

Pasantía de investigación en el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, para ajustar el modelo de asignación de tráfico utilizado en la priorización de proyectos de infraestructura vial en la ciudad de Bucaramanga

Johanna Maria Abreo Ortiz

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera Civil

Director

Jhon Jairo Caceres Jimenez

Ingeniero de Sistemas, PhD en Ingeniería Civil y Costera

Codirector

Claudia Patricia Báez Trujillo

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Mujeres con guitarra

*Hay muchas mujeres lapidadas a lo largo
de la historia.*

*Su vida fue de jaurías y de toros rabiosos
de sangre alzada
de mordeduras largas.*

*Mujeres que le devolvieron al mundo
la embestida,*

*que se inmolaron o tuvieron que matar
para seguir viviendo,*

*ésas que en la hora más oscura
roturaron el campo con sus uñas
para que vos y yo pasemos.*

*Hondas mujeres
que quizás una lenta madrugada
marcharon al fuego o a la horca
por cosas tales como desordenar
el orden público*

*por inventar una nueva manera de descifrar
la vida*

*por tener voz
o por infieles*

o ateas.

*Ellas ya no están. Sus cabezas reposan
sobre un siglo o dos. Sus ojos
ya no existen.*

*Pero de ellas perdura una hebra sutil
un hilo ciego que sin saberlo
nos hace crecer y despertarnos en la noche
con unas ganas inmensas de vivir
de derribar todos los muros
de desafiar todas las hogueras
así como de amar y de pulsar
todas
toditas las guitarras de la tierra.*

-Ana Ilce Gómez-

*Este proyecto de grado se lo dedico a mi madre **María Teresa Ortíz**, quien ha forjado mi humanidad y empatía por el mundo, además porque de ella he aprendiendo los significados vivos de fortaleza, solidez y coherencia. Tambien se lo dedico a mis hermanas y hermanos, pero en especial a **María Victoria Abreo Ortíz** y **Pedro Elias Ortíz**, a ella porque me da el aliento para seguir, producto de su fuerza inmedible y su amor desbordante, y a él porque nos ha acompañado en los momentos mas difíciles de nuestra historia.*



Agradecimientos

Agradezco al grupo de investigación **GEOMÁTICA**, Gestión y Optimización de sistemas, por haberme dado la oportunidad de investigar, con aportes económicos y técnicos vitales para la realización del proyecto. Asimismo, agradezco a la ingeniera civil **Claudia Patricia Báez Trujillo** por su apoyo y comprensión inmensa en la elaboración de este proyecto de grado, además por sus importantes aportes en la construcción y corrección de este documento. De igual forma agradezco a los ingenieros **Yerly Fabian Martinez Estupiñan** y **Nelson Deiwer Baza Solares**, quienes también hicieron parte de la elaboración y corrección de esta tesis, pero en especial al ingeniero **Nelson Deiwer Baza Solares** por haberme aportado fortaleza y entusiasmo para culminar esta investigación, quien con su calidez humana construye conocimiento de alta calidad.

Igualmente agradezco el apoyo y la amistad brindada por **Diana Marcela Muñoz Pinzón**, **Laura Juliana Gomez Imitola** y **Anderson Fabian Silva**. De la misma manera agradezco a la **Red Rojo y Violeta**, pero en especial a **Lorena Crisitna Pedraza Torres**, por la deconstrucción de conceptos e ideas erróneas que persisten con fuerza en nuestra sociedad, pero sobre todo por darme razones y argumentos que sirvieron y sirven en mi formación feminista, destacando que su apoyo ha creado fuertes lazos de hermandad.

Finalmente quiero agradecer de forma especial a **Irene Bastilla Bastilla** y a **Rosalbina Diaz** por su inmensa colaboración en la culminación de esta carrera, ellas fueron fundamentales para este gran objetivo.

Tabla de Contenido

Introducción	15
Justificación	17
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos	19
2. Marco de referencia	20
2.1 Modelación del tráfico	20
2.1.1 Generación de viajes.	20
2.1.2 Distribución de viajes.	23
2.1.3 Selección modal. E	25
2.1.4 Asignación a la red.	25
2.2 Función volumen-demora	26
2.3 Capacidad vehicular	27
2.4 Sistema de información geográfica	28
3. Método	29
3.1 Modelo de oferta	29
3.2 Estimación de la demanda	32

MODELO DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO	7
4. Resultados	45
4.1 Indicadores de calibración matriz O-D	45
4.2 Proyección y distribución de viajes futuros.	47
4.3 Resultados indicadores de tráfico	48
5. Conclusiones	51
6. Recomendaciones	53
Referencias Bibliográficas	54

Lista de Tablas

Tabla 1. Velocidad de diseño	32
Tabla 2. Parámetros alfa-beta función BPR	32
Tabla 3. Intersecciones aforadas	33
Tabla 4. Características de funcionalidad	43
Tabla 5. Características geométricas	44
Tabla 6. Resultados GEH, vías arteriales y locales	46
Tabla 7. Resultados GEH, vías arteriales	46
Tabla 8. Resultados GEH, vías locales	47
Tabla 9. Porcentajes parque automotor AMB	48
Tabla 10. Factores de crecimiento 2028-2038	48
Tabla 11. Indicadores agregados por año y por escenario.	50
Tabla 12. Indicadores desagregados en los corredores de control.	50
Tabla 13. Priorización proyecto viales en la ciudad de Bucaramanga	52

Lista de Figuras

Figura 1. Metodología implementada, priorización de proyectos	31
Figura 2. Intersecciones aforadas Bucaramanga	34
Figura 3. Vehículos equivalentes 2009	35
Figura 4. Vehículos equivalentes 2017	35
Figura 5. Equipo utilizado para el levantamiento	35
Figura 6. Zonas Originales	36
Figura 7. Zonas Modelo	36
Figura 8. Proyectos de infraestructura vial, Bucaramanga Santander	43
Figura 9. Gráfico de dispersión	45
Figura 10. Crecimiento poblacional AMB	47
Figura 11. Crecimiento parque automotor AMB	48

Lista de Apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la
Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Aforos

Apéndice B. Calibración matriz origen-destino (O-D)

Apéndice C. Proyección y distribución de viajes futuros

Apéndice D. Mallas escenarios

Apéndice E. Matrices

Apéndice F. Escenarios

Apéndice G. Resultados

Glosario

Arcos: Elementos gráficos que representan vías o caminos.

Código DIR Indica si un arco o vía puede atravesarse en ambas direcciones, o si es unidireccional. Si un enlace es unidireccional su código DIR es 1 o -1, es 1 cuando el flujo vehicular corresponde a la dirección en la que se dibujó el arco, es -1 en caso contrario. Cuando es bidireccional el código es 0 (Caliper Corp, 2008).

Conectividad: Desde el punto de vista del análisis geográfico locacional el concepto de conectividad se relaciona fundamentalmente con la estructura viaria y expresa el número de conexiones directas que tiene cada área urbana con el resto (Santos y De Las Rivas, 2008, p.18) .

Matriz origen-destino: Es el arreglo ordenado de los viajes que se generan y atraen en las diferentes zonas de análisis, donde las filas son orígenes y las columnas destinos.

Niveles de servicio: El Manual de Capacidad Vial HCM 2000 del TRB (Transportation Research Board) ha establecido seis niveles de servicio denominados: A, B, C, D, E y F, que van del mejor al peor, los cuales se definen como sigue (Duran, 2017, p.26).

Nivel de Servicio A. Circulación a flujo libre. Los usuarios están exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación, poseen una altísima libertad para seleccionar las velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito. El nivel de comodidad es excelente.

Nivel de Servicio B. Está dentro del rango de flujo estable, aunque se empiezan a observar otros vehículos en la circulación. La selección de velocidades sigue inafectada, aunque disminuye un poco la libertad de maniobra. El nivel de comodidad es un poco inferior al nivel de servicio A.

Nivel de Servicio C. El rango de flujo permanece estable, pero marca el comienzo del dominio en el que la operación de los usuarios se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros usuarios.

