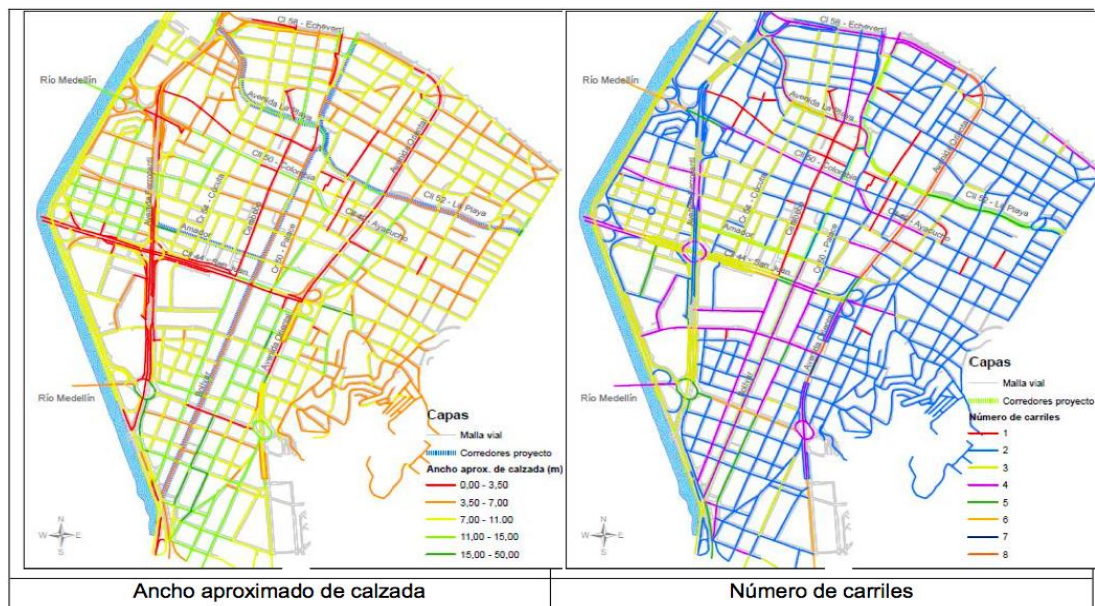
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

aplicación se realizaría para los viajes en auto que entran por cualquier acceso a la zona de cobro por congestión que se mostró anteriormente en la ilustración 1.

En un estudio realizado por Javier Jesús Solarte Portilla de la Universidad Nacional se presenta una recolección de información de la infraestructura vial, identificando sentidos viales, tipos de vías, número de carriles, entre otras. “Esta actividad se realizó mediante visitas de campo, herramientas ofimáticas como el Street View del Google Maps, Google Earth; con el estudio de información de bases de datos de la Secretaria de Movilidad de Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y del análisis de información secundaria del “Estudio de preinversión de movilidad para determinar la viabilidad de peatonalización total o parcial de algunos tramos viales del centro de la ciudad de Medellín bajo el concepto de tráfico lento y de supermanzanas”, realizado por la firma consultora TPD Ingeniería S.A. dentro del contrato de consultoría 4600053985 en el año 2014” (Solarte Portilla, 2015). Sin embargo fue necesario realizar una visita a la zona para actualizar esta información, ya que algunas sección del año 2015 ahora se han reducido debido a la peatonalización del centro e incorporación de ciclo ruta y espacio publico.

En la ilustración 9 se indica la caracterización de las vías en la zona de estudio y en la ilustración 10 la caracterización del sentido vial, tomado del trabajo de Javier Jesús Solarte, de donde se podrá obtener la información necesaria de los corredores a modelar en este trabajo.

### Ilustración 9: Caracterización de las vías en la zona de estudio

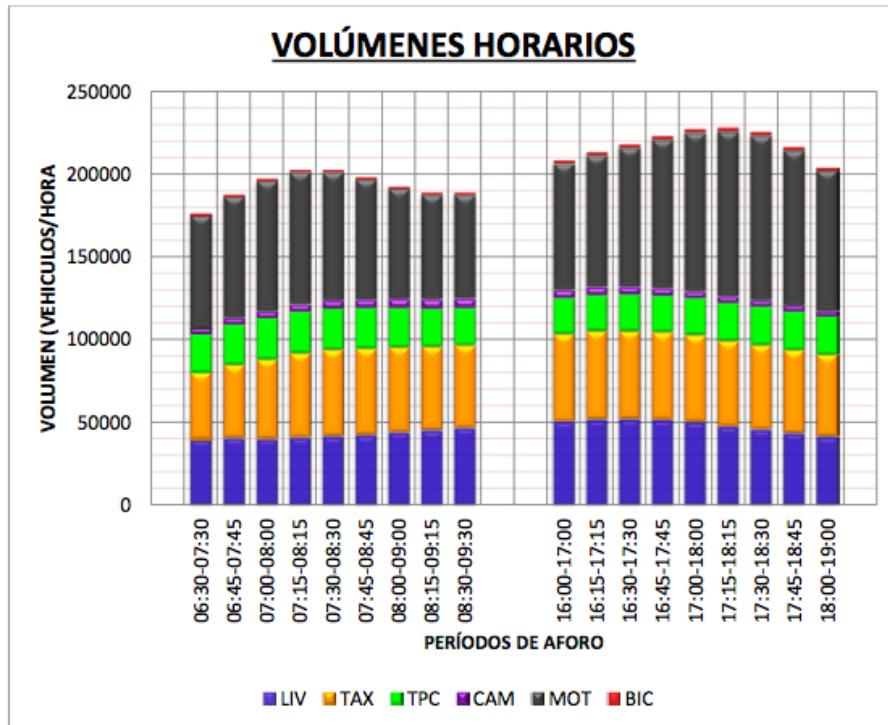


Tomado de: Solarte Portilla (2015)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



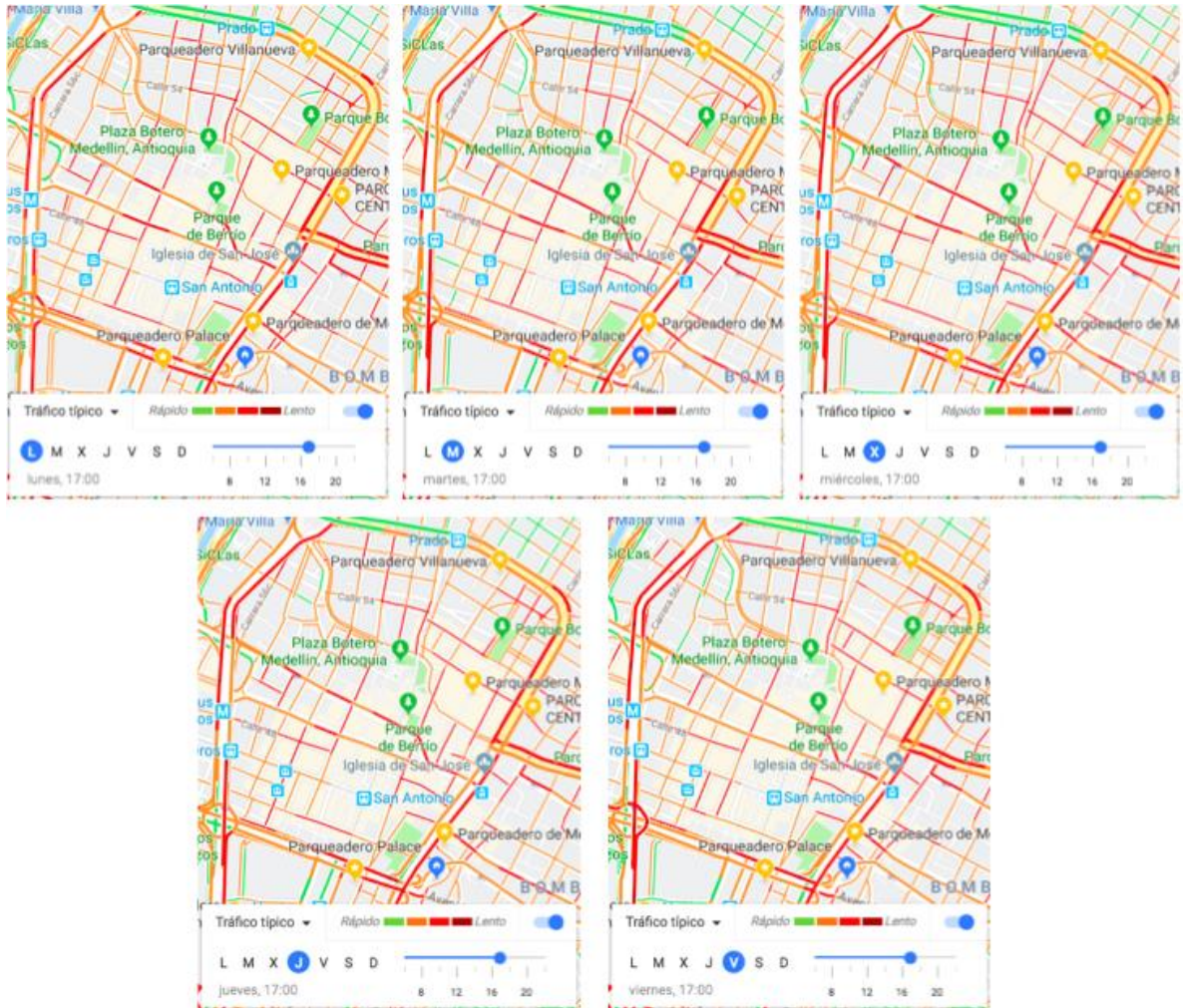
**Ilustración 11: Volúmenes de vehículos por hora en el centro Medellín**



Tomado de: Solarte Portilla (2015)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## Ilustración 12: Tráfico típico para cada día de la semana



Tomado de: Google Maps (<https://www.google.com/maps>)

Con base en esto se concluye que los aforos deben ser realizados preferiblemente entre las 15:30 y las 17:30 para tener una ventana de tiempo de dos horas y así determinar con el volumen aforado la hora pico real.

### 3.2.3 Realización de aforos

Los aforos vehiculares fueron realizados en diferentes intersecciones ubicadas a lo largo de los corredores a evaluar, las cuales fueron seleccionadas según las zonas de mayor convergencia de flujos vehiculares o con mayor influencia en los corredores. En la Ilustración 13: Intersecciones aforadas se muestra un mapa donde se logran apreciar los 12 puntos o intersecciones que fueron aforadas para el desarrollo del trabajo, en las cuales se tomaron los datos de la cantidad de vehículos que realizaban todas las maniobras

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



permitidas en cada una de las intersecciones, en periodos definidos cada 15 minutos durante las 2 horas, entre 15:30 y 17:30. La toma de datos fue realizada para cada tipo de vehículos, donde fueron incluidas motocicletas, vehículos livianos o particulares, taxis, buses y busetas, camiones y bicicletas. Los datos obtenidos por medio de los aforos se encuentran adjuntos en el Anexo A.

### Ilustración 13: Intersecciones aforadas



Tomado de: Elaboración propia

Debido a que no se aforaron todas las intersecciones que tienen los corredores evaluados y que los aforos en los diferentes puntos no fueron realizados el mismo día, fue necesario realizar un balanceo de aforos, el cual consiste en dar equilibrio a los volúmenes presentes en la red, considerando los volúmenes que entran y salen a lo largo de los corredores en las intersecciones aforadas. En otras palabras y para explicarlo con un ejemplo, el volumen que sale del punto 10 debe coincidir con el volumen que ingresa al punto 7 en la Av. Palace, sin embargo, según los datos obtenidos en los aforos estos volúmenes no son iguales, por lo que esta diferencia, ya sea de entrada o salida de vehículos, debe ser absorbida o repartida en las intersecciones que se encuentran entre estos dos puntos. Estas diferencias

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

se muestran en la Tabla 1: Diferencias de vehículos entre el punto 10 y 7, donde los valores positivos corresponden a entradas de vehículos entre los dos puntos y los negativos a salidas de vehículos. Entre las razones que justifican estas diferencias se encuentra que los aforos en todas las intersecciones no fueron realizados el mismo día debido a los recursos del proyecto, generando cambios en volúmenes aforados. Estos ajustes se hacen con el fin de balancear el modelo, para que el volumen a lo largo de los corredores sea continuo y no se interrumpa con cambios en las intersecciones.

**Tabla 1: Diferencias de vehículos entre el punto 10 y 7**

|                    | <b>Motos</b> | <b>Livianos</b> | <b>Taxis</b> | <b>Buses</b> | <b>Camiones</b> | <b>Bicicletas</b> |
|--------------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|-------------------|
| <b>3:30 - 3:45</b> | 4            | -12             | 15           | -9           | 2               | -2                |
| <b>3:45 - 4:00</b> | 68           | 8               | 21           | 3            | 3               | 0                 |
| <b>4:00 - 4:15</b> | 0            | 4               | 19           | -15          | -4              | 0                 |
| <b>4:15 - 4:30</b> | 39           | 2               | 35           | 18           | 2               | -6                |
| <b>4:30 - 4:45</b> | 112          | 13              | 54           | 18           | 2               | 5                 |
| <b>4:45 - 5:00</b> | -22          | -13             | 39           | 6            | -3              | 2                 |
| <b>5:00 - 5:15</b> | -26          | -1              | 31           | -11          | 3               | -3                |
| <b>5:15 - 5:30</b> | 43           | -21             | 60           | 17           | 4               | 2                 |

Fuente: Elaboración propia

Para lograr esto se le dio un peso o porcentaje a cada una de estas intersecciones según el número de carriles y el flujo de tráfico común observado en Google Maps. Este porcentaje fue establecido tanto para las salidas como para las entradas. Para el ejemplo descrito anteriormente se asignaron los siguientes porcentajes:

Punto 107-1: Calle 46: 30% Entrada

Punto 107-2: Calle 48: 35% Entrada, 40% Salida

Punto 107-3: Calle 49: 35% Entrada, 60% Salida

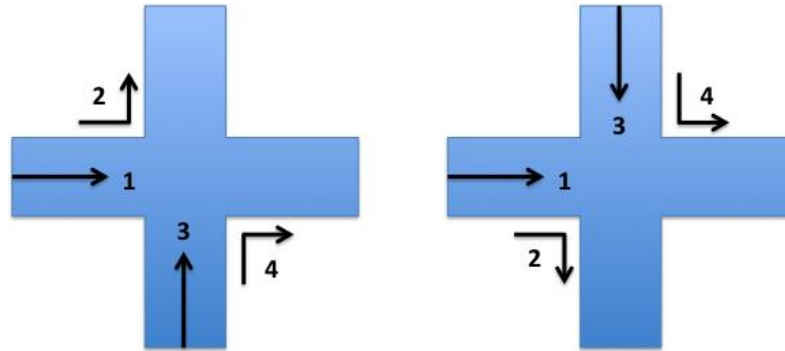
A partir de este porcentaje es posible apreciar que tanto los porcentajes de entrada como los de salida de todas las intersecciones entre dos puntos aforados deben sumar el 100%, además, se debe tener en cuenta para cada intersección si se pueden dar salidas del corredor, entradas o las dos maniobras.

Por otro lado, fue necesario asignar un volumen correspondiente a entradas o salidas de vehículos a cada una de las intersecciones en los periodos de tiempo donde estas no se presentaran, es decir, en un periodo de tiempo donde se dan salidas no es lógico pensar que no se presenta ninguna entrada en las intersecciones donde éstas sean posibles, por lo cual se asignó un volumen a partir de la diferencia de vehículos entre las puntos aforados y el porcentaje que esta representa, el cual sería incluido como entradas pero también debió ser añadido a las salidas para que no se afectara el volumen real que representa la diferencia de vehículos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Por último, la asignación del volumen para cada maniobra en las intersecciones se logró por medio de las siguientes fórmulas, obtenidas según un porcentaje establecido para las maniobras de entrada y de salida a criterio de los autores.

**Ilustración 14: Esquema de maniobras en intersecciones**



Fuente: Elaboración propia

Cuando en la intersección se dan entradas:

$$V_1 = V_0 + V_i - V_4$$

$$V_2 = \%M * \%D * V_i$$

$$V_3 = \%M * \%D * V_i$$

$$V_4 = V_i * (\%D + 1) - V_3$$

Cuando en la intersección se dan salidas:

$$V_1 = V_0 + V_i - V_4$$

$$V_2 = V_i * (\%D - 1) - V_3$$

$$V_3 = \%M * \%D * V_i$$

$$V_4 = \%M * \%D * V_i$$

Donde:

$V_0$ , es el volumen inicial o de entrada a la intersección

$V_i$ , es el volumen de entradas o salidas asignadas para la intersección

$\%D$ , es el porcentaje de la diferencia de los volúmenes aforados

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

%M, es el porcentaje asignado para cada maniobra de entrada o salida

Cabe aclarar que esta distribución se realizó a las intersecciones donde se pueden dar las cuatro maniobras presentadas, ya que donde se dan solo entradas y salidas solo se presenta una maniobra que debe incluir todo el volumen que se le asigne a la intersección.

Después de realizar este proceso se obtuvo como resultado final el volumen para cada una de las maniobras de todas las intersecciones que componen los tres corredores evaluados, los cuales fueron ingresados al modelo con el fin de obtener las variables o datos necesarios para calcular los costos de congestión. Este proceso debe realizarse por cada modo, ya que esto permite obtener un modelo más cercano a la realidad.

### **3.2.4 Desarrollo del modelo**

El modelo fue realizado en el software PTV Vissim, líder mundial para la simulación microscópica del tráfico, donde se hizo la simulación de un modelo estático para los tres corredores elegidos en la hora de mayor demanda del tiempo aforado, correspondiente al periodo de 4:30 pm a 5:30 pm.

El software VISSIM permite el análisis de movilidad, empleándose como herramienta de soporte para la modelación microscópica. Permite representar el tráfico urbano y las operaciones de transporte público, basado en el comportamiento vehicular a través del tiempo y el comportamiento del conductor. La precisión del modelo está soportada en la metodología empleada para simular el movimiento de los vehículos en la red, considerando el comportamiento psicofísico del conductor desarrollado por el profesor Wiedemann (1974) con distribuciones estocásticas de la velocidad y distancia de desplazamiento. Este modelo ha sido calibrado a través de múltiples mediciones de campo en la Universidad Técnica de Karlsruhe de Alemania (ASITT S.A.S, 2016).

Es por esto que se decidió modelar la red a analizar en el software PTV Vissim, donde se simulará un modelo dinámico para los 3 corredores elegidos (Ayacucho - Avenida Colombia, La Playa – Greiff y Palacé – Bolívar), donde se tendrán en cuenta únicamente las entradas, salidas e intersecciones entre ellos.

Debido a las condiciones con las que se montará el modelo es importante resaltar que los aforos se realizaron en la entrada y salida de los corredores a simular, además de intersecciones entre ellos.

Una vez conformada la red vial que se ubica en el área de influencia directa del Proyecto, se procede a la alimentación de la información secundaria relacionada con la movilidad, como son: volúmenes vehiculares, velocidades, restricciones en la infraestructura y demás parámetros de tránsito necesarios para posteriormente realizar las evaluaciones

#### **3.2.4.1. Construcción de la red**

Para diseñar la geometría de la vía en PTV Vissim se tomó como referencia la base satelital que tiene el software, la cual es proporcionada por Bing Maps. Luego de tener el bosquejo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de la malla vial, se procedió a suavizar las curvas para evitar que los vehículos presenten demoras innecesarias. Posteriormente, se ingresaron los anchos de las diferentes secciones viales.

Mediante la herramienta “link” se procedió a construir la red obteniendo el resultado que se muestra en Ilustración 15: Red modelada en el software Vissim, para esta construcción se debe tener en cuenta el número de carril y su ancho, el cual en la mayoría de los casos es 3,5 m.

**Ilustración 15: Red modelada en el software Vissim**



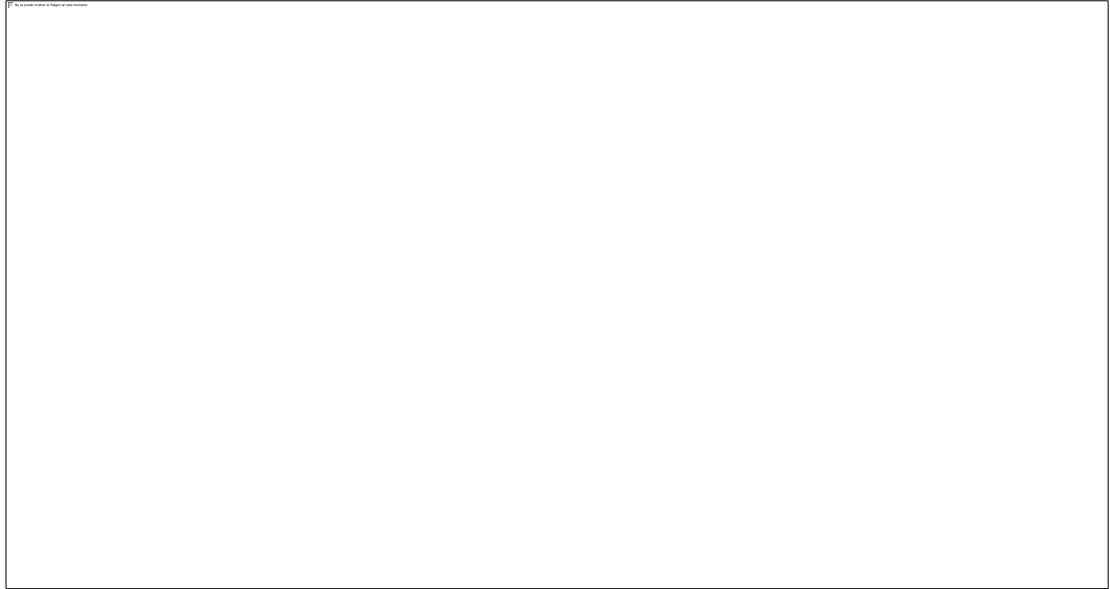
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4.2. Zonas de conflicto

Para esta red se prioriza los corredores más importantes (Ayacucho – Av. Colombia y La Playa - Greiff), por lo tanto, los vehículos que se van a integrar a dichos corredores deben esperar la brecha al ingresar. En la Ilustración 16: Áreas de conflicto se muestra un ejemplo, en la cual la línea verde representa la vía que tiene la prioridad.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### **Ilustración 16: Áreas de conflicto**



Fuente: Elaboración propia

#### **3.2.4.3. Rutas**

Se procedió a definir cada ruta que puede tomar un vehículo. Se debe realizar un “vehicle route” estático para cada modo (Moto, Carro, Taxi, Bus, Camión y Bicicleta). Para esto, se organizaron los datos de los aforos de tránsito y se construyeron cuadros que comparan el porcentaje de los vehículos que toma cada ruta en la hora de máxima demanda. Cabe resaltar que estas proporciones se realizaron por tipo de vehículo. En la Ilustración 17: Vehicle route se aprecia un ejemplo de la decisión entre seguir por la Av. Colombia o voltear a Palacé.

### Ilustración 17: Vehicle route



Fuente: Elaboración propia

#### 3.2.4.4. Comportamiento de los conductores

Se modificó la forma en que se comportan las bicicletas y motos en la vía, ya que no es igual al de un vehículo de 4 ruedas. De esta forma, se asemeja más a lo observado durante los aforos en el cual las bicicletas y motos generalmente circulan por entre vehículos a una distancia muy pequeña.

Por otro lado, se modificó el adelantamiento: donde los vehículos pueden adelantar por el carril izquierdo o derecho, también se modifica el espacio que necesita cada modo (tipo de vehículo) para adelantarse.

#### 3.2.4.5. Velocidades de recorrido

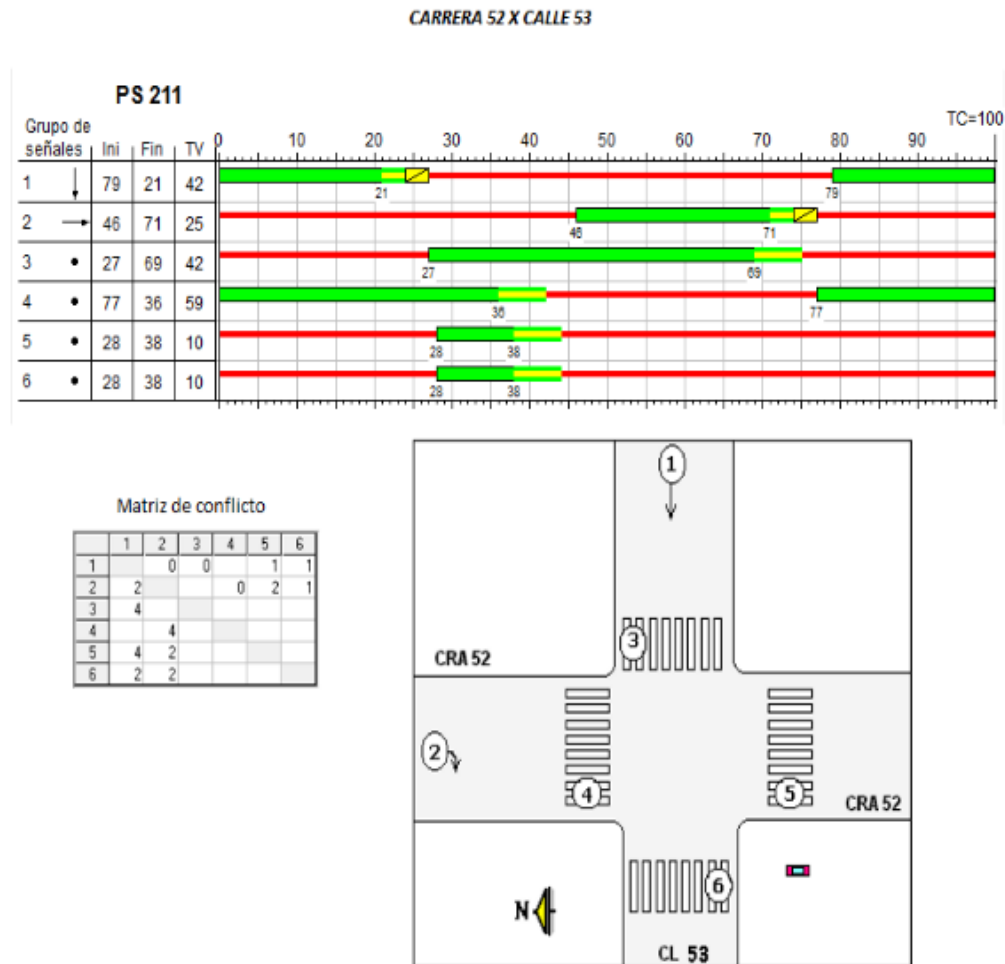
La velocidad para todos los modos con excepción de las bicicletas se considera como la del límite de velocidad en la zona céntrica. Sin embargo, estas velocidades no serán realmente a las que circularan los vehículos por la red, ya que el modelo tiene en cuenta el volumen vehicular, la semaforización y la geometría vial los cuales se encargan de restringir la velocidad.

#### 3.2.4.6. Semáforos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El software permite la alimentación del control semafórico, este tiene en cuenta la matriz de conflicto, duración del ciclo, número de fases y tiempo entre verdes. Esta información fue suministrada por la Secretaria de Movilidad de Medellín y en la Ilustración 18: Información semafórica se muestra un ejemplo, esta información fue pedida para cada una de las intersecciones que cuentan con semáforo y hacen parte de la red vial de modelación.

**Ilustración 18: Información semafórica**

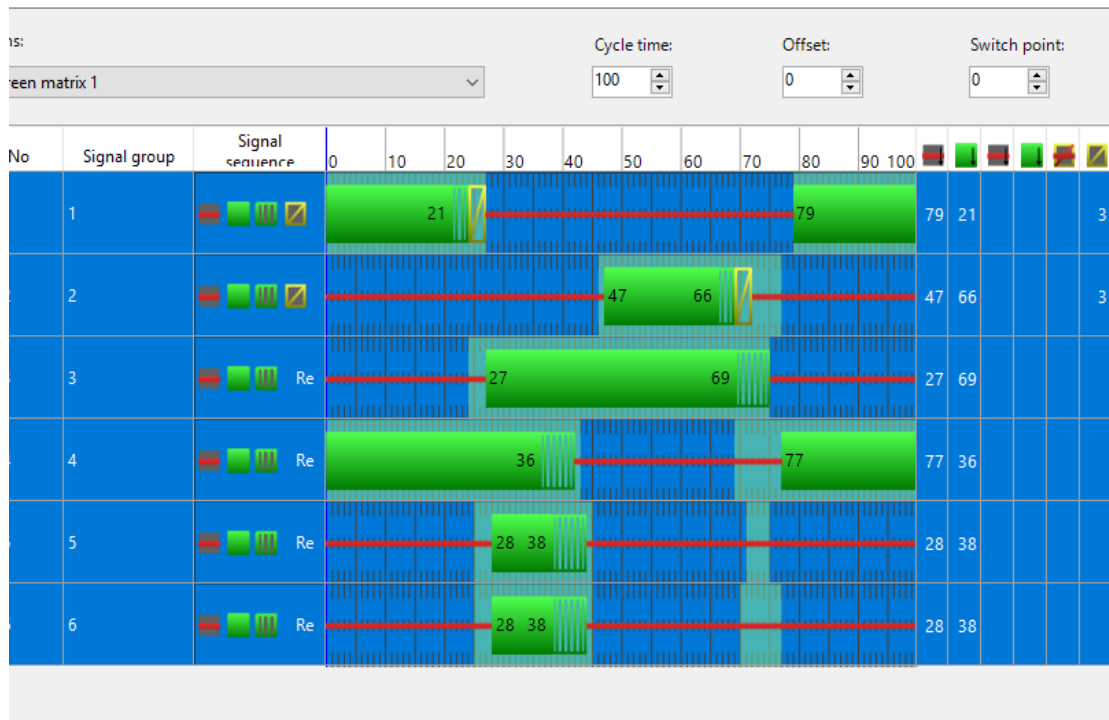


Fuente: (Secretaria de Movilidad de Medellín, 2019)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



### Ilustración 19: Programación semafórica



Fuente: Elaboración propia

En la fase mostrada en la Ilustración 19: Programación semafórica se evidencia que cuatro de los seis ciclos semafóricos no presentan tiempo en amarillo, ya que se trata de semáforos peatonales.

#### 3.2.4.7. Entradas vehiculares

Para los “inputs” se tuvo en cuenta el volumen en la hora pico de 4:30 a 5:30, para cada entrada se realizó un “input” para cada tipo de vehículo. Los volúmenes utilizados para en las entradas vehiculares se encuentra en el Anexo A

#### 3.2.4.8. Calibrar el modelo

Para la calibración del modelo, se usaron “NODOS”, modulo con el que cuenta el software. El cual permite obtener los parámetros de tránsito para conocer las condiciones de movilidad en las intersecciones aforadas.

Algunas de las variables analizadas son:

- Sentido del desplazamiento
- Número total de vehículos por movimiento
- Índices de contaminación

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para este proyecto se analizaron diez (10) nodos los cuales se ubicaron en las intersecciones aforadas las cuales fueron mencionadas en Realización de aforos y dos (2) colectores para calibrar las salidas del punto 4 y punto 8.

En especial para la calibración se analizaron los volúmenes vehiculares en las intersecciones aforadas y se compararon con los obtenidos por el software de micro modelación, aplicando la expresión estadística GEH.

A continuación, se presenta el porcentaje correspondiente al indicador **GEH** del modelo. Los cálculos se encuentran en el Anexo B

**Tabla 2: Resultados GEH**

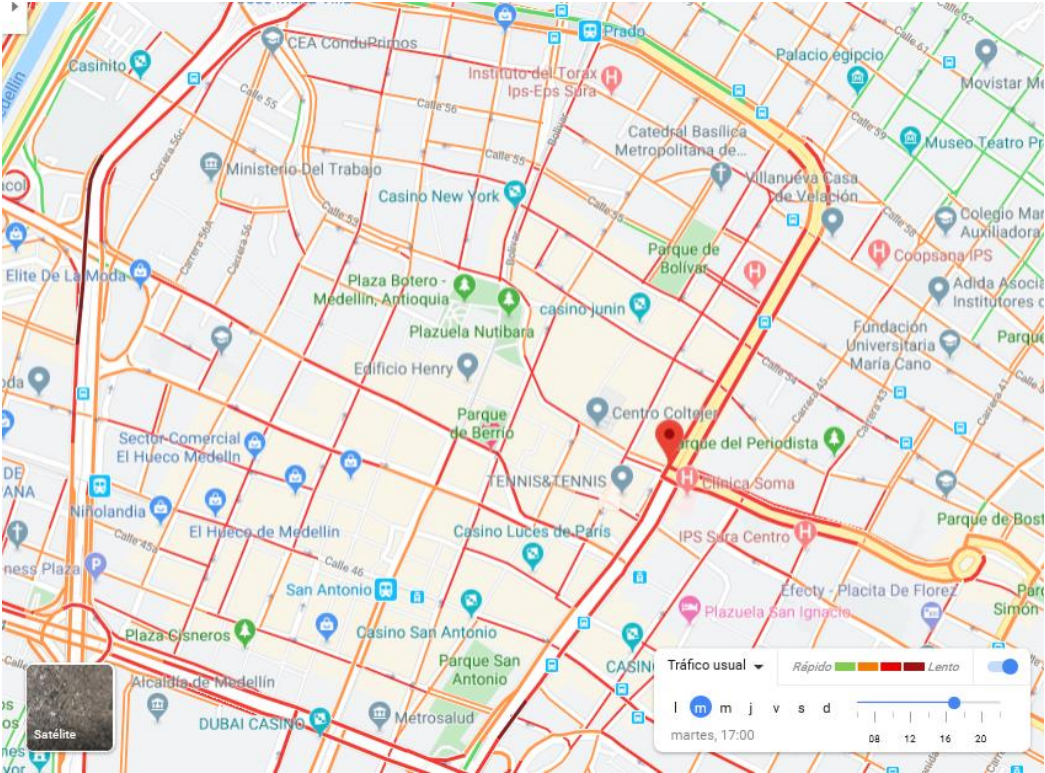
| <b>TOTAL DE PUNTOS</b>         |      |
|--------------------------------|------|
| <b>Porcentaje menor &lt;5</b>  | 95%  |
| <b>Porcentaje menor &lt;10</b> | 100% |
| <b>Porcentaje menor &lt;12</b> | 100% |