Resumen

Título: PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA, GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS, PARA AJUSTAR EL MODELO DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO UTILIZADO EN LA PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA-*

Autora: JOHANNA MARIA ABREO ORTÍZ **

Palabras clave: MATRIZ ORIGEN-DESTINO, MODELOS DE ASIGNACIÓN, MODELO GRAVITACIONAL, TRANSCAD, MODELO DE TRANSPORTE

Descripción:

Uno de los principales objetivos de la aplicación de los modelos de tráfico vehicular es la estimación de la demanda vehicular, y generalmente se organiza en matrices origen-destino (O-D). Existen diversas formas para construir este arreglo matricial, que contiene el número de viajes realizados entre los diferentes pares orígenes - destinos, como ejemplo se tienen las encuestas domiciliarias y las encuesta a vehículos, sin embargo, las anteriores metodologías requieren de un gran presupuesto y largas jornadas de trabajo para la recolección de información. Ante estos antecedentes, surgieron en la década de los 70 metodologías para la estimación de matrices O-D basadas en el uso de conteos vehiculares, información que se puede obtener con mucha más facilidad y con mayor frecuencia. En este proyecto se usó esta última técnica para obtener la matriz de viajes 2018 de la ciudad de Bucaramanga (Colombia). Asimismo, se ajustó el modelo de asignación, se proyectó la demanda futura y se estimaron indicadores de tráfico para priorizar cuatro de los proyectos viales planteados en el Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010-2030 y en el Plan Maestro de Movilidad del Área Metropolitana de Bucaramanga 2011-2030. El propósito de este proyecto de grado es brindar una herramienta a los responsables de ejecutar y administrar la infraestructura vial, para que las decisiones sean tomadas con criterios objetivos que aseguren la correcta ejecución de las inversiones.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Caceres Jimenez, Ingeniero de Sistemas, PhD en Ingeniería Civil y Costera. Tutora: Claudia Patricia Báez Trujillo, Ingeniera Civil

Abstract

Title: RESEARCH INTERNSHIP IN THE GEOMÁTICA RESEARCH GROUP, MANAGEMENT AND OPTIMIZATION OF SYSTEMS, TO ADJUST THE TRAFFIC ALLOCATION MODEL USED IN THE PRIORITIZATION OF ROAD INFRASTRUCTURE PROJECTS IN THE CITY OF BUCARAMANGA *

Author: JOHANNA MARIA ABREO ORTÍZ **

Keywords: ORIGIN-DESTINATION MATRIX, ASSIGNMENT MODELS, GRAVITATIONAL MODEL, TRANSCAD, TRANSPORT MODEL

Description:

One of the main objectives of the application of vehicular traffic models is the estimation of vehicular demand, and it is usually organized in origin-destination matrices (O-D). There are several ways to build this matrix arrangement, which contains the number of trips made between the different origins pairs - destinations, such as home surveys and vehicle surveys, however, the previous methodologies require a large budget and long work days to collect information. Given this background, methodologies for estimating O-D matrices based on the use of vehicle counts emerged in the 1970s, information that could be obtained much more easily and more frequently. In this project, this last technique was used to obtain the travel matrix 2018 from the city of Bucaramanga (Colombia). Likewise, the allocation model was adjusted, future demand was projected and traffic indicators were estimated to prioritize four of the road projects proposed in the Mobility Master Plan, Bucaramanga 2010-2030 and the Mobility Master Plan of the Metropolitan Area of Bucaramanga 2011-2030. The purpose of this degree project is to provide a tool to those responsible for executing and managing the road infrastructure, so that decisions are made with objective criteria to ensure the correct execution of investments.

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Jhon Jairo Caceres Jimenez, Systems Engineer, PhD in Civil and Coastal Engineering. Tutor: Claudia Patricia Báez Trujillo, Civil Engineering

Introducción

El siglo XX fue decisivo para la urbanización del mundo. Procesos económicos, sociales, culturales y políticos como la globalización, sumados al crecimiento demográfico, ocasionaron la expansión y consolidación de las ciudades. En América Latina este proceso de urbanización ha sido intenso y descontrolado (Banco de Desarrollo de América Latina [CAF], 2011).

Producto de esta realidad el Estado Colombiano emitió la Ley 388 de 1997 donde se crea un instrumento técnico y normativo denominado Plan de Ordenamiento Territorial (POT), que sirve para regular la utilización, ocupación y transformación del espacio físico urbano y rural. Además, con los Planes de Ordenamiento Territorial Departamental (Ley 1454 de 2011) se pretende que existan interrelaciones en los procesos municipales y departamentales para el ordenamiento y el desarrollo sostenible, toda vez que se cuente con propuestas de estudios y escenarios eficientes y eficaces para la toma de decisiones (Instituto de Estudios Urbanos de la Universidad Nacional de Colombia, 2016).

Un elemento indispensable para la movilidad, y en consecuencia para el ordenamiento del territorio, es la adecuada conectividad entre sus distintos sectores. Las redes de infraestructura son las que garantizan esa comunicación física entre espacios y ante la necesidad de las instituciones públicas de tomar decisiones basadas en resultados objetivos, se formula el presente proyecto que pretende ser una guía para la priorización en la ejecución de propuestas de infraestructuras vial. La finalidad de esta metodología es evitar que se realicen obras incensurables y se malgasten los recursos escasos.

Para lograr lo anterior, se seleccionarán diferentes proyectos viales pensados para mejorar la conectividad y la movilidad en la ciudad de Bucaramanga, planteados en el Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010-2030 y en el Plan Maestro de Movilidad, Área Metropolitana de Bucaramanga 2011-2030 (Ley 1083 2006). Posteriormente se ajustará un modelo de asignación de tráfico para la ciudad de Bucaramanga, que requerirá la actualización (mediante técnicas de aforos) de la matriz origen-destino (O-D) desarrollada por la Universidad Industrial de Santander en el 2005. Asimismo, la priorización se realizará con escenarios futuros y mediante la jerarquización de indicadores de tráfico, que permitirán establecer los proyectos en infraestructura vial más convenientes, en términos de movilidad, para la ciudad.

Este artículo contiene un total de seis capítulos: el capítulo uno contiene los objetivos del proyecto, en el capítulo dos se presenta los conceptos que se consideran relevantes para la realización de la presente investigación, se incluye el modelo cuatro etapas, los indicadores más usados para la estimación de la matriz O-D, los algoritmos de asignación más comunes en la literatura y una descripción de los sistemas de información geográfica empleados para ajustar el modelo de transporte (ArcMap y TransCAD). El tres cuatro describe la metodología implementada para la priorización de los proyectos de infraestructura vial. En la sección cuatro se encuentran los principales resultados del modelo de tráfico y la priorización propuesta, finalmente el apartado seis corresponde a conclusiones y el siete a la bibliografía consultada.

Justificación

Para el 2015, Colombia contaba con una población de 48'747,708 habitantes, con 36'864,092 en zonas urbanas, es decir, el 75,6% de la población total. En consecuencia, los retos que enfrenta el país en materia de ordenamiento territorial son múltiples, dado que el crecimiento de las ciudades plantea un desafío tanto regional como nacional y obliga al Estado a concebir redefiniciones institucionales y territoriales que interrelacionen la geografía, los flujos reales de intercambios urbanos y las dinámicas políticas y de gobernabilidad (Instituto de Estudios Urbanos de la Universidad Nacional de Colombia, 2016, p.4).

Sin embargo, la sobrepoblación no es el único problema que enfrentan las ciudades, también han surgido ciudades dormitorio próximas a las grandes urbes que suman desplazamientos diarios al total. Se debe tener presente, además, la distribución dispersa de los usos del suelo, la falta de integración de los modos de transporte existentes, déficit de la malla vial y la existencia del automóvil como medio de movilidad preferido por los ciudadanos (Piraquive, 2014).

La ciudad de Bucaramanga no es ajena a esta realidad, en el Plan Maestro de Movilidad Bucaramanga 2010-2030 se hace el diagnóstico de los problemas estructurales que tiene la ciudad en materia de movilidad, entre los que se encuentran: demanda superior a la oferta, recursos limitados y condiciones geográficas que favorecen un crecimiento desordenado y expansivo que promueve la utilización del vehículo privado, requiriendo altísimas inversiones para la construcción de espacio vial.

Por otra parte, dentro de las problemáticas mencionados debemos resaltar que en el área metropolitana existen municipios dormitorio (Floridablanca, Piedecuesta y Girón) que de acuerdo al Plan Maestro de Movilidad Bucaramanga 2010-2030 generan y generarán flujos de viajes con una fuerte presión sobre la malla vial de Bucaramanga. Para el año 2018, según proyecciones realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), existen 528,610 habitantes en la ciudad, lo cual corresponde al 46% de la población total del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), para el 2010 este porcentaje era del 49%, esta reducción confirma la conurbación del territorio.

Dado que los recursos son limitados y la ciudad necesita infraestructura vial para mejorar la conexión interna y la accesibilidad a los municipios del área (como parte de la solución integral a la movilidad), la presente metodología se constituye en una herramienta fundamental para las instituciones responsables de la priorización de estas obras.

El enfoque que se aborda para jerarquizar los proyectos se relaciona con variables relevantes para el tráfico, como la reducción de la congestión, ganancia en tiempos de viaje, mejora en los niveles de servicio, etc. Sin embargo, hay variados criterios para establecer la priorización definitiva en proyectos de tanta envergadura (no todos se consideraron en el desarrollo de la presente investigación, porque desborda el alcance de la misma), entre los que se encuentran (Durán, 2007):

- Aspectos socio-económicos (razón beneficio-costos)
- Seguridad (tasa de accidentabilidad)
- Factores humanos y medioambientales (trazo de ruta por zonas protegidas)
- Planeación (permisos de construcción)

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar la pasantía de investigación en el grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas, con el propósito de ajustar el modelo de asignación de tráfico utilizado en la ciudad de Bucaramanga para la priorización de proyectos viales.