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente por recomendación del director se realiza una calibración teniendo en cuenta el mapa de calor de las velocidades arrojadas por el modelo en la simulación. Para esto es necesario conocer el mapa de calor de la herramienta Google Maps en la hora pico, hay que tener en cuenta que esta herramienta cuenta con cuatro intervalos de 0-15 km/h, 15-30 km/h, 30-45 km/h y 45-60 km/h. Por lo que se decide implementar estos mismos intervalos en el modelo, para así poder comparar ambos mapas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

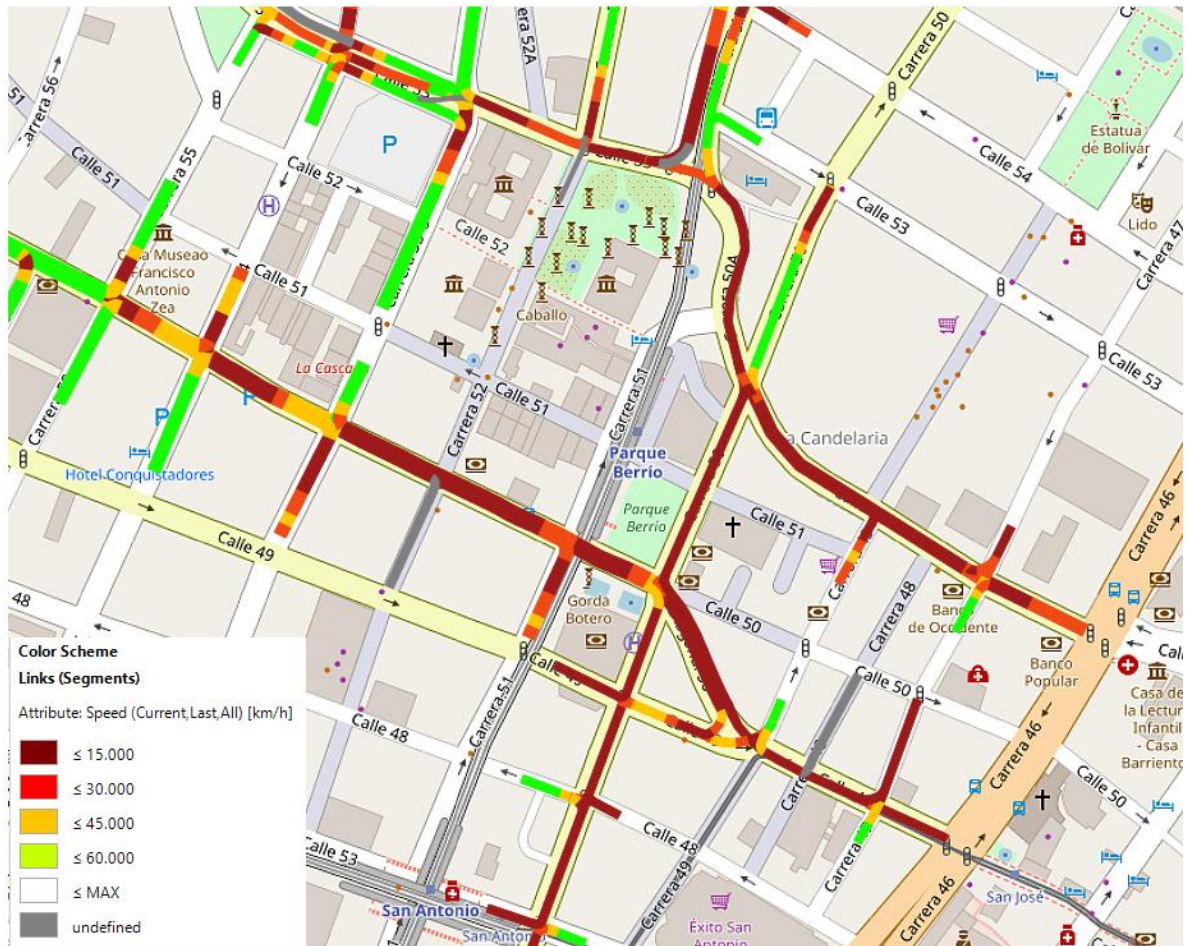
**Ilustración 20: Mapa de calor Google Maps**



Fuente: (Google Maps, 2019)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## Ilustración 21: Mapa de calor modelo



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los mapas de calor de la Ilustración 20 y 21 se evidencia que hay un comportamiento similar en ambos casos, lo que quiere decir que se cuenta con un modelo que representa de manera cercana la realidad de los tramos y corredores analizados, es importante resaltar que se analiza únicamente los corredores y no los tramos que desembocan en ellos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### 3.3 DETERMINAR LA TARIFA DE COBRO

#### 3.3.1 Obtener las variables a partir del modelo

Para obtener los resultados del modelo se definieron 5 trayectos diferentes, donde se realizan los recorridos posibles a lo largo de los 3 corredores evaluados, teniendo en cuenta los recorridos desde que entran al anillo de evaluación y salen de este por los corredores evaluados.

En la parte de calibración y de evaluación de los costos para los volúmenes variados, es importante decir que se corrió varias veces hasta encontrar la convergencia en los resultados, esto es importante ya que nos dice que estos son más confiables, esta convergencia se dio después de las 20 iteraciones.

A continuación, se presenta la notación utilizada para los tramos analizados en el modelo:

**Tabla 3. Descripción corredores**

| Tramo | Corredores              |
|-------|-------------------------|
| 14    | La playa -Av. Greiff    |
| 68    | Ayacucho - Av. Colombia |
| 104   | Palacé - Av. Greiff     |
| 108   | Palacé - Av. Colombia   |
| 1011  | Palacé - Bolívar        |

Las variables obtenidas del modelo para cada trayecto fueron las siguientes:

- Distancia (m)
- Tiempo de viaje (seg)
- Volumen (veh/h)
- Consumo de combustible (gal)
- Emisiones de NOx (gr)

Con el fin de construir la curva de costo individual y marginal la toma de datos se realizó variando el volumen de vehículos aforados desde un 5% a un 200% del mismo, para observar el comportamiento del costo generado tanto para autos particulares como para motos y con este poder encontrar la tarifa a partir de la curva de demanda. Donde se evidencio que entre el 10% y el 70% el costo se mantiene constantes, a partir del 70% se evidencia que es el punto donde comienza la congestión y por último a partir del 150% la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

curva deja de crecer lo cual indica que este es el punto donde comienza la saturación del sistema.

**Ilustración 22. Costo individual tamo 1-4.**



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2 Determinar los costos

- **Costos generados por el consumo de combustible**

Para realizar el cálculo del costo por el consumo de combustible mediante la fórmula en la metodología, es necesario conocer el valor de la gasolina por galón. La gasolina y el ACPM a nivel nacional pagan un impuesto de aproximadamente el 35% y 40% de su valor puesto al consumidor en una estación de servicio, dicho impuesto se divide en cuatro clases, las cuales son: el impuesto nacional a la gasolina y el ACPM; el impuesto al carbono; el IVA y la sobretasa (Portafolio, 2019). En la Ilustración 23: Precios de combustible en Colombia para octubre de 2019 se muestran los diferentes precios a nivel nacional de la gasolina para el mes de octubre, el cual fue comunicado por el Ministerio de Minas y Energía (La República, 2019). Ya que el caso de estudio es realizado en la ciudad de Medellín para el año 2019 en el mes de octubre el precio de la gasolina tomado para el desarrollo de la ecuación es de 9.673 \$/galón y de ACPM de 9.268 \$/galón.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### Ilustración 23: Precios de combustible en Colombia para octubre de 2019

| PRECIOS DE REFERENCIA POR CIUDADES            |                      |               |
|---|----------------------|---------------|
| Vigencia 7 de Octubre de 2019                 |                      |               |
|   | Gasolina MC (\$/gal) | ACPM (\$/gal) |
| Villavicencio                                 | 9.834                | 9.383         |
| Cali  | 9.748                | 9.367         |
| Bogotá  | 9.734                | 9.283         |
| Manizales                                     | 9.717                | 9.312         |
| Pereira                                       | 9.698                | 9.318         |
| Ibagué  | 9.674                | 9.263         |
| Medellín                                      | 9.673                | 9.268         |
| Montería                                      | 9.658                | 9.225         |
| Bucaramanga                                   | 9.533                | 9.061         |
| Barranquilla                                  | 9.443                | 9.009         |
| Cartagena                                     | 9.408                | 8.975         |
| Cúcuta  | 7.400                | 6.577         |
| Pasto   | 7.374                | 7.380         |
| *Promedio Precio -<br>13 Ciudades Principales | 9.300                | 8.879         |

Fuente: (La República, 2019)

- **Rendimiento camión**

Aunque hay muchos factores que se deben tener en cuenta, por ejemplo, el tipo de motor, las dimensiones del camión y su antigüedad, la carga transportada y la conducción del camión, se puede conocer el valor aproximado en el que se encuentra este tipo de vehículo. Para este caso tomamos el estudio realizado por el Ministerio de Transporte en el cual se encuentran los indicadores de costo de operación para el año 2006 de los vehículos de carga. Los datos para dicho estudio fueron recolectados en Barranquilla, Bogotá, Bucaramanga, Cali, Duitama, Ibagué, Medellín y Pasto, ya que son ciudades consideradas como centros de carga. Para obtener un resultado más preciso se contó con la colaboración de las Direcciones Territoriales del Ministerio, así como de los distribuidores de repuestos, talleres de mantenimiento y estaciones de servicio (Ministerio de Transporte, 2006).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Tabla 4. Indicadores de costo de operación 2004-2006.**

| COMPONENTES DE COSTOS           | 2                   |                     |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
|                                 | 2.004               | 2.006               |
| Consumo de combustibles         |                     |                     |
| Plano                           | 408,34              | 512,78              |
| Ondulado                        | 579,09              | 727,22              |
| Montañoso                       | 843,53              | 1.059,29            |
| Consumo de llantas              | 157,06              | 159,94              |
| Consumo de lubricantes          | 39,91               | 39,67               |
| Consumo de filtros              | 14,14               | 10,96               |
| Mantenimiento y reparaciones    | 212,54              | 230,23              |
| Lavado y engrase                | 19,27               | 27,98               |
| Imprevistos                     | 33,22               | 35,16               |
| <b>COSTOS VARIABLES KM</b>      | <b>476,14</b>       | <b>503,94</b>       |
| Seguros                         | 699.014,19          | 841.542,02          |
| Salarios y prestaciones básicas | 1.102.405,06        | 1.256.372,25        |
| Parqueadero                     | 89.318,10           | 98.400,00           |
| Impuestos de rodamiento         | 12.259,85           | 12.259,85           |
| Recuperación de capital         | 952.813,87          | 985.445,16          |
| <b>COSTOS FIJOS MES</b>         | <b>2.855.811,08</b> | <b>3.194.019,28</b> |

Fuente:(Ministerio de Transporte, 2006)

Teniendo en cuenta que el precio del ACPM es actualmente de 9.268 \$/galón y que para el 2019 teniendo en cuenta la inflación del 2004 al 2019 el consumo de combustible en terreno plano es de 966.69 \$/km, a partir de esos datos se calcula una tasa de rendimiento de 10.065 km/galón.

- **Rendimiento moto**

Según Noya (2015) el consumo de combustible por cada 100 km para una moto tipo Honda PCX 125i es de 2.48 litros, el cual fue obtenido mediante página web Spiritmonitor, ya que es una plataforma que reúne datos de usuarios reales. Realizando las conversiones necesarias se obtiene que el rendimiento en km por galón es de 151.1 km/galón.

- **Rendimiento carro y taxi**

El rendimiento promedio de un vehículo a gasolina en la ciudad es de 70 km/galón (Revista Turbo, 2018).

- **Rendimiento Bus**

La mayoría de este tipo utiliza combustible Diesel. Su rendimiento varía dependiendo el tipo de motor, forma de conducción, estado del motor, tipo de ruta, entre otros.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Según Álvarez y Calle (2014) el consumo de combustible se realiza basándose en los registros de la compañía LANCOMTRI S.A. al cual se le hizo un seguimiento de 7 a 14 días se obtuvieron los siguientes resultados:

**Ilustración 24: Consumo de combustible buses**

| MARCA         | MEDIA DE CONSUMO DIARIO (gal) | % DE UNIDADES | MEDIA PONDERADA DE CONSUMO DIARIO (gal) |
|---------------|-------------------------------|---------------|---|
| CHEVROLET     | 27,73                         | 44,47         | 26,86                                   |
| MERCEDES BENZ | 26,08                         | 52,53         |   |

Fuente: (Álvarez & Calle, 2014)

Teniendo en cuenta que el kilometraje recorrido es de 210.625 km diarios (Álvarez & Calle, 2014) y la media ponderada de consumo diario es de 26.86 galones se obtiene un rendimiento de 7.84 km/galón.

Por último, se muestra un resumen de los rendimientos utilizados.

**Tabla 5: Resumen rendimientos de combustible**

| Medio de transporte | Rendimiento combustible km/galón |
|---------------------|----------------------------------|
| Carro               | 70                               |
| Moto                | 151.51                           |
| Taxi                | 70                               |
| Bus                 | 7.84                             |
| Bicicleta           | 0                                |
| Camión              | 10.81                            |

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la información de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Y el precio de la gasolina y ACPM se procedió a calcular el costo para cada modo, cuyos resultados se encuentran en el Anexo D, a continuación, se muestra el procedimiento general realizado para la obtención de dichos resultados.

- **Costo generado por consumo de combustible para carros**

$$C_{g-carro} = P_g * C_m$$

Donde,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$C_{g-carro}$ : Costo generado por consumo de combustible para carros (\$)

$P_g$ : Valor gasolina (\$9,673 COP) (\$/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

- **Costo generado por consumo de combustible para motos**

Ya que el modelo arroja un consumo de combustible por vehículo (liviano) y no para cada los diferentes, se realiza una relación para conocer el verdadero valor de este costo.

$$C_{g-moto} = P_g * C_m * \frac{R_{carro}}{R_{moto}}$$

Donde;

$C_{g-moto}$ : Costo generado por consumo de combustible para motos (\$)

$P_g$ : Valor gasolina (\$9,673 COP/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{moto}$ : Rendimiento de combustible moto (151.51 km/gal)

- **Costo generado por consumo de combustible para taxis**

$$C_{g-taxi} = P_g * C_m * \frac{R_{carro}}{R_{taxi}}$$

Donde;

$C_{g-taxi}$ : Costo generado por consumo de combustible para taxis (\$)

$P_g$ : Valor gasolina (\$9,673 COP/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{taxi}$ : Rendimiento de combustible taxi (70 km/gal)

- **Costo generado por consumo de combustible para buses**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$C_{g-buses} = P_{ACPM} * C_m * \frac{R_{carro}}{R_{buses}}$$

Donde;

$C_{g-Bus}$ : Costo generado por consumo de combustible para buses (\$)

$P_{ACPM}$ : Valor ACPM (\$9,268 COP/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo(gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{bus}$ : Rendimiento de combustible bus (7.84 km/gal)

- **Costo generado por consumo de combustible para Camiones**

$$C_{g-camiones} = P_{ACPM} * C_m * \frac{R_{carro}}{R_{camión}}$$

Donde;

$C_{g-camiones}$ : Costo generado por consumo de combustible para camiones (\$)

$P_{ACPM}$ : Valor ACPM (\$9,268 COP/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{camión}$ : Rendimiento de combustible camión (10.065 km/gal)

- **Costos relacionados con el consumo de lubricante**

El costo relacionado con el consumo de lubricante para los vehículos fue determinado según la metodología implementada por Pablo Emilio Muñoz en su trabajo de determinar los sobrecostos por congestión vehicular en la ciudad de Bogotá (2014). Según este se relaciona el consumo de lubricantes con el consumo de combustible de los vehículos como un porcentaje correspondiente a 1.4%. A partir de este se podría determinar el consumo para los automóviles. Para los demás vehículos se relaciona con el rendimiento de estos y el de los autos, de la misma manera en la que se implementó para determinar el consumo de combustible (Muñoz Puentes, 2014).

- **Costo generado por consumo de lubricante para carros**

$$C_{l-carro} = P_l \times C_m \times 1.4\%$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Donde,

$C_{l-carro}$ : Costo generado por consumo de lubricante para carros (\$)

$P_l$ : Valor lubricante (62.000 \$/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

- **Costo generado por consumo de lubricante para motos**

Ya que el modelo arroja un consumo de combustible por vehículo (liviano) y no para cada los diferentes, se realiza una relación para conocer el verdadero valor de este costo.

$$C_{l-carro} = P_l \times C_m \times 1.4\% \times \frac{R_{carro}}{R_{moto}}$$

Donde;

$C_{l-moto}$ : Costo generado por consumo de lubricante para motos (\$)

$P_l$ : Valor lubricante (62.000 \$/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{moto}$ : Rendimiento de combustible moto (151.51 km/gal)

- **Costo generado por consumo de lubricante para taxis**

$$C_{l-carro} = P_l \times C_m \times 1.4\% \times \frac{R_{carro}}{R_{taxi}}$$

Donde;

$C_{l-taxi}$ : Costo generado por consumo de lubricante para taxis (\$)

$P_l$ : Valor lubricante (62.000 \$/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{taxi}$ : Rendimiento de combustible taxi (70 km/gal)

- **Costo generado por consumo de lubricante para buses**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$C_{l-carro} = P_l \times C_m \times 1.4\% \times \frac{R_{carro}}{R_{bus}}$$

Donde;

$C_{l-Bus}$ : Costo generado por consumo de lubricante para buses (\$)

$P_l$ : Valor lubricante (62.000 \$/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo(gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{bus}$ : Rendimiento de combustible bus (7.84 km/gal)

- **Costo generado por consumo de lubricante para Camiones**

$$C_{l-carro} = P_l \times C_m \times 1.4\% \times \frac{R_{carro}}{R_{camión}}$$

Donde;

$C_{l-camiones}$ : Costo generado por consumo de lubricante para camiones (\$)

$P_l$ : Valor lubricante (62.000 \$/gal)

$C_m$ : Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{camiones}$ : Rendimiento de combustible camiones (10.065 km/gal)

- **Costos relacionados con la pérdida de tiempo**

Para estimar el costo relacionado con la pérdida de tiempo se consultaron variables que posteriormente serán utilizadas dentro del modelo matemático. Dichas variables fueron la tasa de ocupación promedio por tipo de vehículo y el valor subjetivo del tiempo.