1.2 Objetivos Específicos

- Ajustar la red actual de transporte de Bucaramanga adaptando los elementos existentes mediante la verificación del trazado vial de acuerdo a la infraestructura actual.
- Efectuar la actualización de la matriz de viajes de Bucaramanga con base en aforos existentes e información secundaria como datos demográficos y crecimiento del parque automotor.
- Comparar diferentes modelos de asignación de tráfico, para determinar cuál de ellos se ajusta a las condiciones de oferta y demanda de Bucaramanga.
- Estimar el impacto en la movilidad vehicular por la implementación de nuevos proyectos de infraestructura vial que brinden mayor conectividad para el municipio de Bucaramanga, según los proyectos definidos en el Plan de Ordenamiento Territorial de segunda generación del Municipio de Bucaramanga 2014-2027 y en el Plan Maestro de Movilidad de Bucaramanga 2010-2030.

2. Marco de referencia

En este capítulo se presentan las temáticas y conceptos que hicieron posible la elaboración de este proyecto.

2.1 Modelación del tráfico

El enfoque de modelación clásico parte por considerar una red de transporte, una zonificación apropiada del área de estudio, y la recolección y codificación de datos de carácter socio-económicos, tanto para la calibración y validación de los modelos como para su uso en modalidad predictiva (Ortúzar, 2000). A partir de esto, propone cuatro etapas para estimar un modelo de transporte que se ajuste a las condiciones reales del área de estudio. Estas son:

2.1.1 Generación de viajes. Con los datos obtenidos inicialmente, típicamente de una encuesta origen-destino, se pueden estimar modelos que permitan predecir el total de viajes generados y atraídos por cada zona (Ortúzar, 2000). Sin embargo, el proceso de generación puede provenir de la actualización de una matriz antigua de viajes, cuya construcción se deba a encuestas o algún otro método directo de estimación de la demanda.

2.1.1.1 Actualización matriz O-D Como es oneroso (en términos de tiempo, personal y recursos económicos) obtener una matriz de demanda mediante mediciones directas (entrevistas o encuestas), surgen a finales de la década de los 70's estudios orientados a obtener con un menor consumo de costos nuevas matrices, estas investigaciones se pueden dividir ampliamente en enfoques basados en modelos de tráfico (ejemplo: maximización de la entropía con trabajos de Wilson, Van Zuylen y Willumsen, entre otros) y enfoques basados en inferencias estadísticas (ejemplo: método de mínimos cuadrados generalizados) (Wong et al., 2005).

La idea básica de estas propuestas consiste en estimar los valores de las celdas de una matriz (T_{ij}) de tal forma que el siguiente conjunto de restricciones sea satisfecho (Bocanegra, 2005, p.10):

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} * P_{ij}^a \text{ para } a \in A$$

Donde:

V_a = Volumen de tránsito observado en el arco a

T_{ij} = Número de viajes de la zona i hacia la zona j

P_{ij}^a = Proporción de viajes de i a j que utilizan el arco a

A = Conjunto de arcos para los cuales existen aforos

A partir de este planteamiento se desarrollaron enfoques que buscan introducir algún tipo de estructura en la matriz de viajes. El más utilizado en aplicaciones prácticas toma el concepto de maximización de la entropía. En su esencia, la maximización de la entropía busca alcanzar el estado más probable de un determinado sistema, respetadas algunas condiciones establecidas exógenamente. Así, en el caso de la actualización de matrices de viajes, cuando se impone una estructura a la matriz que satisfaga la condición de maximización de entropía, se busca determinar el conjunto más probable de (T_{ij}) que satisfaga las condiciones de la ecuación (1) (Bocanegra, 2005).

2.1.1.1.1 *Indicadores de ajuste en la actualización de matriz la O-D.* Se tienen diferentes indicadores para determinar el nivel de ajuste en el proceso de actualización de matrices O-D, dos de los más usados son:

Gráfico de dispersión: El gráfico contiene los valores asignados en el modelo (eje Y) vs los valores registrados en campo (eje X). Si todos los flujos modelados coincidieran perfectamente con los conteos en campo, el coeficiente de determinación (R²) sería 1.00 y los puntos en el gráfico coincidirían con la línea de pendiente uno (línea de 45 grados). Los puntos por encima de la línea de 45 grados son ubicaciones donde el modelo sobreestima el tráfico. Del mismo modo, los puntos debajo de la línea de 45 grados son lugares donde el modelo subestima el tráfico (Des Moines Area, 2006). Se recomienda que el R² sea mayor a 0.88 (Des Moines Area, 2006) (Capital Area Metropolitan Planning Organization [CAMPO], 2013) y la pendiente a 0.97 (Ortúzar, 2011).

La fórmula de R² se expresa a continuación como (CAMPO, 2013, p. 40):

$$R^2 = \left(\frac{n \sum(x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \right)^2$$

Donde:

x: valores registrados en campo

y: valores asignados en el modelo

n: números de registros en campo

Estadístico GEH: El estadístico GEH recibe su nombre de Geoffrey E. Havers (quien lo propuso en la década de 1970). Es una formula empírica que ha demostrado ser útil para una variedad de propósitos de análisis de tráfico. Se define como (Ortúzar, 2011, p. 386):

$$GEH = \sqrt{\frac{(O_i - E_i)^2}{0.5 * (O_i + E_i)}}$$

Donde:

O_i : Valores observados

E_i : Valores estimados para una variable i

En términos generales, entre el 60% y el 85% de los volúmenes en un modelo de tráfico deben tener un GEH menor a 5.0 (Ortúzar, 2011, p. 386). Un GEH en el rango 5.0-10.0 indica un ajuste moderado que valida la investigación (Ortúzar, 2011, p. 386) (Cuellar, 2016, p. 136).

2.1.2 Distribución de viajes. La siguiente etapa del modelo es proceso mediante el cual se determinan las zonas de origen de los viajes relacionados con un destino, y los destinos de los viajes generados en un origen. Existen diversos métodos para realizar esta distribución que se pueden agrupar en dos grandes grupos (González y Sarmiento, 2009, p. 200):

2.1.2.1 Modelos análogos o de factor de crecimiento. Se fundamentan en el supuesto que la distribución de viajes futura será similar a la actual, siendo afectada por unos factores que representan el crecimiento previsto para las diferentes zonas, con el fin de obtener el número futuro de viajes entre ellas con base en la información de la matriz O-D del año base.

2.1.2.2 Modelos sintéticos. Estos modelos sintéticos obtienen de las matrices O-D actuales, una serie de características de los viajes, a partir de los cuales puede predecir la distribución futura de ellos. Uno de los métodos sintéticos más usado para distribuir los viajes en las diferentes zonas es el modelo gravitacional.

2.1.2.2.1 *Modelo gravitacional.* El modelo gravitacional se construye usando una analogía a la ley de gravitación universal de Newton, en el cual se supone que el número de viajes entre el origen “p” y el destino “q” es proporcional al número total personas que abandonan “p” y al número total de personas que llagan a “q”, y que es inversamente proporcional al cuadrado del costo generalizado “C_{pq}” al viajar de “p” a “q”, esto es (Chávez, 2014):

$$V_{pq} = \frac{T_p * T_q}{C_{pq}^2}$$

Donde:

V_{pq} : viajes del origen “p” al destino “q”

T_p : total de viajes que salen del origen “p”

T_q : total de viajes que llegan al destino “q”

C_{pq}^2 : costo generalizado al viajar de “p” a “q”

Este modelo se puede generalizar introduciendo una función que depende del costo (Chávez, 2014, p.13):

$$V_{pq} = \alpha * T_p * T_q * f(C_{pq})$$

Esta función depende de la función de disuasión f(C_{pq}) puede tener las siguientes formas (Chávez, 2014, p.13):

Exponencial: $f(C_{pq}) = e^{-\beta c_{pq}}$

Polinomial: $f(C_{pq}) = C_{pq}^{-n}$

Combinación de funciones: $C_{pq}^n e^{-\beta c_{pq}}$

2.1.3 Selección modal. En esta etapa se estima la forma cómo se reparten los viajes entre los distintos modos de transporte disponibles para cada tipo de persona (Ortúzar, 2000).

2.1.4 Asignación a la red. La última fase corresponde a la selección de las trayectorias de viaje entre orígenes y destinos, y a la estimación de los flujos resultantes en cada uno de los enlaces de la red (Instituto Mexicano del Transporte, 2015). Existen diversos modelos matemáticos para la asignación del tráfico en una red de transporte, los más usados son:

2.1.4.1 Método de asignación todo o nada. Este enfoque asigna los flujos vehiculares a la red siempre en la ruta más corta (en términos de distancia o tiempo) para unir un origen a un destino. Este criterio se usa en redes con poca o nula congestión o cuando la operación vehicular es muy controlada, como pasa en las redes ferroviarias. Este es el criterio del modelo para flujos ferroviarios (Instituto Mexicano del Transporte, 2015, p. xiv).

2.1.4.2 Equilibrio del usuario (EU). Utiliza un proceso iterativo para alcanzar una solución convergente, en la cual no es posible mejorar el tiempo de viaje al cambiar de ruta; en cada iteración, los flujos en los arcos de la red son computados incorporando el efecto de las restricciones de capacidad y la dependencia entre el tiempo o la demora y el volumen de tráfico; el problema de equilibrio de usuario es resuelto aplicando el algoritmo de Frank-Wolfe (Gabriel y Jaimes, 2010, p. 78). En la solución, para cada par O-D, el tiempo de viaje en todos los caminos usados es igual, y también menor que o igual al tiempo de viaje que experimentaría un solo usuario por cualquiera de los caminos no utilizados. La definición anterior implica que los conductores tienen información completa (es decir, conocen el tiempo de viaje en todas las rutas posibles) y

que consistentemente toman la decisión que más les conviene en relación con su elección de ruta (Bocanegra, 2005, p.14).

2.1.4.3 Equilibrio del usuario estocástico (SUE). Asume que los viajeros no tienen información perfecta acerca de los atributos de la red y/o que perciben los costos de viaje de diferentes maneras. SUE permite el uso de rutas menos atractivas, así como de las más atractivas. Las rutas menos atractivas tendrán menor utilización, pero no tendrán flujo igual a cero, como tendrían bajo UE (Bocanegra, 2005, p.15).

2.1.4.4 Equilibrio del sistema (ES). Se plantea la necesidad de convencer o motivar a algunos de los usuarios de la red para que utilicen ciertas rutas que no serían precisamente las mejores para sus tiempos, a fin de obtener el objetivo global de minimizar el costo total de los recorridos. La congestión se reduciría siempre que los usuarios de la red sean informados de las rutas que deberían usar. La aplicación práctica de este enfoque requiere de medidas externas implantadas por el administrador de la red. Una medida comúnmente sugerida es la tarificación de algunas rutas (Instituto Mexicano del Transporte, 2015, p. 37)

2.2 Función volumen-demora

Los métodos de asignación por equilibrio utilizan en sus formulaciones matemáticas funciones volumen-demora, $f_a(u)$, que miden los aumentos en el tiempo de viaje, a medida que el volumen de vehículos u que usan la ruta aumenta, logrando así una representación de la congestión en la red (Instituto Mexicano del Transporte, 2015, p. 38).

La función BPR (la sigla hace alusión a sus desarrolladores, Bureau of Public Roads) es la más usada y recomendada por la literatura y tiene la siguiente expresión (Castillo, et al., 2010):

$$t_k = t_{k,ff} \left(1 + \alpha_k \left(\frac{x_k}{q_k} \right)^{\beta_k} \right)$$

t_k : tiempo de viaje del elemento k-ésimo de la red

$t_{k,ff}$: tiempo de flujo libre del elemento k-ésimo de la red

x_k : flujo vehicular por el elemento k-ésimo de la red

q_k : capacidad del elemento k-ésimo de la red

α, β : parámetros que ajustan la función de costo del elemento k-ésimo de la red

2.3 Capacidad vehicular

Se expresa en términos del máximo número de vehículos que pueden cruzar una sección o tramo dado, es una función de las características geométricas de la carretera, la composición y distribución del tránsito y el entorno de la vía (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2005, p. 1).

Se puede calcular con base en la formulación del *Highway capacity manual 2000*, que se expresa en la siguiente ecuación:

$$Sf_i = 1600 (v/c)_i f_d f_w f_{HV}$$

En donde:

Flujo saturación: 1600 vehículos/hora/carril, valor tomado para la ciudad de Bucaramanga (Castillo, et al., 2010).

$(v/c)_i$: estimada como la relación entre vehículos equivalentes y la capacidad teórica propuesta (1600 vehículos/hora/carril).

f_d : factor de distribución direccional, es el porcentaje de vehículos equivalentes en la dirección de análisis.

f_w : $0.278 W + 0.147 H - 0.279$, factor de ajuste por carriles (W) y bermas angostas (H). W debe ser menor o igual a 3.65 m, porque el procedimiento considera que estos carriles son angostos y tienen efecto sobre la reducción de la capacidad.

f_{HV} : $1 / [(1 + P_T(E_T - 1) + P_B(E_B - 1))]$, factor de ajuste por vehículos pesados. $P_{T,B}$: porcentaje de camiones y buses en el flujo vehicular del elemento de análisis. $E_{T,B}$: equivalente de camiones y buses, para camiones 2.5 y para buses 2.0 (APP Accesos Norte de Bogotá [ACCENORTE], 2016).

2.4 Sistema de información geográfica

La implicación geográfica del transporte obliga necesariamente al análisis espacial, existen herramientas computacionales conocidas como Sistemas de Información Geográfica (SIG) que brindan ese soporte y sirven para: realizar el registro geográfico de variables, el manejo integrado y espacial de la información y la representación gráfica de resultados (Durán, 2007).

Este proyecto hizo uso de dos sistemas de información geográfico: ArcMap 10.5 y TransCad 5.0. Se eligió ArcMap 10.5 para el ajuste de la geometría e información de los elementos viales, porque un software amigable para la edición.

TransCAD 5.0 fue el programa elegido para modelar el tráfico urbano de la ciudad, dado que tiene incorporadas las cuatro etapas tradicionales de modelación de demanda: generación de viajes, distribución de viajes, selección modal y asignación de flujos. Adicionalmente, es capaz de leer diferentes tipos de archivos asociados a SIG, lo que facilitó la importación de la malla editada en

ArcMap 10.5. También en términos de modelación, TransCAD cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario acceder a cada una de las etapas del proceso de modelación. Cada etapa tiene ecuaciones típicas asociadas, de manera que el usuario puede incorporar los coeficientes de las ecuaciones correspondientes o introducir los valores mediante una planilla de cálculo (Castro, *et al.*, 2017)

3. Método

En este capítulo se describe la metodología implementada en este proyecto, la componen tres secciones generales: el modelo de oferta, la estimación de la demanda y la simulación oferta demanda (figura 1).

3.1 Modelo de oferta

En términos de oferta se necesitaba una red que representara por medio de líneas y nodos (cumpliendo el principio de conectividad nodo-línea) la infraestructura vial de la ciudad (Geometría), además debía contener la información actualizada de los atributos para cada elemento vial que permitieran modelar las condiciones reales de oferta de la ciudad.

3.1.1 Geometría. Este proyecto inició con la actualización en ArcMap 10.5 de una red base de la ciudad de Bucaramanga, desarrollada por el grupo de investigación Gestión y Optimización de sistemas (GEOMATICA). Se corrigieron los desfases que presentaban varios

elementos viales respecto a la imagen satelital de trabajo (adquirida en el convenio interadministrativo UIS – AMB 289 de 2016), esto se presentó porque posiblemente la malla se dibujó en coordenadas geográficas diferentes a las de la imagen de referencia, que son WGS 84. Además, se realizó el dibujo de todos los tramos viales faltantes (producto de nuevas construcciones o modificaciones). Finalmente se hizo una revisión topológica, con la herramienta Topology de ArcMap 10.5, para corregir errores geométricos como: líneas superpuestas, nodos colgantes y pseudonodos. El programa tiene diversas reglas predefinidas (para polígonos, líneas y puntos) las cuales no se aplican por defecto sino por elección del usuario según las necesidades. En este trabajo se usaron las siguientes: Must Not Overlap (para evitar líneas superpuestas), Must Not Intersect (para evitar líneas que se cruzan), Must Not Have Dangles (Para identificar nodos que contienen una sola línea) y Must Not Have Pseudo Nodes (para identificar nodos con solo dos líneas).

3.1.2 Conectores y centroide. Los centroides y conectores también hacen parte de la geometría de la red, pero son representaciones simbólicas de la forma en la que se ingresa a la oferta vial. Estos elementos se obtuvieron en TransCAD, con una configuración de un centroide y cinco conectores por zona, a una distancia de 5 km que representa el rango máximo de conexión entre estos elementos y la malla vial.

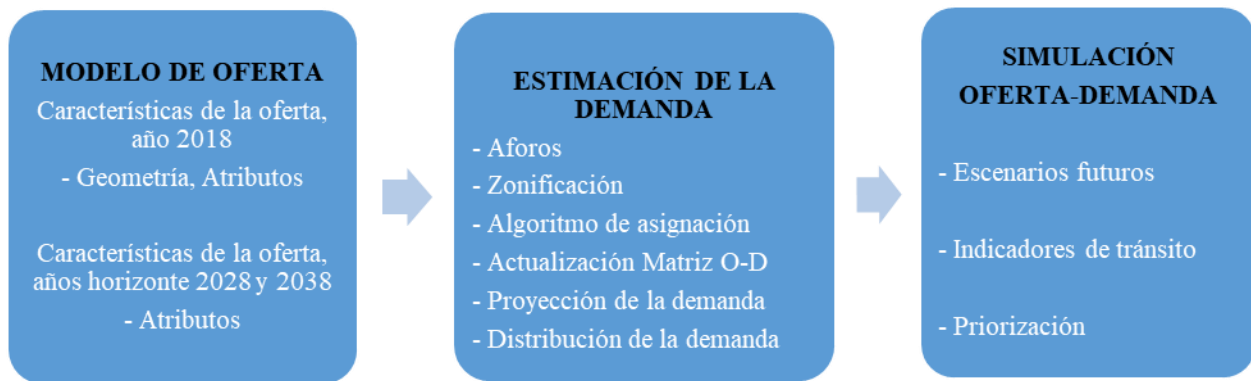


Figura 1. Metodología implementada, priorización de proyectos

3.1.3 Atributos. Se actualizaron los siguientes atributos de los elementos viales, tanto para el año base (2018) como para los años proyectados (2028 y 2038): longitud, velocidad de operación, tiempos a flujo libre, alfa y beta, precarga y capacidad.