Para este último fue necesario conocer el valor subjetivo del tiempo por motivo de viaje, el cual fue calculado por Gleave (2009) para el Túnel Aburrá – Oriente a través de encuestas de preferencia declaradas, cuyos resultados se muestran en la Tabla 6. Valor subjetivo del tiempo por motivo de viaje.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

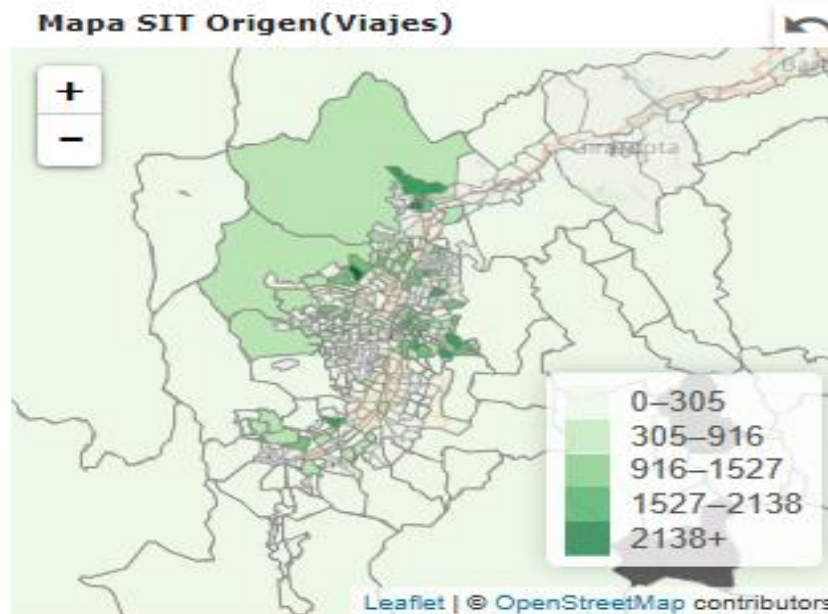
**Tabla 6. Valor subjetivo del tiempo por motivo de viaje**

| Destino    | Valor del tiempo (\$/min) |
|------------|---------------------------|
| Hogar      | 499.35                    |
| Trabajo    | 276.41                    |
| Recreación | 208.70                    |
| Otros      | 499.35                    |

**NOTA:** Es importante resaltar que se toman estas categorías para los valores subjetivos del tiempo, las cuales son analizadas para el túnel de oriente, ya que al no encontrar esta información para el centro de la ciudad se procedió a analizarlo con los datos mencionados anteriormente.

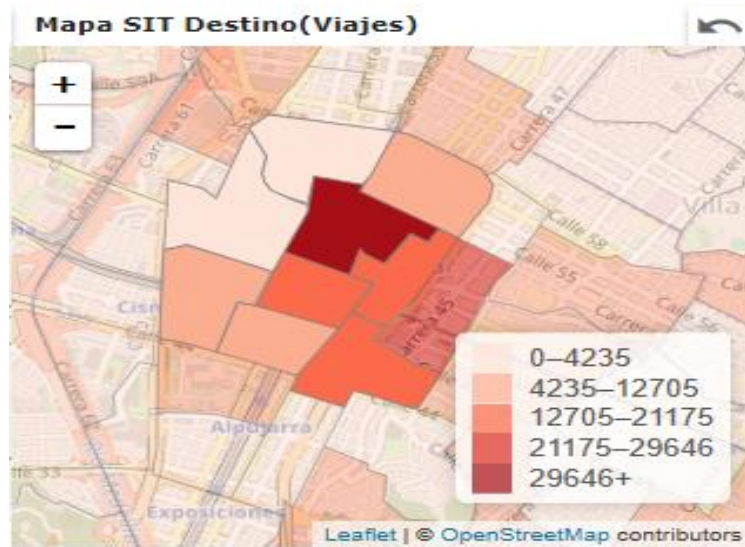
Para determinar el porcentaje por motivo de viaje, fue necesario consultar la encuesta de origen – destino realizada por el Área Metropolitana del Valle de Aburra (2017), en la cual se analizan los viajes realizados. Para este proyecto fue importante seleccionar como punto de origen diferentes zonas de la ciudad, las cuales se pueden ver en la Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017) y como destino la zona que se está analizando en este proyecto, demarcado por la Avenida Oriental, Avenida Echeverry (calle 58), Avenida Ferrocarril y Calle San Juan, su mapa se muestra en la Ilustración 26.

**Ilustración 25: Mapa SIT Origen (Viajes)**



Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017)

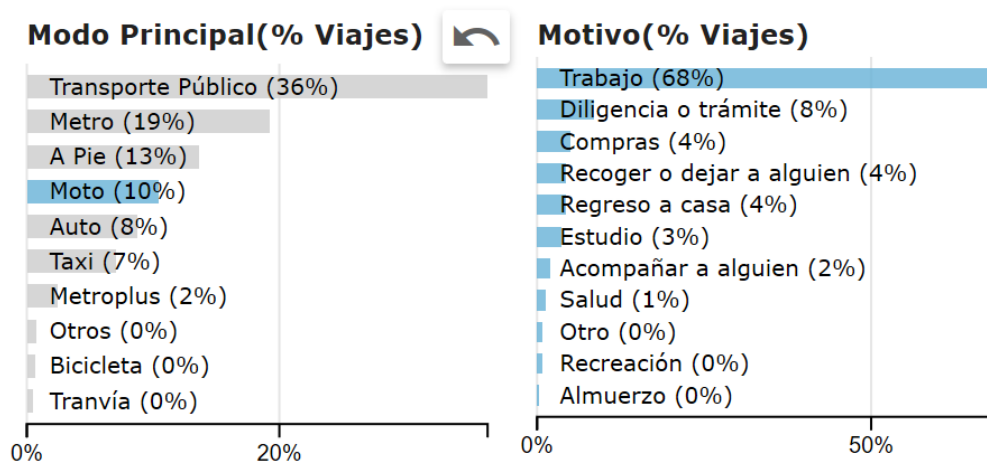
## Ilustración 26: Mapa SIT Destino (Viajes)



Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017)

Los resultados para cada modo de dicho análisis se muestran en las ilustraciones 27, Ilustración 28. Porcentaje por motivo de viaje para auto, Ilustración 29. Porcentaje por motivo de viaje para taxi y Ilustración 30. Porcentaje por motivo de viaje para bus Ilustración 27: Porcentaje por motivo de viaje para moto. Estos motivos de viaje se deben agrupar en solo cuatro grupos que son: Hogar, trabajo, recreación y otro, para así poder relacionarlos con los costos mencionados anteriormente. En el grupo hogar solo incluye el porcentaje de regreso a casa, para trabajo se realiza una suma del porcentaje cuyo motivo es el trabajo, para recreación solo se tienen en cuenta por recreación, compras y acompañar a alguien y por último los restantes se agrupan en otros los cuales se muestran en las tablas Tabla 7. Porcentaje viajes por motivo de viaje para moto. ,Tabla 8. Porcentaje viajes por motivo de viaje para auto. ,Tabla 9. Porcentaje viajes por motivo de viaje para taxi. y Tabla 10. Porcentaje viajes por motivo de viaje para bus. .

**Ilustración 27: Porcentaje por motivo de viaje para moto.**



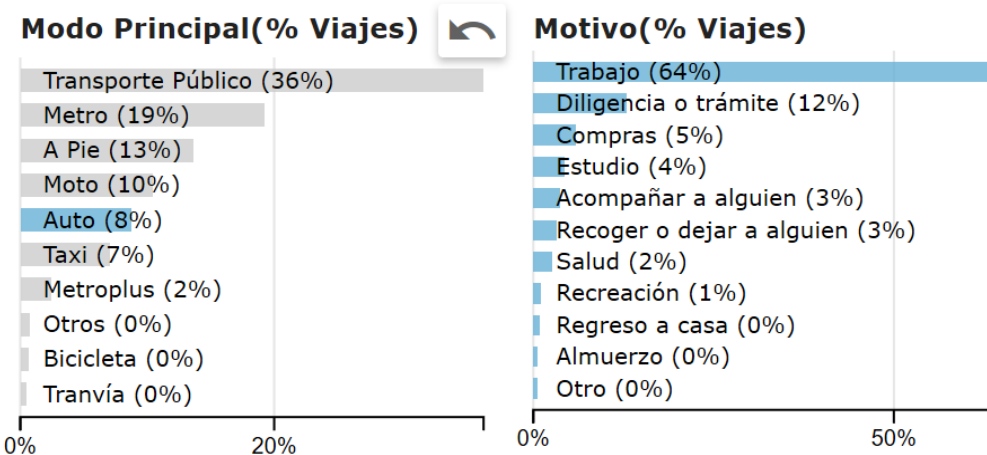
Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017)

**Tabla 7. Porcentaje viajes por motivo de viaje para moto.**

| Motivo         | Porcentaje |
|----------------|------------|
| Trabajo        | 68.00%     |
| Recreación     | 6.00%      |
| Regreso a casa | 4%         |
| Otro           | 22%        |

Fuente: Elaboración propia

**Ilustración 28. Porcentaje por motivo de viaje para auto**



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



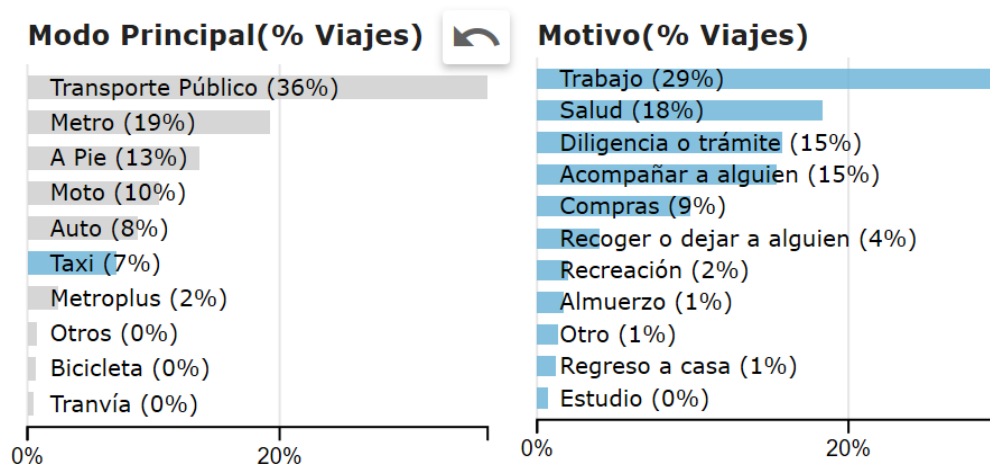
Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017)

**Tabla 8. Porcentaje viajes por motivo de viaje para auto.**

| Motivo         | Porcentaje |
|----------------|------------|
| Trabajo        | 64%        |
| Recreación     | 9%         |
| Regreso a casa | 0%         |
| Otro           | 27%        |

Fuente: Elaboración propia

**Ilustración 29. Porcentaje por motivo de viaje para taxi**



Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017)

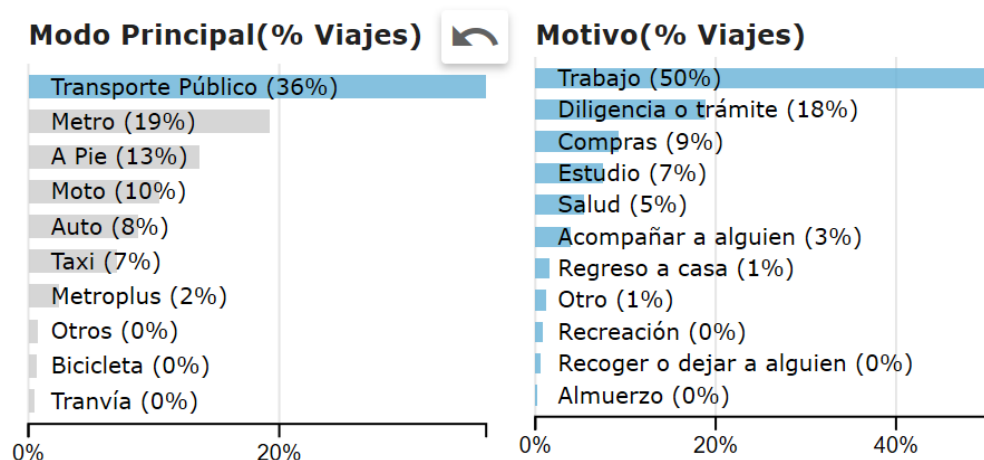
**Tabla 9. Porcentaje viajes por motivo de viaje para taxi.**

| Motivo         | Porcentaje |
|----------------|------------|
| Trabajo        | 29%        |
| Recreación     | 26%        |
| Regreso a casa | 1%         |
| Otro           | 44%        |

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### Ilustración 30. Porcentaje por motivo de viaje para bus



Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2017)

Tabla 10. Porcentaje viajes por motivo de viaje para bus.

| Motivo         | Porcentaje |
|----------------|------------|
| Trabajo        | 50%        |
| Recreación     | 12%        |
| Regreso a casa | 1%         |
| Otro           | 37%        |

Fuente: Elaboración propia

Ya con todos los datos se procede a calcular el costo promedio por minuto de viaje para taxis, carros, motos y buses. Para camiones se tomó el valor propuesto por Muñoz (2014) obteniendo los valores mostrados en la Tabla 11. Valor del tiempo por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Valor del tiempo por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia

| Modo | Valor del tiempo (\$/min) |
|------|---------------------------|
| Moto | 474                       |
| Auto | 479                       |
| Taxi | 438                       |
| Bus  | 470                       |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

|          |       |
|----------|-------|
| Camiones | 1,000 |
|----------|-------|

Por otro lado, cuando se habla de tasa de ocupación promedio por tipo de vehículo se refiere a la cantidad de personas promedio que viajan en cada uno de los mismos, con el fin de tener una aproximación de la totalidad de las personas transportadas en la hora de modelación, en el área de influencia (Muñoz Puentes, 2014).

Para el estudio es necesario conocer el valor de la tasa de ocupación tanto para el transporte vehicular como para el público. Para conocer dichos valores se analizaron diferentes fuentes para así obtener los valores más aproximados posibles.

Para la tasa promedio de ocupación para los vehículos particulares (carros) se tomó la calculada por Muñoz (2014) según la información proveída por la SDM (Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá), cuyos resultados se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y corresponde a 1.53 personas/vehículo

**Ilustración 31: Tasa de ocupación vehículo particular.**

| ESTACIÓN MAESTRA   | OCUPACIÓN VEHICULO PARTICULAR |       |       |       |      |      | PROMEDIOS |
|--------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|------|------|-----------|
|                    | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5    | 6    |           |
| AC 68 S X<br>AK 41 | 7477                          | 6098  | 1646  | 661   | 276  | 149  | 16307     |
|                    | 46%                           | 37%   | 10%   | 4%    | 2%   | 1%   | 100%      |
|                    | 7477                          | 12196 | 4938  | 2644  | 1380 | 894  | 29529     |
|                    |                               |       |       |       |      |      | 1,81      |
| AK 45 X AC<br>127  | 83949                         | 36576 | 8228  | 3156  | 745  | 257  | 132911    |
|                    | 63%                           | 28%   | 6%    | 2%    | 1%   | 0%   | 100%      |
|                    | 83949                         | 73152 | 24684 | 12624 | 3725 | 1542 | 199676    |
|                    |                               |       |       |       |      |      | 1,50      |
| AC 45 S X<br>AK 68 | 11834                         | 448   | 1948  | 578   | 175  |      | 14983     |
|                    | 79%                           | 0%    | 1%    | 0%    | 0%   | 0%   | 81%       |
|                    | 11834                         | 896   | 5844  | 2312  | 875  | 0    | 21761     |
|                    |                               |       |       |       |      |      | 1,45      |
|                    |                               |       |       |       |      |      | 1,53      |

Fuente: (Muñoz Puentes, 2014)

Para la estimación de la tasa de ocupación para buses se utiliza la calculada por Arcila y Betancur (2019), la cual se calculo a partir del “Estudio de Movilización de Pasajeros en

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Rutas Urbanas de la Ciudad Mediante Aforos de Registradoras” realizado por el Consorcio SYM (2013) para la Secretaría de Movilidad de Medellín, en el cual se presentaban los pasajeros por empresa en un día ordinario promedio y el número de despachos. A partir de esa información se procedió a dividir pasajeros diarios sobre el número de despachos para conseguir el número promedio de pasajeros por despacho. Obteniendo finalmente una tasa promedio de 28.46 personas/vehículo.