La longitud se calculó en kilómetros (en ArcMap 10.5), lo cual implicó pasar de las coordenadas geográficas WGS84 a las coordenadas planas MAGNA Bucaramanga Santander 2008 (sistema adecuado para el cálculo de longitud). Las velocidades de operación se determinaron con velocidades de diseño estipuladas en el Plan Maestro de Movilidad Área Metropolitana de Bucaramanga 2011-2030 (tabla 1), de acuerdo a la jerarquía funcional de las vías. Los tiempos a flujo libre de la red se calcularon como la relación entre la longitud y la velocidad de operación. Los parámetros para la función BPR se obtuvieron de acuerdo Fehr y Peers (2010) (tabla 2). Para la precarga se usó un porcentaje de los vehículos registrados en campo, el 5% fue el valor que mejor favoreció a la actualización de la matriz O-D y finalmente, la capacidad se estimó con características geométricas (ancho de carril) y de tránsito (conteos vehiculares) de los elementos viales, haciendo uso de la expresión matemática del Highway capacity manual 2000, luego se

ajustaron esos valores con el proceso iterativo de actualización de la matriz O-D. La capacidad de los elementos correspondientes a los nuevos proyectos se determinó con un valor teórico de 1600 vehículos/hora/carril (Castillo, et al., 2010).

Tabla 1.
Velocidad de diseño

Jerarquía Vial	Velocidad de diseño Kph
Primaria	60
Secundaria	50
Terciaria	40
Local	20

Nota: * Área Metropolitana de Bucaramanga. (2011). Plan Maestro de Movilidad. Recuperado de https://www.amb.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=283:plan-maestro-de-movilidad&catid=80:ciudadanos&lang=en

Tabla 2.
Parámetros alfa-beta función BPR

Jerarquía Vial	Alfa	Beta
Vía Principal	0.78	2.5
Vía Primaria	0.7	4
Vía Secundaria	0.4	5.5
Vía Terciaria	0.78	3.8
Vía Local	0.78	3.8

Nota: * Fehr & Peers Transportation Consultants. (2010). Mendocino county travel demand model, user's guide. Recuperado de <http://www.mendocinocog.org/pdf/MCOG%20Travel%20Model-User%20Guide.pdf>

3.2 Estimación de la demanda

En términos de demanda se requería información del volumen vehicular actual de la ciudad (aforos) para poder actualizar la matriz O-D. También se debía ajustar la zonificación y el algoritmo de asignación, elementos fundamentales para el modelo de demanda. Finalmente, para

poder evaluar los escenarios futuros se necesitó proyectar la demanda de viajes del año 2018 a los años meta.

3.2.1 Aforos. Se decidió realizar conteos vehiculares en campo porque no existía información actual, en el grupo de investigación GEOMÁTICA, para el alcance de este proyecto, es decir, se tenían conteos del 2017 (relativamente recientes) realizados para otros proyectos, pero no abarcaban la totalidad del área en estudio (Bucaramanga) y no se hicieron en intersecciones con presencia de vías arteriales, que es donde se presentan los volúmenes vehiculares máximos, necesarios para este proyecto. En la tabla 3 se observan las direcciones de los puntos seleccionados y en la figura 2 su ubicación espacial.

Tabla 3.

Intersecciones aforadas

Dirección
Carrera 33 con Calle 56
Avenida González Valencia CLz con Carrera 27
7 Bocas (Avenida González Valencia CLz con Calle 48)
Avenida Quebrada Seca con Carrera 33a (Megamall)
Glorieta Parque San Francisco
Carrera 33 con Calle 45
Carrera 9 con Calle 45
Intercambiador Vial La Puerta del Sol
Transversal Metropolitana con Calle 105
Plaza Mayor, Real de Minas
Puente de Provenza
Glorieta Novena
Puente Bueno



Figura 2. Intersecciones aforadas Bucaramanga

Sin embargo, los aforos previos del grupo sirvieron para analizar y establecer la hora punta o pico de la ciudad, hora en la que se decidió hacer los nuevos aforos, dado que en esta franja de tiempo se presentan los volúmenes máximos del día. Para este análisis se eligieron los conteos del año 2009 y 2017, porque eran los únicos que contaban con registros en una franja de tiempo amplia, es decir, son conteos que se hicieron a lo largo de días hábiles típicos (de martes a jueves), desde las 5:30 a las 20:00 horas. Con esta información se pudo establecer que la hora de máxima demanda para la ciudad se ha modificado, pasó de ser de 11:30 a 12:30 (figura 3) en el año 2009 a estar desde las 18:30 a las 17:30 en el 2017 (figura 4). Por la anterior, los conteos vehiculares de este proyecto se realizaron de las 18:30 a las 17:30.

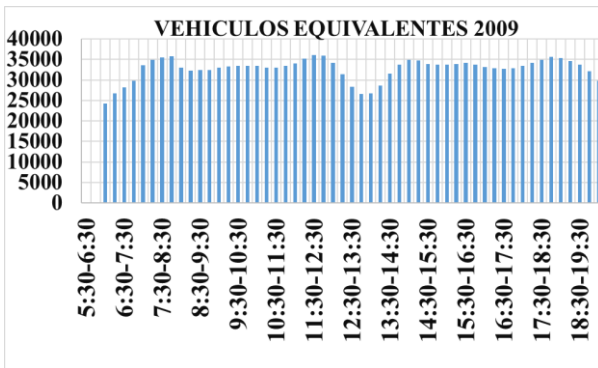


Figura 3. Vehículos equivalentes 2009

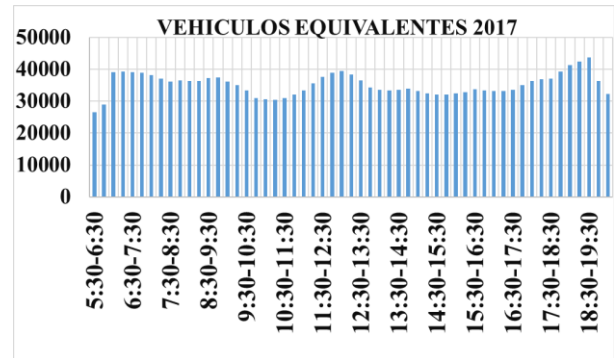


Figura 4. Vehículos equivalentes 2017

Los equipos utilizados para el levantamiento de la información fueron: dos cámaras Cámara GoPro Hero 5 Black y un dron DJI PHANTOM 4 PRO (figura 5), ambos hacen parte del inventario del grupo GEOMÁTICA.



Figura 5. Equipo utilizado para el levantamiento

3.1.2 Zonificación. La zonificación para un proyecto de transporte se debe entender cómo, la división geográfica del territorio en polígonos homogéneos, derivada del comportamiento de la generación o atracción de viajes (Durán, 2007). En este proyecto la división geográfica de la ciudad se estableció con base en los sectores urbanos propuestos por el DANE, estos representan divisiones cartográficas equivalentes a un barrio y comprenden entre una (1) a nueve (9) secciones,

que contienen datos sociales, económicos, culturales, institucionales y ambientales (figura 6) (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2009, p. 43).

Estos sectores urbanos los formuló el DANE en el año 2005, han pasado 18 años y la ciudad de Bucaramanga tiene nuevas construcciones y asentamientos, que a su paso generaron nuevas vías, para incluir estos nuevos elementos viales en el análisis de tráfico se hizo necesario ampliar las zonas originales, como se muestra en la figura 7.

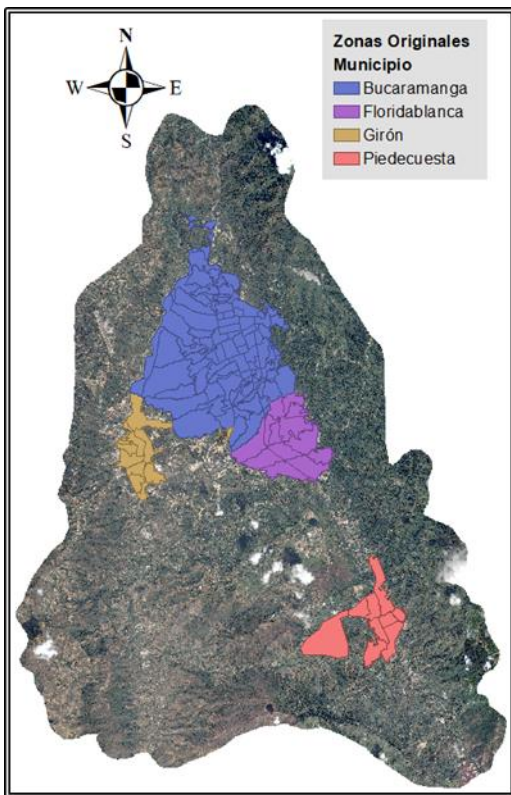


Figura 6. Zonas Originales

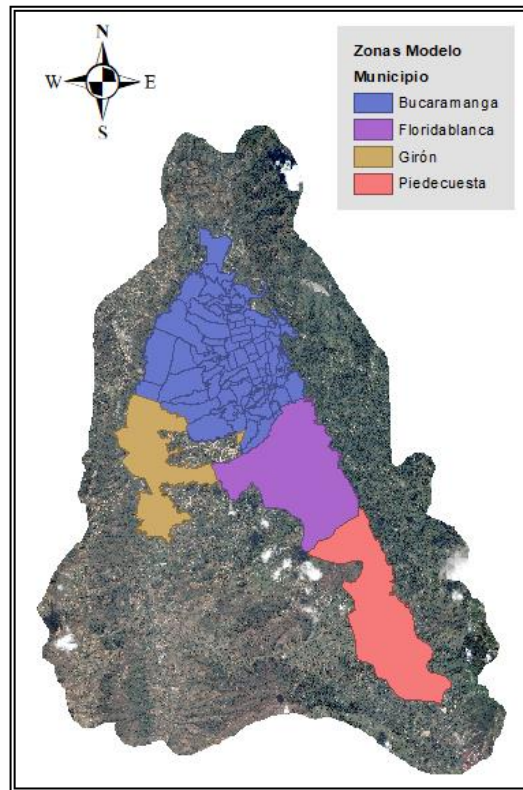


Figura 7. Zonas Modelo

Además, como la infraestructura de la ciudad es usada por una parte de la demanda de los municipios vecinos (Floridablanca, Piedecuesta y Girón), entonces se decidió tener presente estos flujos, es decir, los viajes con origen en estos municipios y destino Bucaramanga junto con los

viajes con origen en Bucaramanga y con destino a estos municipios se anexaron a la matriz O-D. Para conectar este tránsito se dejaron las vías principales de estas municipalidades y sus zonas urbanas se sumaron para dejar una por jurisdicción. Entonces, se pasó de tener 129 zonas para Bucaramanga y sus municipios vecinos a 100 zonas para todo el modelo.

3.2.3 Algoritmo de asignación. Para seleccionar el algoritmo de asignación se hizo inicialmente una revisión de los más usados y recomendados en la literatura.

De esta consulta se determinó trabajar inicialmente con el método “Equilibrio del usuario estocástico”, porque es el algoritmo con consideraciones más realistas sobre la forma en que los usuarios seleccionan las rutas, tal como se expuso en el marco de referencia de este proyecto, además se encontró que este método ha sido utilizado en otros trabajos aplicados en el área metropolitana de Bucaramanga, como ejemplo se tiene la investigación desarrollada por Castillo, Martínez y Porras (2010).

Sin embargo, en el proceso iterativo de actualización de la matriz O-D, se evidenció que los flujos asignados con el método Equilibrio del Usuario presentan un mayor ajuste con los volúmenes registrados en campo. Por ejemplo, con la malla y la demanda actual de la ciudad este algoritmo tiene el 41,9% de los volúmenes con un GEH inferior al 5%, mientras que con el método de Equilibrio del Usuario Estocástico este valor es de 39,8%. Lo anterior posiblemente se deba a que los usuarios en la ciudad se inclinan por las vías más atractivas, que son las que tienen los menores tiempos de viajes, entonces a partir de esto se decidió realizar el modelo de asignación de la ciudad de Bucaramanga con el algoritmo “Equilibrio del Usuario”, su funcionamiento básico se expone en el apartado de algoritmos de asignación del marco de referencia.

3.2.4 Actualización Matriz Origen-Destino. El punto de partida para la actualización de la matriz O-D fueron tres matrices semilla desarrolladas por la UIS en el año 2005 (Castillo, et al., 2010), una correspondiente a viajes privados, otra de viajes de carga y una de transporte público. Estas matrices son cuadradas de 129x129. Para el modelo se decidió trabajar con una matriz semilla o inicial producto de la suma de estas tres matrices originales y cuya dimensión se redujo, por el ajuste a las zonas de asignación como se expuso en el apartado de zonificación, a 100*100. Esta matriz semilla es fundamental porque suministra los volúmenes vehiculares con los que se inicia el proceso de iteración que busca obtener la matriz de viajes actual, sin esta información (sin matriz semilla) se debe construir una matriz con valores positivos pequeños (como 0,1 o 0,01) para poder iterar y alcanzar la matriz estimada (Caliper Corp, 2008), sin embargo, en redes grandes (como la de Bucaramanga) es indispensable una matriz semilla o inicial, para disminuir la brecha entre los flujos vehiculares medidos y los flujos vehiculares estimados, tal como lo sugiere Khan y Anderson (2016).

Con esta entrada (Matriz O-D semilla), junto con los datos actualizados de la red de tránsito y la malla de la ciudad ajustada, se procedió a realizar el proceso iterativo en el software de modelamiento. Con los resultados de este proceso (matriz O-D estimada y volúmenes vehiculares asignados) la actualización de la matriz O-D consistió en comparar, para los elementos con intersecciones aforadas, los flujos vehiculares asignados en cada iteración con los flujos registrados en campo, si se presentaba sobreestimación o subestimación de los flujos vehiculares asignados con respecto a los registrados en campo, se modificaban los viajes o celdas de la matriz O-D semilla que hacían uso de estos elementos viales (los aforados), para identificar estas celdas se creó un archivo de rutas con los viajes de la matriz O-D. Lo anterior facilitó la calibración de la matriz de demanda actual.

También fue necesario, en la actualización de la matriz O-D, crear una tabla de penalidades para prohibir los giros (establecidos por la ciudad) en algunas de las intersecciones que tenían elementos de control o donde la magnitud de los flujos asignados discrepaba en gran magnitud con los registros en campo. Esta tabla aportó al modelo realidad, sin embargo, no se pudo tener una completa para la ciudad por el trabajo en oficina y en campo que esto representaba, pero de forma general se restringieron los giros en ‘U’ porque en la ciudad la mayoría de estos giros son prohibidos.

Se finalizó el ajuste de la matriz O-D cuando se cumplió con los criterios del gráfico de dispersión y los GEH estaban en rangos válidos para la investigación, como se expuso en la sección de actualización de la matriz O-D del marco de referencia.

3.2.5 Proyección y distribución de la demanda. Para poder modelar los escenarios futuros se proyectaron y distribuyeron los viajes de la matriz del año base a 10 años y 20 años. A 10 años porque el alcance de los Planes Maestros de Movilidad, tanto para Bucaramanga como para el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), se vencerán aproximadamente en ese periodo (año 2030), en estos primeros 10 años de análisis se pretende evaluar la eficacia de cuatro de los proyectos más importantes planteados en estos documentos, estando aún en la proyección realizada por los mismo. Además, se hace el análisis a 20 años para establecer la viabilidad, en términos de demanda, de estas mismas cuatro propuestas.

3.2.5.1 Proyección de viajes futuros. La proyección de los viajes actuales de la matriz O-D 2018 se hizo mediante dos variables explicativas de la generación y atracción de viajes, el crecimiento poblacional y el crecimiento del parque automotor (Durán, 2007). Además, como los

viajes de la ciudad se ven afectados por los viajes de los municipios vecinos, se tuvo en cuenta la población y el parque automotor de estas municipalidades.

La información de población se tomó de la base de datos del DANE, donde se tiene una proyección de la población en Colombia hasta el año 2020. Como se estableció modelar la demanda para el año 2028 y 2038, entonces, por medio de una regresión, se determinó la población hasta el año 2038.

El incremento del parque automotor se obtuvo de los documentos técnicos de la Dirección de Tránsito de Bucaramanga (los registros son del 2015 a 2017), se incluyó el aporte de los vehículos del área metropolitana. Con esta información se realizó una regresión para estimar los valores de esta variable en los años futuros.

Con estos datos se calculó el factor de crecimiento por año futuro, utilizando la siguiente fórmula (Girardotti, 2001):

$$F_i = \frac{P_i^n * M_i^n}{P_i^o * M_i^o}$$

Donde:

P_i^n : población futura

M_i^n : motorización futura

P_i^o : población año base

M_i^o : motorización año base

Finalmente, los viajes futuros fueron el resultado de multiplicar los viajes de la matriz O-D estimada para el año 2018 y los factores de crecimiento.