**Tabla 12: Movilización y despacho de buses por empresa**

| Empresa                          | Movilización de pasajeros por empresa en un día ordinario promedio | Despachos por empresa en un día ordinario promedio. | Pasajeros por Despacho |
|----------------------------------|--|---|------------------------|
| AUTOBUSES EL POBLADO LAURELES SA | 98472  | 2310  | 42.63                  |
| AUTOCOL                          | 164  | 17  | 9.65                   |
| COINVETRANS                      | 6445   | 221   | 29.16                  |
| COMBUSES                         | 50578  | 1371  | 36.89                  |
| CONALTRACOOP                     | 1836   | 101   | 18.18                  |
| CONDUCCIONES AMERICA             | 46646  | 1590  | 29.34                  |
| CONDUCCIONES PALENQUE ROBLDAL    | 47890  | 1339  | 35.77                  |
| COOMETROPOL LTDA                 | 6039   | 243   | 24.85                  |
| COONATRA LTDA                    | 106312   | 2519  | 42.20                  |
| COOPCERQUIN                      | 188  | 22  | 8.55                   |
| COOPETRANSA LTDA                 | 24618  | 815   | 30.21                  |
| COOPTRANSNOR                     | 242  | 24  | 10.08                  |
| COOTRABEL                        | 35665  | 828   | 43.07                  |
| COOTRAGRANIZAL                   | 173  | 16  | 10.81                  |
| COOTRAMO                         | 2910   | 105   | 27.71                  |
| COOTRANSBLAN                     | 1221   | 50  | 24.42                  |
| COOTRANSCATALUNA                 | 222  | 30  | 7.40                   |
| COOTRANSMALLAT                   | 281  | 33  | 8.52                   |
| COOTRANSPINAL                    | 375  | 31  | 12.10                  |
| COOTRANSVI                       | 6032   | 159   | 37.94                  |
| COOTRASANA                       | 31087  | 533   | 58.32                  |
| COPATRA LTDA                     | 38501  | 1187  | 32.44                  |
| COTRANSMON                       | 6420   | 152   | 42.24                  |
| EXPRESO CAMPO VALDES             | 5696   | 262   | 21.74                  |
| FLOTA LA ""V"" SCA""             | 27027  | 1068  | 25.31                  |
| FLOTA LA MILAGROSA               | 16716  | 636   | 26.28                  |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

|  |       |      |       |
|--|-------|------|-------|
| FLOTA NUEVA VILLA                              | 13611 | 460  | 29.59 |
| INVETRANS                                      | 317   | 11   | 28.82 |
| RAPIDO SAN CRISTOBAL                           | 4567  | 147  | 31.07 |
| SANTRA   | 24967 | 712  | 35.07 |
| TAX MAYA SA                                    | 821   | 25   | 32.84 |
| TRANSCONOR                                     | 306   | 20   | 15.30 |
| TRANSPORTES ARANJUEZ<br>SANTA CRUZ SA          | 35989 | 953  | 37.76 |
| TRANSPORTES CASTILLA                           | 11279 | 391  | 28.85 |
| TRANSPORTES LA<br>MAYORITARIA GUAYABAL<br>LTDA | 26347 | 765  | 34.44 |
| TRANSPORTES MEDELLIN                           | 94993 | 2361 | 40.23 |
| TRASANCOOP                                     | 6111  | 141  | 43.34 |
| <b>Promedio</b>                                |       |      | 28.46 |

Fuente: (Arcila & Betancur, 2019)

Por último, para taxis se tomó la utilizada en el estudio de la Revista Tránsito y Territorio (2016), en el cual tomaron la información de estudios de movilidad hechos en años anteriores en las ciudades de Medellín y Bogotá e información oficial del Metro. Dónde la tasa de ocupación para taxis es de 1.68 personas/vehículo y para motos es 1.24 personas /vehículo.

Para las bicicletas se asumió una tasa de ocupación de 1 pasajero/vehículo y camiones se asumió una tasa de ocupación de 1.5 pasajero/vehículo. Finalmente, se obtienen las siguientes tasas de ocupación para cada modo:

**Tabla 13: Tasa de ocupación por modo**

| Modo             | Tasa de ocupación |
|------------------|-------------------|
|                  | Pasajero/vehículo |
| <b>Moto</b>      | 1.24              |
| <b>Carro</b>     | 1.53              |
| <b>Taxi</b>      | 1.68              |
| <b>Bus</b>       | 28.46             |
| <b>Camión</b>    | 1.50              |
| <b>Bicicleta</b> | 1                 |

Fuente: Elaboración propia

Por último, la última variable, tiempo de viaje promedio (seg) es arrojada por la modelación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Costo total tiempo para carros**

$$C_{t \text{ carro}} = (V_{t \text{ carro}} \times T_{o \text{ carro}} \times T_r) / 60$$

Donde;

$C_{t \text{ carro}}$ : Costo total del tiempo para carros

$V_{t \text{ carros}}$ : Valor tiempo para carros (474 \$/ (min x persona))

$T_{o \text{ carro}}$ : Tasa de ocupación carro (1.53 personas)

$T_r$ : Tiempo recorrido modelo (seg)

- **Costo total tiempo para moto**

$$C_{t \text{ moto}} = (V_{t \text{ moto}} \times T_{o \text{ moto}} \times T_r) / 60$$

Donde;

$C_{t \text{ moto}}$ : Costo total del tiempo para motos

$V_{t \text{ moto}}$ : Valor tiempo para motos (479 \$/ (min x persona))

$T_{o \text{ moto}}$ : Tasa de ocupación moto (1.24 personas)

$T_r$ : Tiempo recorrido modelo (seg)

- **Costo total tiempo para taxi**

$$C_t = (V_{t \text{ taxi}} \times T_{o \text{ taxi}} \times T_r) / 60$$

Donde;

$C_{t \text{ taxi}}$ : Costo total del tiempo para taxi

$V_{t \text{ taxi}}$ : Valor tiempo para taxi (438 \$/ (min x persona))

$T_{o \text{ taxi}}$ : Tasa de ocupación taxi (1.68 personas)

$T_r$ : Tiempo recorrido modelo (seg)

- **Costo total tiempo para bus**

$$C_t = (V_{t \text{ bus}} \times T_{o \text{ bus}} \times T_r) / 60$$

Donde;

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$C_{t\text{ bus}}$ : Costo total del tiempo para bus

$V_{t\text{ bus}}$ : Valor tiempo para bus (470 \$/ (min x persona))

$T_{o\text{ bus}}$ : Tasa de ocupación bus (28.46 personas)

$T_r$ : Tiempo recorrido modelo (seg)

- **Costo total tiempo para camión**

$$C_{t\text{ camión}} = (V_{t\text{ camión}} \times T_{o\text{ camión}} \times T_r) / 60$$

Donde;

$C_{t\text{ camión}}$ : Costo total del tiempo para camión

$V_{t\text{ camión}}$ : Valor tiempo para bus (1000 \$/ (min x persona))

$T_{o\text{ camión}}$ : Tasa de ocupación camión (1 persona)

$T_r$ : Tiempo recorrido modelo (seg)

- **Costos generados por la contaminación**

Para estimar el costo relacionado a la contaminación se debe conocer el valor de carbono por cada galón de gasolina, el cual posteriormente será utilizada dentro del modelo matemático. Como se mencionó anteriormente la gasolina en Colombia paga unos impuestos, uno de ellos es el impuesto al carbono, el cual consiste en el pago de una tarifa que está relacionada con la producción de carbono, elemento químico presente en los combustibles fósiles que es liberado en forma de gases efecto invernadero a la atmósfera cuando estos son quemados. En palabras más simples, es un pago que se debe realizar por contaminar el ambiente con los gases provenientes de la combustión de gasolina, ACPM, kerosene, Jet Fuel, Fuel Oil y Gas Natural (Semana Sostenible, 2017).

Este impuesto fue introducido al sistema tributario nacional en la reforma del 2016, para el año 2019 la tarifa general por tonelada de CO<sub>2</sub> es \$16.422. De este modo, cada combustible tiene un aspecto diferente, por ejemplo, el impuesto del gas natural sería de \$32 por metro cúbico. Los demás combustibles que les aplica este gravamen se miden por galón, por lo cual su precio respectivo quedaría así: gas licuado de petróleo (\$104), gasolina (\$148), keroseno y Fet Fuel (\$162), ACPM (\$166) y Fuel Oil (\$194) (Portafolio, 2019).

De acuerdo con esta información, el valor que se a utilizar para cuantificar el valor generada por la contaminación para motos, carros y taxis sería \$148 COP y para buses y camiones ese valor es de \$166 COP.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Costo por contaminación para carro**

$$C_{c-carro} = C_a C_m + C_{NOx} E_{NOx}$$

$C_{c-carro}$  = Costo de la contaminación en un periodo de congestión para carro (\$)

$C_a$  = Costo de CO (\$ 148 /gal)

$C_m$  = Consumo combustible arrojada por el modelo (gal)

$C_{NOx}$  = Costo de NOx (25.79 \$/gr)

$E_{NOx}$  = Emisiones de NOx

- **Costo por contaminación para moto**

$$C_{c-cami3n} = (C_a \times C_m + C_{NOx} \times E_{NOx}) \times \frac{R_{carro}}{R_{moto}}$$

$C_{c. moto}$  = Costo de la contaminación en un periodo de congestión para moto (\$)

$C_a$  = Costo de la contaminación (\$ 148 /gal)

$C_m$  = Consumo combustible arrojada por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{moto}$ : Rendimiento de combustible moto (151.51 km/gal)

$C_{NOx}$  = Costo de NOx (25.79 \$/gr)

$E_{NOx}$  = Emisiones de NOx

- **Costo por contaminación para taxi**

$$C_{c-cami3n} = (C_a \times C_m + C_{NOx} \times E_{NOx}) \times \frac{R_{carro}}{R_{taxi}}$$

$C_{c-taxi}$  = Costo de la contaminación en un periodo de congestión para taxi (\$)

$C_a$  = Costo de la contaminación (\$ 148 /gal)

$C_m$  = Consumo combustible arrojado por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{taxi}$ : Rendimiento de combustible moto (70 km/gal)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



$C_{NOx}$  = Costo de NOx (25.79 \$/gr)

$E_{NOx}$  = Emisiones de NOx

- **Costo por contaminación para Bus**

$$C_{c-bus} = (C_a \times C_m + C_{NOx} \times E_{NOx}) \times \frac{R_{carro}}{R_{bus}}$$

$C_{c-bus}$  = Costo de la contaminación en un periodo de congestión para bus (\$)

$C_a$  = Costo de la contaminación (\$ 166 /gal)

$C_m$  = Consumo combustible arrojada por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{bus}$ : Rendimiento de combustible moto (7.84 km/gal)

$C_{NOx}$  = Costo de NOx (25.79 \$/gr)

$E_{NOx}$  = Emisiones de NOx

- **Costo por contaminación para camión**

$$C_{c-camión} = (C_a \times C_m + C_{NOx} \times E_{NOx}) \times \frac{R_{carro}}{R_{camión}}$$

$C_{c-camión}$  = Costo de la contaminación en un periodo de congestión para camión (\$)

$C_a$  = Costo de la contaminación (\$ 166 /gal)

$C_m$  = Consumo combustible arrojada por el modelo (gal)

$R_{carro}$ : Rendimiento de combustible carro (70 km/gal)

$R_{bus}$ : Rendimiento de combustible moto (10.81 km/gal)

$C_{NOx}$  = Costo de NOx (25.79 \$/gr)

$E_{NOx}$  = Emisiones de NOx

### 3.3.3 Construir las curvas de costo individual y marginal

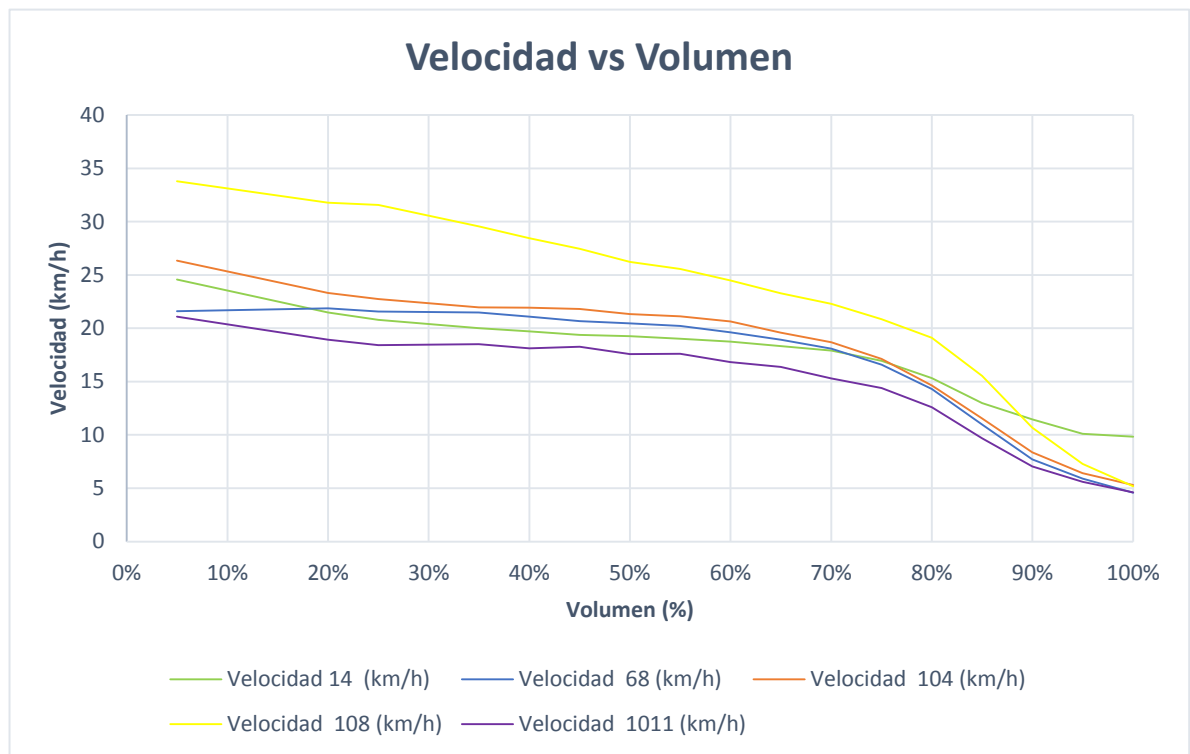
Para construir las gráficas es necesario variar el modelo con diferente volumen para conocer los costos dependiendo el volumen que se encuentre en los corredores. Para verificar que el modelo se encuentra funcionando de manera adecuada a lo largo de las

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

variaciones se realizó la siguiente gráfica, la cual muestra que a menor volumen mayor velocidad.

La base para conocer el volumen en diferentes porcentajes es el volumen aforado en la hora de máxima de manda, el cual sería para este caso el 100%.

**Ilustración 32: Velocidad vs Volumen para cada tramo**



Fuente: Elaboración propia

Para construir las gráficas es necesario conocer los valores de costo individual y marginal para cada modo así la tarifa solo se vaya a implementar a carros y motos, ya que estos afectan los valores de costo marginal para ambos modos. Es por esto por lo que a continuación se explican los cálculos realizados para cada modo.

- **Costo individual taxi, camión y bus**

A pesar de que a estos tres modos no se les realizara análisis para el cobro de tarifa, es necesario conocer su valor, para así internalizarle a los usuarios de vehículo privado el exceso de costo que le generan al transporte público. Y se calculan como se muestra a continuación:

$$\text{Costo individual} = C_{tk} + C_{gk} + C_{lk}$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$C_{tk}$ : Costo por el tiempo de viaje para el modo k (\$)

$C_{gk}$ : Costo por el consumo de combustible para el modo k (\$)

$C_{lk}$ : Costo por consumo de lubricante para el modo k (\$)

- **Costo marginal taxi, camión y bus**

$$\text{Costo marginal} = C_{tk} + C_{gk} + C_{lk}$$

$C_{tk}$ : Costo por el tiempo de viaje para el modo k (\$)

$C_{gk}$ : Costo por el consumo de combustible para el modo k (\$)

$C_{lk}$ : Costo por consumo de lubricante para el modo k (\$)

$$\text{Costo marginal, taxi, camión y bus} = \sum_{k=1}^{k=3} C_{tk} + C_{gk} + C_{lk}$$

- **Costo individual moto**

Para conocer este valor fue necesario calcular los costos por consumo de combustible, de lubricante y por el tiempo de viaje. Ya que el costo individual se calcula como la suma de estos.

$$\text{Costo individual}_{\text{moto}} = C_{t \text{ moto}} + C_{g \text{ moto}} + C_{l \text{ moto}}$$

$C_{tk}$ : Costo por el tiempo de viaje moto (\$)

$C_{gk}$ : Costo por el consumo de combustible para moto (\$)

$C_{lk}$ : Costo por consumo de lubricante moto (\$)

- **Costo marginal**

Este costo incluye el costo individual encontrado para cada modo, el costo por contaminación tanto de CO como de NOx, y el costo marginal de los vehículos que no se les cobra la tarifa, es decir, la suma de los costos de los buses, taxis y camiones. Cabe resaltar que para este último se realizó una distribución según la cantidad de vehículos, teniendo en cuenta que las motos son equivalentes a 0.5 carros.