3.2.5.2 Distribución de viajes futuros. La distribución futura de los viajes se hizo aplicando el modelo gravitacional, para lo cual se usó TransCAD 5.0 que tiene incorporado el

método. El programa requiere de las siguientes entradas, que se pueden obtener también del software:

3.2.5.2.1 Matriz de impedancia. El valor de cada celda representa el costo de viajar de un determinado origen a un determinado destino, para este modelo se utilizó el tiempo a flujo libre como criterio para su construcción, dado que esta variable es una de las más importantes para los viajeros (Castillo, et al., 2010).

3.2.5.2.2 Proyección de viajes futuros. Se obtuvieron, como se explicó anteriormente, al aplicar un factor de crecimiento a los viajes de la matriz del año base (2018).

3.2.5.2.3 Función de impedancia. Representan la resistencia a la movilidad entre cada par de zonas, para este modelo se escogió la función Gamma porque es la que comúnmente se utiliza para calcular los factores de fricción y además es considerada la más fácil de calibrar (Illinois Model Users Group [ILMUG], s.f).

3.2.5.2.4 Matriz de factores de fricción. Esta matriz se obtiene a partir de la matriz de costos y de los parámetros de la función Gamma, el valor de cada celda representa la resistencia a la movilidad cuando aumenta la impedancia o costo entre dichas zonas (Vozzi y Acquaviva, 2011).

Finalmente, con estas entradas se aplicó el modelo de gravedad. El resultado de la ejecución es la distribución gravitacional de los viajes futuros en matices de 100*100.

3.2.6 Simulación Oferta-Demanda. Con las matrices proyectadas y distribuidas junto con la red de transporte actualizada se realizó la asignación de los viajes futuros para evaluar el comportamiento de la oferta-demanda en los diferentes escenarios propuesto.

3.2.6.1 Escenarios de simulación. Los escenarios se formularon a 10 y a 20 años, por las razones expuestas iniciando este capítulo de Proyección y Distribución de la Demanda, asimismo se escogieron cuatro proyectos de infraestructura vial planteados en el Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010-2030 y en el Plan Maestro de Movilidad, Área Metropolitana de Bucaramanga 2011-2030. Son proyectos que a la fecha no están construidos, ni en proceso de construcción y que se plantean como proyectos de infraestructura para brindar mayor conectividad a la ciudad de Bucaramanga.

En las tablas 4 y 5, se detallan las características geométricas y de funcionalidad de los proyectos viales seleccionados. Además, en la figura 8 se visualiza el trazado propuesto para estos proyectos.

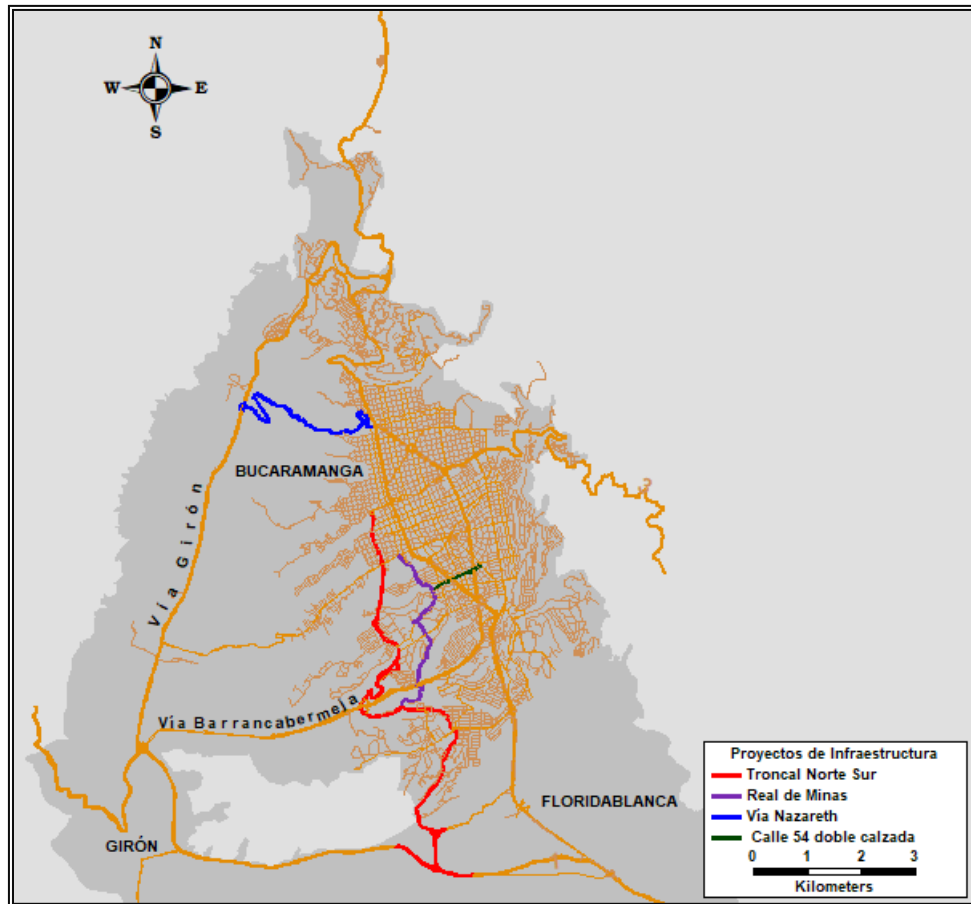


Figura 8. *Proyectos de infraestructura vial, Bucaramanga Santander*

Tabla 4.

Características de funcionalidad

Proyecto	Prioridad	Jerarquía vial
Vía Nazareth	Grupo 1	Primaria
Troncal Norte Sur	Grupo 1	Secundaria
Calle 54 doble calzada	Grupo 1	Terciaria
Centro-Real de Minas	Grupo 3	Terciaria

Nota: * Área Metropolitana de Bucaramanga. (2011). Plan Maestro de Movilidad. Recuperado de https://www.amb.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=283:plan-maestro-de-movilidad&catid=80:ciudadanos&lang=en

Tabla 5.

Características geométricas

Proyecto	Documento	Perfil Vial
Vía Nazareth	PMMAMB	Tipo 6
Troncal Norte Sur	PMMAMB	Tipo 3
Calle 54 doble calzada	PMMBucaramanga	Tipo 6
Centro-Real de Minas	PMMAMB	Tipo 6

Nota: * Área Metropolitana de Bucaramanga. (2011). Plan Maestro de Movilidad. Recuperado de https://www.amb.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=283:plan-maestro-de-movilidad&catid=80:ciudadanos&lang=en

3.2.6.2 Indicadores de tránsito. Para evaluar la eficacia de una propuesta vial se usan indicadores de tráfico, que puede ser agregados, como el total de horas de viaje de los vehículos en la red (VHT) o la distancia total recorrida por los vehículos en la red (VMT), o desagregados, como el flujo vehicular, el tiempo de viaje y los niveles de servicio (LOS por sus siglas en inglés) para determinados corredores de control. Los corredores seleccionados tienen la misma conectividad y jerarquía vial que el proyecto vial en estudio, además de tener una relación flujo/capacidad superior a 0.75 con la demanda y oferta del 2018 (Castillo, et al., 2010).

3.2.6.3 Priorización. La comparación del escenario base (oferta vial 2018 y demanda 2028-2038) con los escenarios que contienen los proyectos propuestos (escenarios 2 al 5) se hizo mediante el cálculo de la reducción porcentual de los indicadores de tráfico y el orden de relevancia (de mayor a menor) seleccionado fue el siguiente: máxima reducción del VHT, del VDT, del tiempo de viaje y del flujo vehicular e incremento del nivel de servicio. Lo anterior permitió establecer la priorización de los proyectos viales que favorecerían a la movilidad de la ciudad de Bucaramanga.

4. Resultados

En esta sección se presentan los principales resultados de este proyecto.

4.1 Indicadores de calibración matriz O-D

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la verificación para la actualización de la matriz O-D se midió con el gráfico de dispersión y el GEH, a continuación, se visualizan los resultados.

4.1.1 Resultado grafico de dispersión. Para la matriz O-D actualizada año 2018, se obtuvo una pendiente de 0.97 y un $R^2 = 0.89$. Lo cual indica que la matriz estimada cumple las recomendaciones de la literatura. La grafica de dispersión para el modelo elaborado se presenta en la siguiente figura.

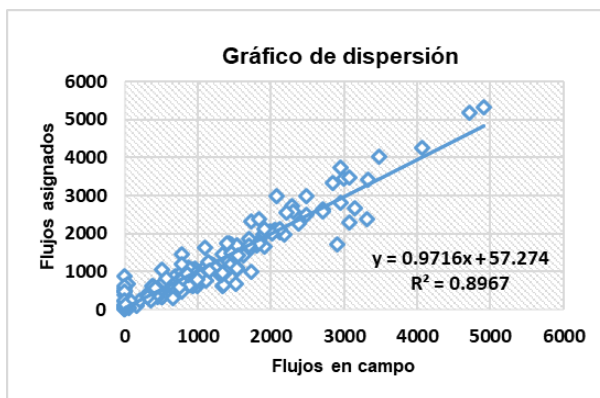


Figura 9. Gráfico de dispersión

4.1.2 Resultado estadístico GEH Con este indicador la matriz estimada O-D tiene un ajuste moderado, es decir, la mayoría de los elementos viales de control tiene un GEH inferior a 10 (el 81%, tabla 7), lo cual, según la literatura expuesta en el capítulo Marco de referencia en el apartado GEH, hace válida la investigación. En las tablas que se muestran a continuación, se observan los resultados de GEH para todos los elementos viales de control, clasificados en vías arteriales (vías primarias, secundarias y terciarias) y en vías locales.