Según lo anterior es posible afirmar que el incremento del costo marginal será mayor para las motos que para los autos, ya que el volumen de estas es mucho mayor.

Adicionalmente para calcular el costo marginal de las motos y carros es necesario conocer el valor al que circula el transporte público, para así obtener únicamente el exceso que se genera por la circulación de los vehículos particulares.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$VTP = \sum_{i=0\%}^{i=40\%} \text{Costo marginal, taxi, camión y bus}$$

Donde;

VTP: Valor de circulación a flujo libre del transporte público.

Para conocer este valor es necesario analizar adecuadamente cuando los vehículos presentes en el modelo dejan de andar a flujo libre, en este caso fue en promedio en el 45% aproximadamente (ver ilustración 35). Por lo tanto, a partir de este punto se le debe comenzar a sumar el porcentaje del costo de otros vehículos que les corresponde a las motos o carros.

### Ilustración 33: Curva de costo individual y marginal



Fuente: Elaboración propia

#### ○ Costo marginal moto

$$\%_{Motos} = \frac{V_{Motos}}{V_{Carros} + (V_{Motos}/2)}$$

$\%_{Motos}$ : Porcentaje del costo de otros vehículos que le corresponde a las motos

$V_{Motos}$ : Volumen de motos

$V_{Carros}$ : Volumen de carros

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para porcentaje menores a 45% el costo marginal es:

$$C_{marginal\ motos} = C_{individual\ moto} + C_{c\ moto}$$

Donde;

$C_{c\ moto}$ : Costo contaminación moto (\$)

Para porcentaje mayores a 45% el costo marginal es:

$$C_{marginal\ motos} = C_{individual\ moto} + C_{c\ moto} + \%Motos[(C_{marginal\ taxi,camión\ y\ bus})] - VTP]$$

Donde;

$C_{c\ moto}$ : Costo contaminación moto (\$)

% Motos: Porcentaje del costo de otros vehículos que le corresponde a las motos

$C_{marginal\ taxi, camión\ y\ bus}$ : Sumatoria del costo marginal de taxi, camión y bus (\$)

- **Costo individual carro**

Para conocer este valor fue necesario calcular los costos por consumo de combustible, de lubricante y por el tiempo perdido. Ya que el costo individual se calcula como la suma de estos.

$$\text{Costo individual}_{carro} = C_{t\ carro} + C_{g\ carro} + C_{l\ carro}$$

$C_{tk}$ : Costo por el tiempo de viaje carro (\$)

$C_{gk}$ : Costo por el consumo de combustible para carro (\$)

$C_{lk}$ : Costo por consumo de lubricante carro (\$)

- **Costo marginal carro**

$$\%carros = \frac{V_{carros}}{V_{carros} + \frac{V_{motos}}{2}}$$

$\%Carros$ : Porcentaje del costo de otros vehículos que le corresponde a los carros

Para porcentaje menores a 45% el costo marginal es:

$$C_{marginal\ carro} = C_{individual\ carro} + C_{c\ carro}$$

Donde;

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$C_{c\text{ moto}}$ : Costo contaminación carro (\$)

Para porcentaje mayores a 45% el costo marginal es:

$$C_{\text{marginal carro}} = C_{\text{individual carro}} + C_{c\text{ carro}} + \%Carro [C_{\text{marginal taxi, camión y bus}} - VTP]$$

Donde;

$C_{c\text{ carro}}$ : Costo contaminación carro (\$)

% Carros: Porcentaje del costo de otros vehículos que le corresponde a los carros

$C_{\text{marginal taxi, camión y bus}}$ : Sumatoria del costo marginal de taxi, camión y bus (\$)

A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos para 5%, 45%, 85% y 100%:

**Tabla 14. Resumen resultado carros**

| Vol  | Tramo | Tr (seg) | Cm (gal) | ENOX (gr) | Ctk carro | C <sub>gk</sub> carro | Cc carro | Cl carro | C individual Carro | C marginal carro |
|------|-------|----------|----------|-----------|-----------|-----------------------|----------|----------|--------------------|------------------|
| 5%   | 14    | 192      | 0.06     | 0.75      | \$2,343   | \$535                 | \$ 28    | \$ 48    | \$ 2,925           | \$ 2,953         |
|      | 68    | 180      | 0.05     | 0.69      | \$2,204   | \$494                 | \$25     | \$44     | \$ 2,742           | \$2,767          |
|      | 104   | 230      | 0.07     | 0.94      | \$2,805   | \$ 669                | \$ 35    | \$60     | \$ 3,535           | \$3,569          |
|      | 108   | 136      | 0.05     | 0.63      | \$1,657   | \$445                 | \$23     | \$40     | \$2,143            | \$2,166          |
|      | 1011  | 286      | 0.10     | 1.31      | \$3,500   | \$930                 | \$48     | \$83     | \$ 4,514           | \$ 4,562         |
| 45%  | 14    | 243      | 0.06     | 0.84      | \$2,968   | \$ 598                | \$31     | \$54     | \$ 3,620           | \$5,894          |
|      | 68    | 188      | 0.06     | 0.84      | \$2,302   | \$594                 | \$31     | \$53     | \$ 2,949           | \$ 3,852         |
|      | 104   | 277      | 0.08     | 1.03      | \$3,388   | \$736                 | \$38     | \$66     | \$4,189            | \$ 6,112         |
|      | 108   | 167      | 0.05     | 0.67      | \$2,043   | \$478                 | \$25     | \$43     | \$2,564            | \$ 4,511         |
|      | 1011  | 289      | 0.11     | 1.46      | \$3,529   | \$1,039               | \$54     | \$93     | \$4,661            | \$ 5,401         |
| 85%  | 14    | 363      | 0.12     | 1.60      | \$4,437   | \$1,136               | \$ 59    | \$102    | \$5,675            | \$23,156         |
|      | 68    | 355      | 0.10     | 1.39      | \$4,337   | \$986                 | \$51     | \$ 89    | \$5,412            | \$24,824         |
|      | 104   | 524      | 0.16     | 2.11      | \$6,401   | \$1,504               | \$78     | \$135    | \$8,039            | \$ 38,724        |
|      | 108   | 295      | 0.09     | 1.19      | \$3,610   | \$845                 | \$44     | \$76     | \$4,531            | \$21,206         |
|      | 1011  | 544      | 0.19     | 2.59      | \$6,647   | \$1,839               | \$95     | \$ 165   | \$ 8,651           | \$39,193         |
| 100% | 14    | 479      | 0.33     | 5.51      | \$5,853   | \$3,147               | \$ 190   | \$282    | \$ 9,282           | \$ 52,491        |
|      | 68    | 852      | 0.56     | 8.61      | \$10,415  | \$5,414               | \$305    | \$486    | \$16,315           | \$114,863        |
|      | 104   | 1138     | 0.69     | 9.66      | \$13,906  | \$6,660               | \$351    | \$ 598   | \$21,163           | \$147,122        |
|      | 108   | 888      | 0.47     | 6.07      | \$10,853  | \$4,516               | \$ 226   | \$405    | \$ 15,775          | \$114,799        |
|      | 1011  | 1138     | 0.77     | 10.60     | \$13,908  | \$7,432               | \$ 387   | \$667    | \$ 22,006          | \$149,087        |

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Tabla 15. Resumen resultados motos**

| Vol  | Tramo | Tr (seg) | Cm (gal) | ENOX (gr) | Ctk moto | C <sub>gk</sub> moto | Cc moto | Cl moto | C individual moto | C marginal moto |
|------|-------|----------|----------|-----------|----------|----------------------|---------|---------|-------------------|-----------------|
| 5%   | 14    | 192      | 0.06     | 0.75      | \$ 1,879 | \$247                | \$ 13   | \$22    | \$2,174           | \$2,187         |
|      | 68    | 180      | 0.05     | 0.69      | \$ 1,768 | \$228                | \$ 12   | \$20    | \$2,040           | \$ 2,052        |
|      | 104   | 230      | 0.07     | 0.94      | \$2,250  | \$ 309               | \$ 16   | \$28    | \$2,619           | \$ 2,635        |
|      | 108   | 136      | 0.05     | 0.63      | \$1,329  | \$ 206               | \$ 11   | \$18    | \$1,575           | \$ 1,586        |
|      | 1011  | 286      | 0.10     | 1.31      | \$ 2,808 | \$ 430               | \$ 22   | \$39    | \$3,321           | \$ 3,343        |
| 45%  | 14    | 243      | 0.06     | 0.84      | \$ 2,381 | \$276                | \$ 14   | \$25    | \$2,711           | \$ 6,090        |
|      | 68    | 188      | 0.06     | 0.84      | \$1,846  | \$275                | \$ 14   | \$25    | \$ 2,174          | \$3,496         |
|      | 104   | 277      | 0.08     | 1.03      | \$2,717  | \$ 340               | \$ 18   | \$30    | \$ 3,123          | \$5,968         |
|      | 108   | 167      | 0.05     | 0.67      | \$ 1,638 | \$ 221               | \$ 11   | \$20    | \$1,902           | \$4,798         |
|      | 1011  | 289      | 0.11     | 1.46      | \$ 2,830 | \$480                | \$ 25   | \$43    | \$3,404           | \$ 4,458        |
| 85%  | 14    | 363      | 0.12     | 1.60      | \$3,559  | \$ 525               | \$ 27   | \$ 47   | \$4,186           | \$30,346        |
|      | 68    | 355      | 0.10     | 1.39      | \$ 3,479 | \$ 456               | \$ 23   | \$ 41   | \$4,023           | \$ 33,089       |
|      | 104   | 524      | 0.16     | 2.11      | \$ 5,134 | \$ 695               | \$ 36   | \$ 62   | \$ 5,964          | \$51,911        |
|      | 108   | 295      | 0.09     | 1.19      | \$ 2,896 | \$391                | \$ 20   | \$35    | \$3,362           | \$28,329        |
|      | 1011  | 544      | 0.19     | 2.59      | \$ 5,332 | \$ 850               | \$ 44   | \$ 76   | \$6,346           | \$52,061        |
| 100% | 14    | 479      | 0.33     | 5.51      | \$ 4,695 | \$ 1,454             | \$ 88   | \$ 130  | \$ 6,431          | \$71,047        |
|      | 68    | 852      | 0.56     | 8.61      | \$8,354  | \$2,501              | \$ 141  | \$224   | \$11,341          | \$158,847       |
|      | 104   | 1138     | 0.69     | 9.66      | \$11,154 | \$3,077              | \$ 162  | \$ 276  | \$14,828          | \$203,403       |
|      | 108   | 888      | 0.47     | 6.07      | \$ 8,705 | \$2,087              | \$ 104  | \$187   | \$11,197          | \$ 159,499      |
|      | 1011  | 1138     | 0.77     | 10.60     | \$11,155 | \$3,434              | \$ 179  | \$ 308  | \$ 15,256         | \$ 205,475      |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4 Determinar la tarifa de cobro

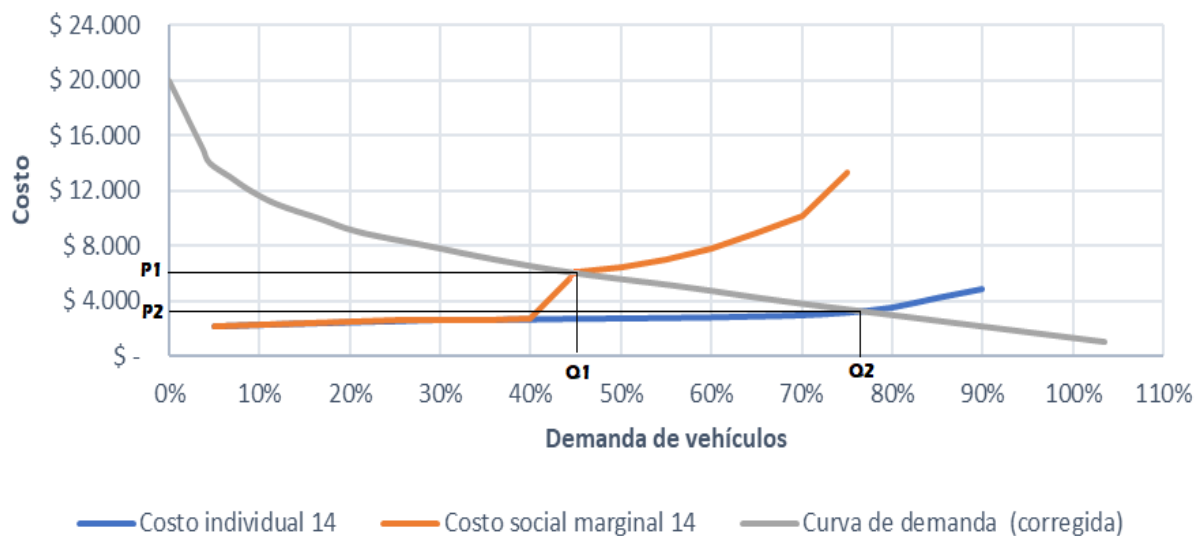
Para determinar la tarifa de cobro fue necesario definir el punto máximo de congestión, correspondiente al volumen máximo al cual los corredores pueden operar. Después de este volumen las vías colapsan, por lo que los costos encontrados para volúmenes mayores al máximo son muy similares, debido a que las vías han llegado a su capacidad máxima, determinando entonces este valor como el 100% del volumen de vehículos para encontrar la tarifa a partir de la curva de demanda definida anteriormente. Según las gráficas encontradas a partir de los datos del modelo el volumen de saturación corresponde al 150% del volumen aforado.

Teniendo en cuenta lo anterior fue posible encontrar el valor de la tarifa para motos y autos particulares para cada uno de los tramos a partir de las siguientes gráficas:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Ilustración 34: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 1-4**

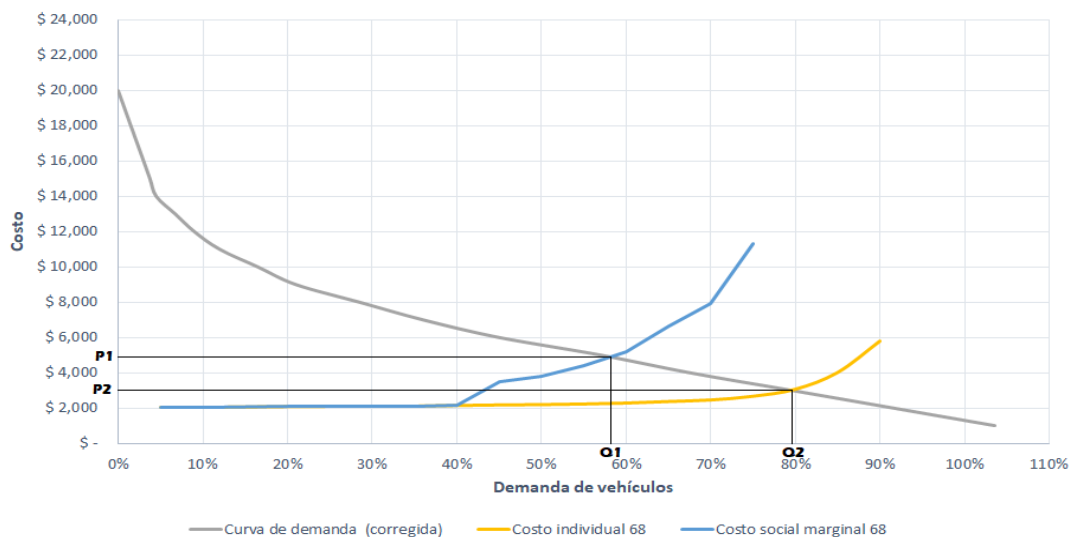
### Tramo 1-4



Fuente: Elaboración propia

**Ilustración 35: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 68**

### Tramo 68

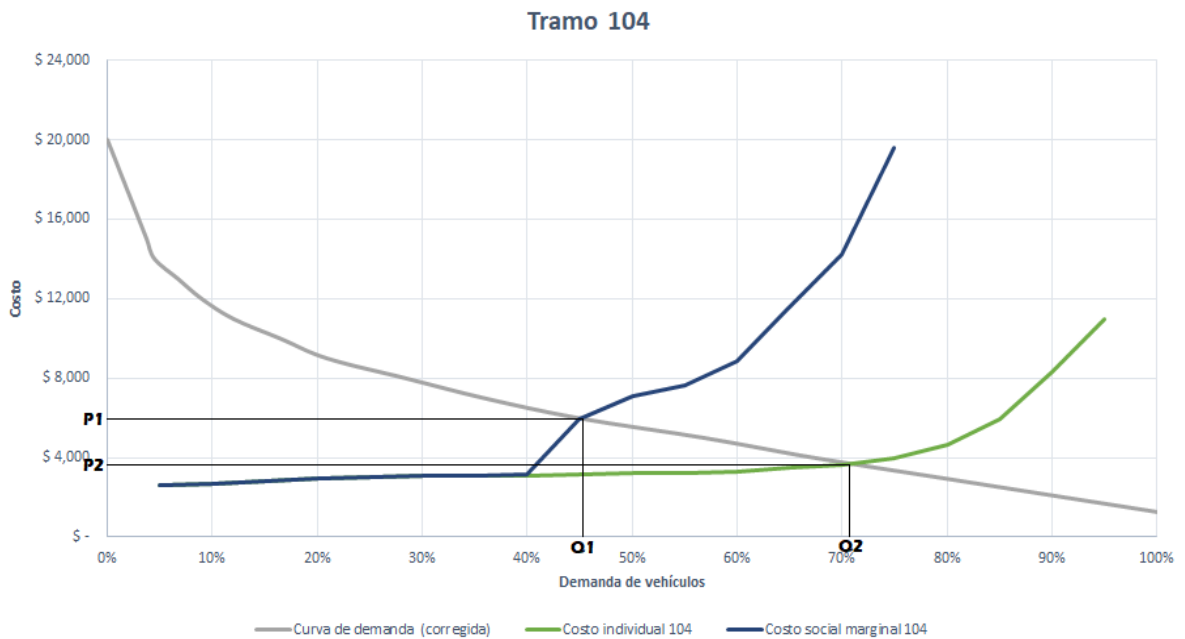


Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

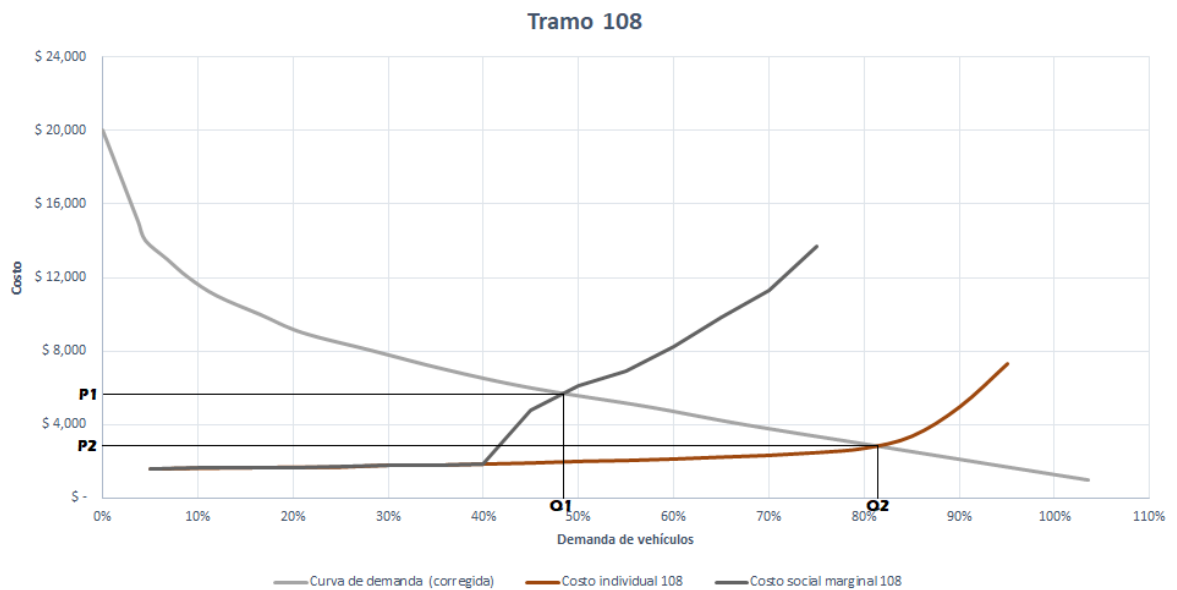


**Ilustración 36: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 104**



Fuente: Elaboración propia

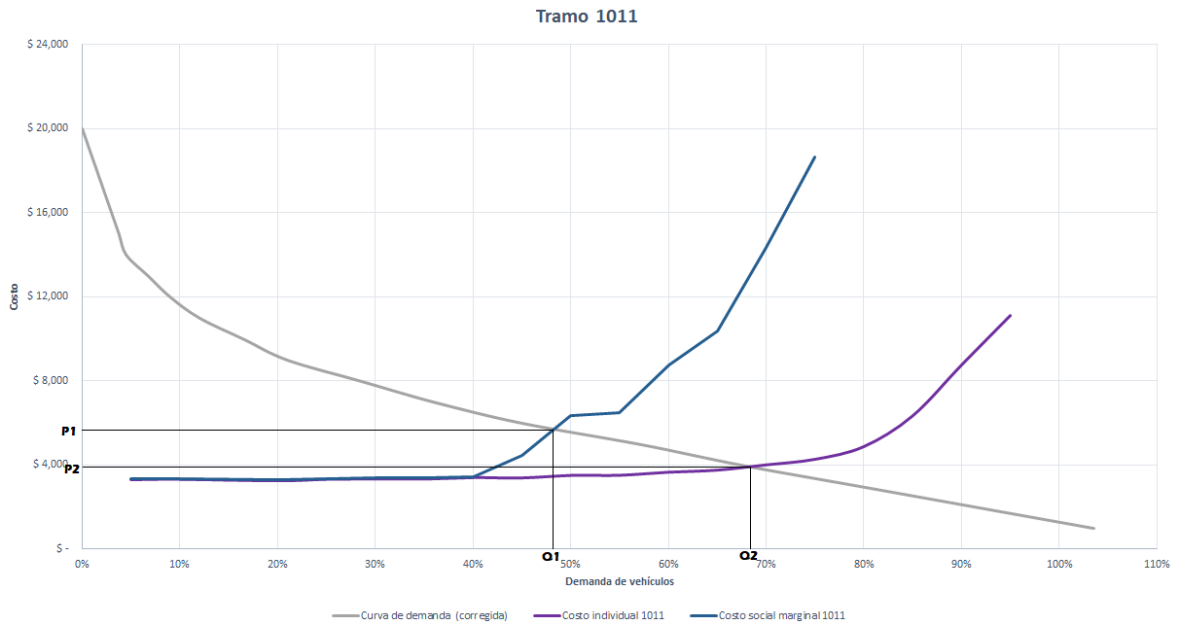
**Ilustración 37: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 108**



Fuente: Elaboración propia

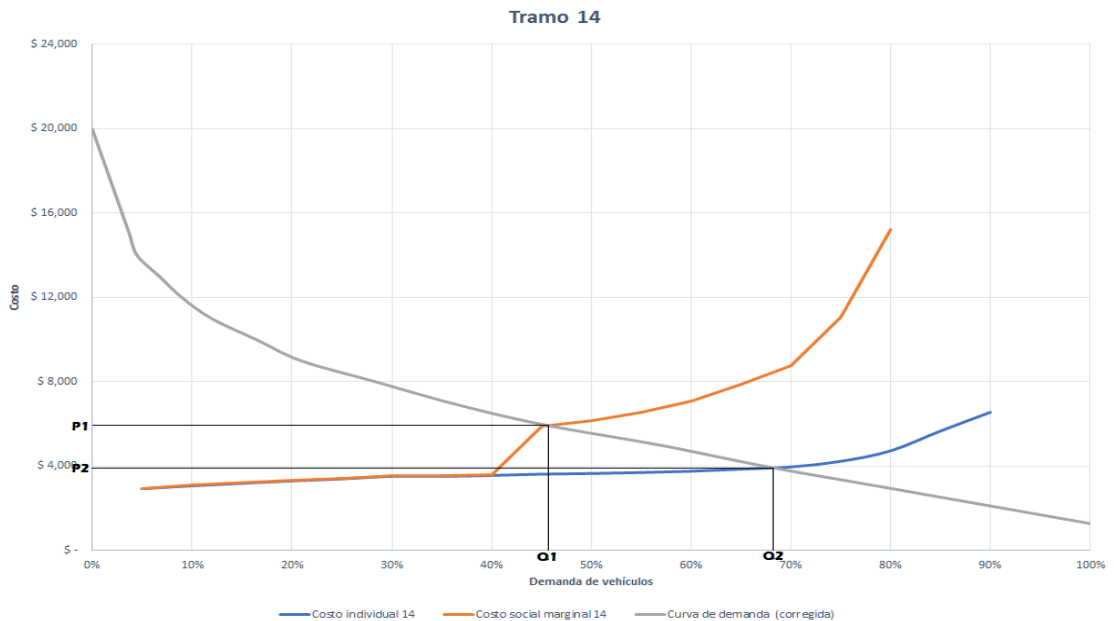
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Ilustración 38: Costo vs Demanda para motos en el Tramo 1011**



Fuente: Elaboración propia

**Ilustración 39: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 14**



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

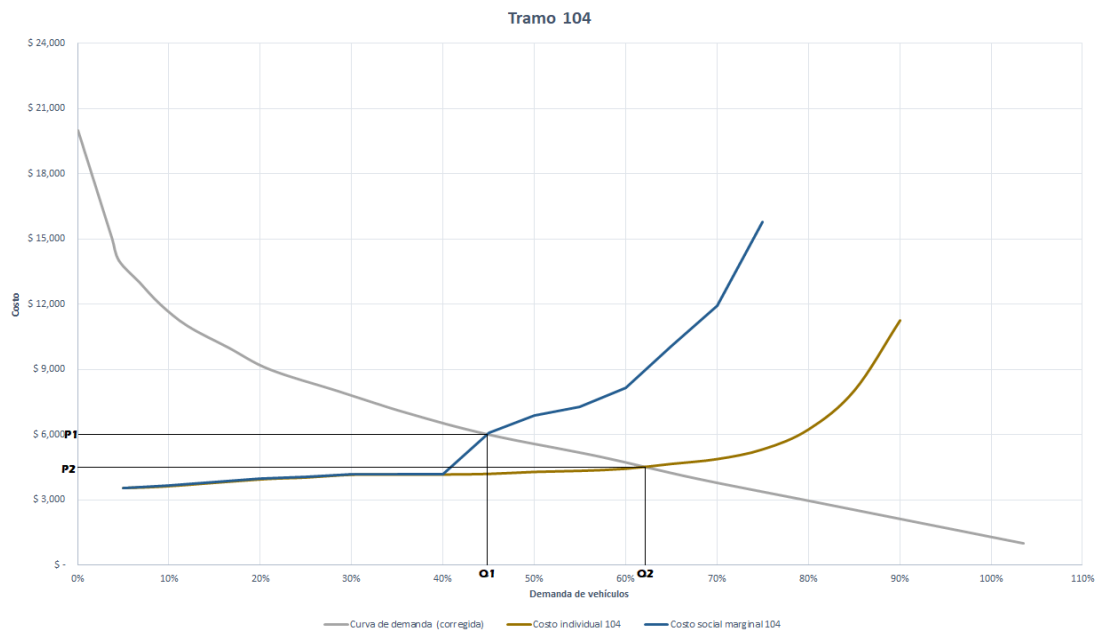
Fuente: Elaboración propia

### Ilustración 40: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 68



Fuente: Elaboración propia

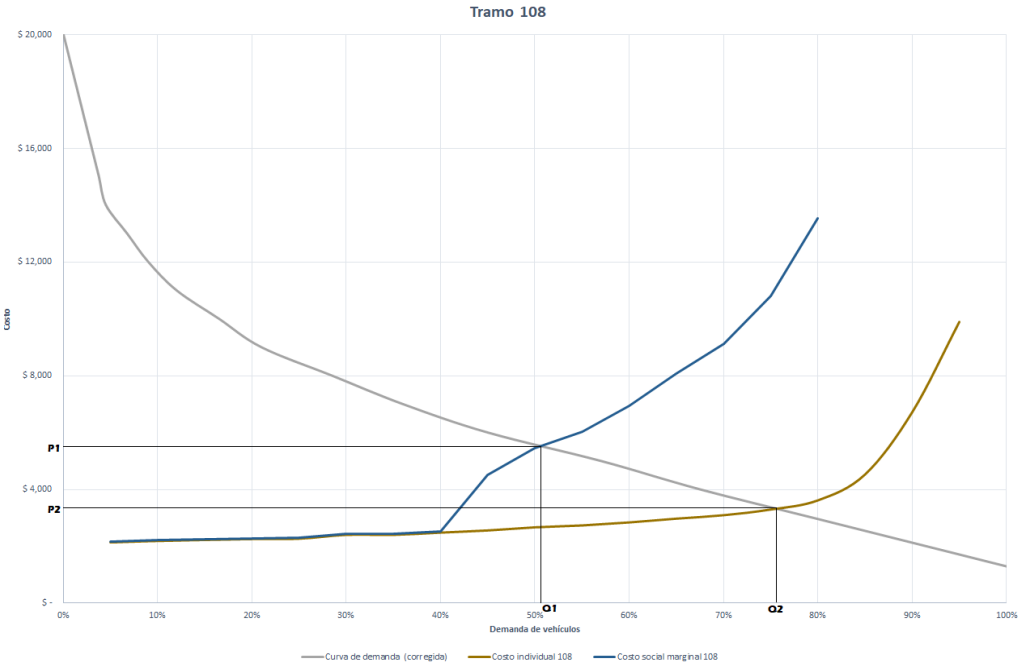
### Ilustración 41: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 104



Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

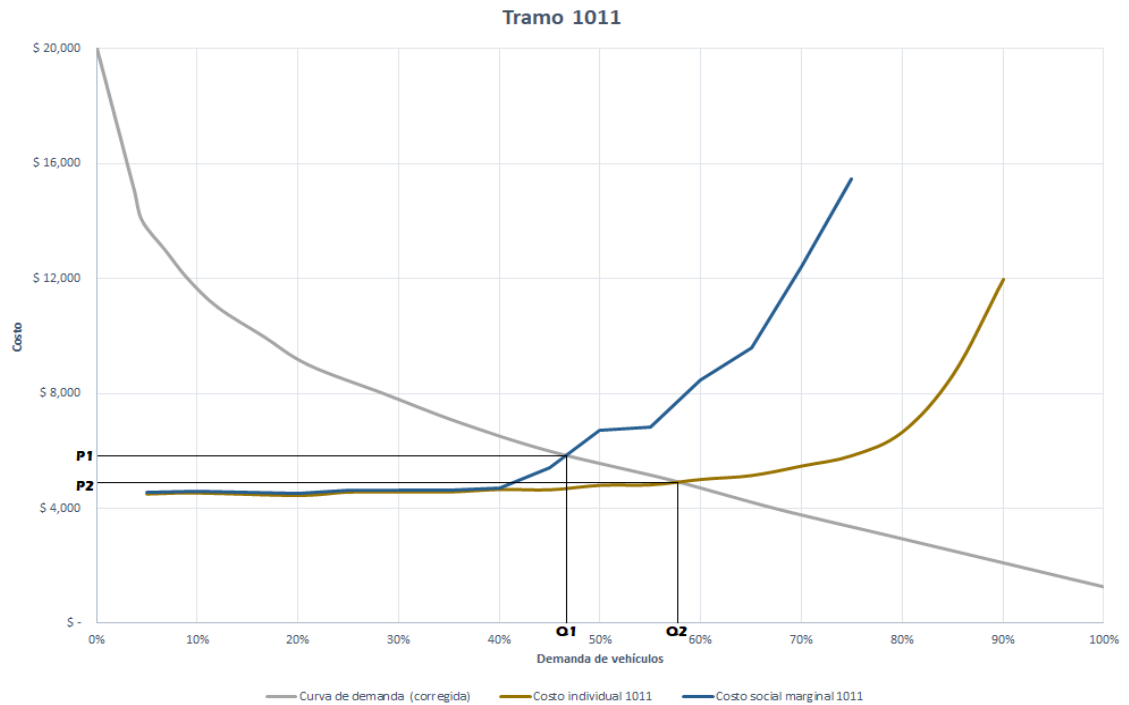
### Ilustración 42: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 108



Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### Ilustración 43: Costo vs Demanda para carros en el Tramo 1011



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que la tarifa es calculada restando el punto P1 Y P2. Se obtienen los siguientes resultados para los diferentes tramos analizados.

**Tabla 16. Tarifa para motos.**

| Motos |                |                  |          |
|-------|----------------|------------------|----------|
| Tramo | Costo marginal | Costo individual | Tarifa   |
| 14    | \$ 6,000       | \$ 3,000         | \$ 3,000 |
| 68    | \$ 5,000       | \$ 3,000         | \$ 2,000 |
| 104   | \$ 6,000       | \$ 3,500         | \$ 2,500 |
| 108   | \$ 5,700       | \$ 2,700         | \$ 3,000 |
| 1011  | \$ 5,700       | \$ 3,700         | \$ 2,000 |

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

**Tabla 17. Tarifa para carros.**

| <b>Carros</b> |                       |                         |               |
|---------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| <b>Tramo</b>  | <b>Costo marginal</b> | <b>Costo individual</b> | <b>Tarifa</b> |
| <b>14</b>     | \$ 6,000              | \$ 4,000                | \$ 2,000      |
| <b>68</b>     | \$ 5,700              | \$ 3,500                | \$ 2,200      |
| <b>104</b>    | \$ 6,200              | \$ 4,500                | \$ 1,700      |
| <b>108</b>    | \$ 5,500              | \$ 3,300                | \$ 2,200      |
| <b>1011</b>   | \$ 5,700              | \$ 4,700                | \$ 1,000      |

Fuente: Elaboración propia

En el estudio realizado por la Universidad de los Andes (2013) arroja como resultado de su estudio tarifas entre \$2100 - \$3100 para la ciudad de Bogotá, lo cual para el 2019 se traduce a un valor entre \$2691 - \$3972. Lo cual muestra que los resultados obtenidos en este estudio se encuentran en un rango lógico.

### **3.4 IDENTIFICAR LOS CAMBIOS GENERADOS POR EL COBRO**

#### **3.4.1 Obtener las variables al implementar el cobro**

Para determinar el cambio que se produce en las variables medidas con la implementación del costo fue necesario determinar inicialmente la demanda de vehículos que estaría dispuesta a pagar la tarifa definida. El valor que corresponde a esta demanda se encuentra donde se cruzan la curva de costo marginal (Q1) y la curva de demanda (Q2). En la tabla 14 se muestra la demanda para cada uno de los tramos y a partir de las curvas encontradas tanto para motos como para carros y un promedio de estas.

**Tabla 18: Demanda de vehículos al implementar el cobro**

| <b>Demanda</b> |              |               |
|----------------|--------------|---------------|
| <b>Tramo</b>   | <b>Motos</b> | <b>Carros</b> |
| <b>14</b>      | 45%          | 46%           |
| <b>68</b>      | 57%          | 58%           |
| <b>104</b>     | 45%          | 45%           |
| <b>108</b>     | 47%          | 51%           |
| <b>1011</b>    | 48%          | 47%           |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

|                 |     |     |
|-----------------|-----|-----|
| <b>Promedio</b> | 48% | 49% |
|-----------------|-----|-----|

Fuente: Elaboración propia

La demanda de promedio de vehículos que estaría dispuesta a pagar la tarifa se definió en un 50% según los promedios obtenidos para motos y carros y con esta se lograron identificar las variables evaluadas durante el desarrollo del trabajo y su porcentaje de diferencia o cambio, los cuales se evidencian en la tabla 19.

**Tabla 19: Cambio en valores de las variables evaluadas**

| <b>Variable</b>               | <b>Sin Cobro</b> | <b>Con Cobro</b> | <b>% Diferencia</b> |
|-------------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Tiempo de viaje (seg/veh)     | 899              | 239              | 73%                 |
| Consumo combustible (gal/veh) | 0,56             | 0,07             | 87%                 |
| Emisiones CO (gr)             | 34866            | 5610             | 84%                 |
| Emisiones NOx (gr)            | 6784             | 1053             | 84%                 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2 Proponer un esquema de cobro

Este estudio pretende no sólo analizar la implementación de una tasa por congestión. Como se mencionó anteriormente, los esquemas por congestión puestos en marcha en varias ciudades del mundo, nos permite a partir de sus experiencias minimizar las dificultades a la hora de ejecutar uno en la ciudad de Medellín, conociendo sus ventajas y desventajas.

Es importante elegir el sistema óptimo para la ciudad, ya que esquemas empleados en otras ciudades pueden funcionar de forma negativa en Medellín. El primer concepto para tener en cuenta es que las detenciones de los vehículos para realizar las gestiones de pago de las posibles tarifas a las que tengan que hacer frente contribuyen en alto grado a aumentar las retenciones y, por tanto, la congestión.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone que el sistema de cobro sea electrónico. La inversión económica que se debe realizar por parte de la administración sería importante. Este tipo de sistema se implementó en Londres cuando en febrero de 2003 se puso en funcionamiento el pago de una tasa de congestión en el CBD de Londres (Charging Zone) (Esquema de movilidad planteado para Barcelona), en el cual se implantó el sistema de Reconocimiento por video/ Reconocimiento automático de placas (ALPR o ANPR), que consiste en pórticos que al paso de los vehículos detectan la matrícula mediante cámaras de vídeo y la transmiten a la base de datos, como se mencionó en el marco metodológico. En este esquema el usuario tiene todo el día para pagar la tasa, y existen múltiples modalidades de pago. Este sistema tiene la ventaja de que no va guardando información

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

sobre la ruta del vehículo, ya que cuando lee la matrícula por primera vez automáticamente la borra de la base de datos, permitiendo así que el vehículo transite sin recargos adicionales por la zona de cobro. Es una forma óptima de resolver la problemática social que genera la detección de la matrícula con relación a la preservación de la intimidad de los usuarios (Esquema de movilidad planteado para Barcelona). Este sistema funcionaría adecuadamente en Medellín para realizar el pago de la tarifa por congestión en la zona de estudio, ya que este sistema es utilizado actualmente en la ciudad para controlar velocidad y la restricción de pico y placa.

Por lo mencionado anteriormente en el marco metodológico y en el texto anterior se selecciona como esquema de cobro el Reconocimiento por video/ Reconocimiento automático de placas (ALPR o ANPR). Este cobro se realizará en todas las entradas a la zona de cobro.

A partir de la tarifa ya definida tanto para carros como para motos y la demanda de vehículos obtenida mediante el modelo para el porcentaje de usuarios que estarían dispuestos a pagar la tarifa, es posible obtener los recaudos mensuales y anuales promedio, logrando concluir que en el año el recaudo total será de 1200 millones de pesos aproximadamente (\$1'228.392.000), se debe tener en cuenta que estos costos son calculados únicamente para la hora analizada y el valor de la tarifa para motos es de \$3.000 y para carros de \$2.200 por ingreso a la zona.

**Tabla 20: Recaudos para motos**

| <b>Motos</b>           |                      |
|------------------------|----------------------|
| <b>Recaudo mensual</b> | <b>Recaudo anual</b> |
| \$83'160.000           | \$997'920.000        |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 21: Recaudos para carros**

| <b>Carros</b>          |                      |
|------------------------|----------------------|
| <b>Recaudo mensual</b> | <b>Recaudo anual</b> |
| \$ 19'206.000          | \$230'472.000        |

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



## 4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Como resultado de esta investigación se encontró que la tarifa para los automóviles debe ser de \$2.200 y para las motos de \$3.000 por ingreso a la zona de cobro, además, con la implementación del cobro la demanda de carros se reduciría en un 48% y de motos en 49%, disminuyendo significativamente los índices de congestión, los tiempos de viaje de los usuarios, el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes. Los tiempos de viaje y el consumo de combustible según los resultados obtenidos presentarían una reducción del 73% y 87% respectivamente, mientras que las emisiones de gases de CO y NOx se reducirían en un 84%. Según estos resultados se podría concluir que la medida si cumple con los objetivos de disminuir la congestión vehicular que se presenta en la zona, ya que los tiempos de viajes se reducen hasta en un 73%, además de reducir la contaminación a partir de la reducción en la emisión de gases, aportando al mejoramiento del medio ambiente.

Una validación del impacto de esta medida se presenta en un estudio realizado por la firma Cal y Mayor para la Alcaldía de Medellín en el año 2019, donde se evaluó el impacto socioeconómico, de movilidad y ambiental de diferentes medidas de gestión de la demanda para automóviles y motocicletas en la ciudad. Según este estudio, la medida con la cual se presenta mayor reducción de viajes en las horas pico es implementando un cobro por congestión y ampliando el pico y placa en las horas pico, donde al aplicar una tarifa de \$2.000 se reduciría la demanda de vehículos en un 48% aproximadamente. Además, en este estudio se concluye que las medidas de cobro por congestión tienen menor afectación a la calidad de vida de los hogares que poseen vehículos particulares en comparación con las medidas de restricción por placas, y que no existe certeza de un alto impacto en la economía de la ciudad, lo que brinda certeza de que la implementación de esta medida puede tener mejores resultados que las medidas actuales, como lo es el pico y placa. (Cal y Mayor, 2019)

Por otra parte, la validación de la metodología realizada en los tramos de la Avenida Colombia, La Playa y Palacé evaluados para diferentes volúmenes, entre los que se encuentra el volumen real en las horas pico, se puede establecer que: 1) el costo de la congestión vehicular disminuye a medida que se incrementan las velocidades de operación. 2) Entre mayor velocidad menor costo marginal e individual. 3) A pesar de que el límite de velocidad en la malla vial es de 60km/h, esta nunca se alcanza debido a los semáforos que se encuentran en estas y la saturación de vehículos a lo largo de la vía.

Según lo desarrollado en este estudio fue posible identificar que actualmente el efecto de las motos sobrepasa en promedio un 17% el de los automóviles, esto debido a que la demanda de estas en la zona de estudio es mayor que la de los demás tipos de vehículos, por lo que vale la pena resaltar que esta medida y posibles medidas futuras deben estar enfocadas en reducir el impacto que estas están causando.

En el caso obtener excedentes del recaudo por el sistema de cobro por congestión, después de suplir los costos asociados a su operación y mantenimiento, es importante tener claridad sobre la forma en que se invertirán estos recursos (University College London-Universidad

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de los Andes, 2013). La decisión sobre la inversión del excedente debería estar encaminada al mejoramiento del transporte público para potenciar el uso de este, con el fin de disminuir el uso del transporte privado.

Es importante tener en cuenta que la implementación de un sistema de cobro por congestión debe estar soportado por un compromiso político fuerte y un conjunto de instituciones con capacidad suficiente para el diseño, implementación, ejecución, gestión y control de la medida, para que así logre ser exitosa, ya que de lo contrario puede aumentar el riesgo de fracaso de tal manera que la misma logre ser exitosa (Schwaab, 2002).

Se evidencia que el valor que más aporta al costo individual es el generado por el tiempo en la red, siendo aproximadamente el 86.4% de este. Adicionalmente se evidencia que el aporte al costo marginal por contaminación no es representativo siendo únicamente el 1%, lo que genera que ambas curvas, individual y marginal, no cambien mucho, sin embargo, para esta última es necesario tener en cuenta los efectos generados por congestión al transporte público lo que genera un valor más elevado.

Se recomienda realizar próximas investigaciones tomando como base este proyecto, ya que es un tema muy amplio y hay muchas variables para tomar en cuenta.

## 5. REFERENCIAS

- Álvarez Valencia, C. (2009). *Modelación de la elección de modo y hora de salida ante pico y placa combinado con peaje*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/2399/1/43876410.2009.pdf>
- Álvarez, J. C., & Calle, D. F. (2014). *Determinación del costo operativo para el transporte de pasajeros en el bus-tipo, en el sector urbano de la ciudad de Cuenca, son base en el nuevo sistema integrado de transporte*. Cuenca.
- Arcila, C., & Betancur, S. (2019). Estrategias de atención de incidentes de tránsito en vía las palamas, entre el km 5 y el km 15, para la reducción de su impacto en la vía, a partir del costo generado por la congestión. Envigado.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2017). *Encuesta de Origen - Destino - Análisis de viajes*. Recuperado el 20 de 10 de 2019, de [https://www.metropol.gov.co/encuesta\\_od2017\\_v2/index.html#/](https://www.metropol.gov.co/encuesta_od2017_v2/index.html#/)
- ASITT S.A.S. (2016). *Análisis de movilidad plan parcial el chanco*. Bogotá.
- Cifuentes, J. D. (2018). *¿Cuántos habitantes tiene la ciudad de Medellín?* Medellín: Noticias teledellín.
- Domínguez Varela, A. (2007). *Análisis de la Congestión en Áreas Metropolitanas: Aplicación al caso de Barcelona*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4947/00.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Esquema de movilidad planteado para Barcelona*. (s.f.). Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3390/40877-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- García, C. (Agosto de 2018). *Pico y placa: ¿llegó la hora de repensarlo?* Obtenido de El Espectador: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/pico-y-placa-llego-la-hora-de-repensarlo-articulo-804390>
- Gleave, S. D. (2009). *Estudio de demanda del Túnel Aburrá - Oriente, (9), 78*.
- Gonzalez Calderón, C. A. (2009). *Estrategias tarifarias y desestimulación del uso del vehículo particular por medio de Pico y Placa en Medellín*. Obtenido de <file:///Users/camilabernal/Downloads/53-Texto%20del%20art%C3%ADculo-162-1-10-20110718.pdf>
- Gonzalez Calderón, C. A., Posada Henao, J. J., & Sánchez Díaz, I. D. (2011). *La necesidad de peaje por congestión en Medellín: una perspectiva económica*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/29578/29811>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Google Maps. (16 de Octubre de 2019). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/Av.+Oriental,+Medellín,+Antioquia/@6.2509053,-75.5618291,16.1z/data=!4m5!3m4!1s0x8e4428fa5dea7a8d:0x84a47414f4f80b8d!8m2!3d6.2492071!4d-75.5648639!5m1!1e1>
- Grange, L., & Troncoso, R. (2014). *Límites de la tarificación vial*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/272030107\\_Limites\\_de\\_la\\_tarificacion\\_vial/download](https://www.researchgate.net/publication/272030107_Limites_de_la_tarificacion_vial/download)
- Guzmán García, L. Á., de la Hoz, D., & Pfaffenbichler, P. (2008). *Análisis de impactos en la tarifa de cobro por congestión en Madrid utilizando la dinámica de sistemas*. Obtenido de [http://oa.upm.es/1867/1/GUZMAN\\_PON\\_2008\\_03.pdf](http://oa.upm.es/1867/1/GUZMAN_PON_2008_03.pdf)
- Honda. (2019). Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de <https://www.honda.es/motorcycles/range/scooter/pcx-125/overview.html>
- INRIX. (2018). *INRIX Global Traffic Scorecard Retrieved August 8, 2018*. Recuperado el 2018, de <http://inrix.com/scorecard/>
- La República. (4 de Octubre de 2019). *Los precios de la gasolina y diésel se mantendrán estables para octubre*. Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de La República: <https://www.larepublica.co/economia/los-precios-de-la-gasolina-y-diesel-se-mantendran-estables-para-octubre-2917670>
- (2008). *Los vehículos automotores como fuentes de emisión*. Monterrey.
- MINAMBIENTE. (2017). *PRINCIPALES PREGUNTAS FRENTE AL IMPUESTO NACIONAL AL CARBONO*. Decreto 926 de 2017).
- Ministerio de Transporte. (2006). *Estructura de costos de operación vehicular*. Bogotá.
- Muñoz Puentes, P. E. (2014). *Metodología para evaluar los sobrecostos por congestión vehicular en la malla vial arterial principal de la ciudad de Bogotá D.C.*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/45992/1/02293252.2014.pdf>
- Noya, C. (27 de Abril de 2015). *¿Consume poco una moto?* Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de Nergize: <https://nergiza.com/consume-poco-una-moto/>
- Patiño, D. (2018). Esto paga de impuestos por litro de gasolina. *Expansión con alianza CNN*.
- Pizarro, R. (2018). *Impuestos Verdes en Chile*. Santiago de Chile.
- Portafolio. (Enero de 2019). Impuestos a la gasolina, ACPM y carbono. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/impuestos/impuestos-a-la-gasolina-acpm-y-carbono-subiran-desde-febrero-525456>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Portafolio. (21 de Enero de 2019). *Impuestos a la gasolina, ACPM y carbono subirán desde febrero*. Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de Portafolio: <https://www.portafolio.co/economia/impuestos/impuestos-a-la-gasolina-acpm-y-carbono-subiran-desde-febrero-525456>
- Posada Henao, J. J., Farbiarz Castro, V., & González Calderón, C. A. (Agosto de 2010). *Análisis del Pico y Placa como restricción a la circulación vehicular en Medellín*. Recuperado el 2018, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25645/26101>
- Posada, C. E., Corrales, A., & García, J. (Junio de 2016). *Congestión vehicular en Medellín: una solución desde la economía*.
- Punto Azul. (2014). *¿Cuál es el consumo de los camiones de transporte?* Recuperado el 15 de 10 de 2019, de <http://puntoazul24h.es/noticias/motor/cual-es-el-consumo-de-los-camiones-de-transporte>
- Revista Turbo. (8 de Febrero de 2018). *Diseño y rendimiento: nuevo Chevrolet Spark GT*. Recuperado el 2019 de Octubre de 2019, de <http://www.revistaturbo.com/lanzamientos/diseño-y-rendimiento-nuevo-chevrolet-spark-gt-178>
- Ríos, V., Marquet, O., & Miralles-Guasch, C. (12 de Mayo de 2016). Estimación de las emisiones de CO2 desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín. *Revista Transporte y Territorio*, 302-322.
- Robles, D., Ñañes, P., & Quijano, N. (Julio de 2009). *Control y simulación de tráfico urbano en Colombia: Estado del arte*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n29/n29a8.pdf>
- Schwaab, J. A. (2002). POLICY GUIDELINES FOR ROAD TRANSPORT PRICING. *New York: United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP) & Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)*.
- Secretaria de Movilidad de Medellín. (2019). *Programación semaforica*. Medellín.
- Semana Sostenible. (31 de Agosto de 2017). *Así funciona el impuesto nacional al carbono*. Recuperado el 15 de 10 de 2019, de <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/impuesto-nacional-al-carbono-asi-funciona-el-tributo-de-emisiones-de-co2/38525>
- Solarte Portilla, J. J. (2015). *Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/54317/1/5292455.2015.pdf>
- University College London, & Universidad de los Andes. (2013). *Cobros por congestión en ciudades colombianas*. Obtenido de <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp->

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

content/uploads/Cobros-de-congesti%C3%B3n-en-ciudades-Colombianas\_UCLULA\_Abril2013.pdf

University College London-Universidad de los Andes. (Abril de 2013). Cobros de congestión en ciudades colombianas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## **6. ANEXOS**

ANEXO A. Aforo vehicular

ANEXO B. Calibración modelo

ANEXO C. Modelo PTV Vissim

ANEXO D. Calculo costos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.