Tabla 6.
Resultados GEH, vías arteriales y locales

RANGO	ARTERIAL Y LOCAL	%
0-5	93	49
5-10	45	32
10-20	37	27
20-30	7	5
30-40	7	5
40-50	1	1
5>50	2	1
TOTAL	190	119

Tabla 7.
Resultados GEH, vías arteriales

RANGO	ARTERIAL	%
0-5	80	58
5-10	35	25
10-20	18	13
20-30	5	4
30-40	1	1
40-50	0	0
5>50	2	1
TOTAL	139	100

Tabla 8.

Resultados GEH, vías locales

RANGO	LOCAL	%
0-5	13	25
5-10	10	20
10-20	19	37
20-30	2	4
30-40	6	12
40-50	1	2
5>50	0	0
TOTAL	51	100

De estas tablas se puede observar, que las vías arteriales tienen un mayor ajuste, el 58% de los volúmenes tienen un GEH inferior al 5, mientras que para las vías locales este porcentaje es del 25%. Sin embargo, como se está modelando un área grande (Bucaramanga) es favorable que las vías de mayor ajuste sean las arteriales.

4.2 Proyección y distribución de viajes futuros.

Los resultados de los viajes proyectados y distribuidos se encuentran en el anexo c. Sin embargo, a continuación se muestran las gráficas y las regresiones más relevantes, las cuales se ajustaron a las variables de población y motorización. Asimismo, en la tabla 11 se encuentran los factores de crecimiento utilizados en la proyección de viajes futuros.

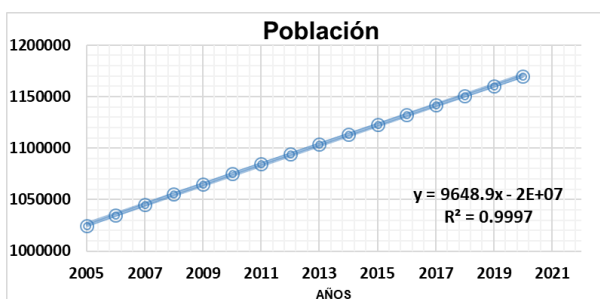


Figura 10. Crecimiento poblacional AMB

Tabla 9.

Porcentajes parque automotor AMB

Año	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta
2015	31%	27%	40%	2%
2016	31%	26%	41%	2%
2017	31%	25%	42%	2%

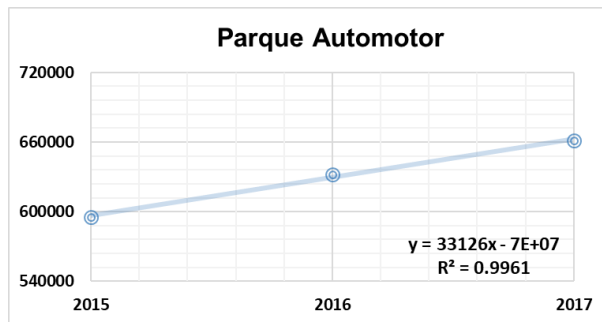


Figura 11. Crecimiento parque automotor AMB

Tabla 10.

Factores de crecimiento 2028-2038

Año	Población	Parque automotor	FC
2018	1'150,993	695,951	
2028	1'243,234	1'027,206	1.594
2038	1'347,286	1'358,461	2.285

4.3 Resultados indicadores de tráfico

Los resultados de los indicadores agregados del tráfico por escenario y por año de simulación se presentan en la tabla 12. En esta tabla se observa que el escenario 3 presenta las mayores reducciones en el total de horas de viaje de los vehículos en la red (VHT) y en la distancia total recorrida por los vehículos en la red (VMT), configurándose así, de acuerdo a la priorización

propuesta de los indicadores expuesta en el capítulo simulación oferta-demanda, en el proyecto de mayor jerarquía o importancia para la ciudad. El escenario 3 corresponde al proyecto Trocal Norte-Sur. También se puede observar que a 20 años este proyecto sigue presentando reducciones importantes en términos de VHT y VMT

En la tabla 13 se presentan los resultados más significativos con respecto a la máxima reducción de los tiempos de viaje de los corredores de control, por año y por escenario. De esta tabla se priorizan los tres proyectos faltantes. De acuerdo al orden de jerarquía de los indicadores, el segundo proyecto de mayor importancia para la ciudad debería ser el que tiene la máxima reducción en flujo vehicular y tiempo de viaje en su elemento de control, pero se observa que el escenario 2 a pesar de que presenta reducciones muy significativas en términos de estas variables, lo hace a 20 años, es decir, el proyecto en los 10 primeros años no aportaría en términos de movilidad a la ciudad, también se observa el caso del escenario 5, que a pesar de no tener la reducción máxima si presenta reducciones significativas (mayores al 50% en tiempos de viaje) en los dos periodos de tiempo evaluados, a 10 años y a 20 años, producto de este análisis se estableció que el segundo proyecto que más favorece a la ciudad, en términos de movilidad, es el escenario 5 que corresponde a la conexión alterna Cetro-Real de minas. El siguiente mejor proyecto lo constituye el escenario 2 (Tranversal Nazareth) y finalmente estaría el escenario 4 que corresponde a la doble calzada de la calle 54, de este último proyecto se puede decir que no es prioritario, dado que las reducciones que presenta en términos de congestión y flujos vehicular no son significativas.

Tabla 11.

Indicadores agregados por año y por escenario.

AÑO	INDICADOR	1	2	3	4	5	6
2028	VHT	209,251.4	209,457.8	155,339.8	205,376.4	206,512.6	148,177.3
	% VHT	---	-0.1	25.8	1.9	1.3	29.2
	VMT	793,875.2	794,652.4	801,929.6	791,202.7	787,446.8	792,100.2
	% VMT	---	-0.1	-1.0	0.3	0.8	0.2
2038	VHT	1'317,911.1	1'319,676.8	929,448.2	1'326,758.8	1'317,217.1	915,535.6
	% VHT	---	-0.1	29.5	-0.7	0.1	30.5
	VMT	1'194,341.8	1'196,205.1	1'207,990.9	1'188,734.8	1'179,387.7	1'183,509.0
	% VMT	---	-0.2	-1.1	0.5	1.3	10.2

Tabla 12.

Indicadores desagregados en los corredores de control.

ESCE	AÑO	PUNTO DE CONTROL	CONE	FLUJO (VEH/H) E1	FLUJO (VEH/H)	% REDU	T VIAJE (MIN) E1	T VIAJE (MIN)	% REDU	LOS E1	LOS
2	2028	Barranca-Bucaramanga	E-O	3,914.8	3,833.5	2.1	0.2	0.2	6.1	F	F
2	2038	Barranca-Bucaramanga	E-O	4,700.4	3,277.4	30.3	14.6	3.8	73.7	F	F
3	2028	CRA 33	N-S	4,683.7	4,244.7	9.4	1.4	0.8	39.1	F	F
3	2038	CRA 33	N-S	3,856.5	3,097.5	19.7	0.5	0.2	58.9	F	E
4	2028	Calle 36	E-O	1,989.8	1,784.1	10.3	0.2	0.2	11.4	C	C
4	2038	Calle 36	E-O	2,144.4	1,859.7	13.3	0.3	0.2	16.7	C	C
5	2028	CRA 17	S-N	3,604.1	2,711.9	24.8	0.7	0.3	53.9	F	D
5	2028	CRA 17	S-N	3,951.2	2,987.3	24.4	0.7	0.3	56.3	F	F
6	2028	CRA 33	N-S	4,588.2	2,688.2	41.4	2.6	0.3	88.3	F	C
6	2038	CRA 33	N-S	6,305.8	3,489.3	44.7	14.1	0.7	94.9	F	F
6	2028	CRA 17	S-N	3,604.1	2,217.2	38.5	0.7	0.2	68.3	F	B
6	2038	CRA 17	S-N	3,951.2	1,834.3	53.6	0.7	0.1	81.5	F	C
6	2038	Barranca-Bucaramanga	E-O	4,700.4	2,651.7	43.6	14.6	1.9	87.0	F	F
6	2038	Calle 36	E-O	2,630.2	1,242.0	52.8	0.3	0.1	53.9	E	B

5. Conclusiones

La actualización de la red de transporte de Bucaramanga implicó revisar y modificar el trazado existente de una malla inicial, junto con la renovación de los atributos de cada elemento vial, lo anterior dio como resultado una malla de 12,162 elementos con 8,234 nodos, que cuenta con la información necesaria para simular la demanda actual de la ciudad de Bucaramanga. Este proceso demandó una gran cantidad de trabajo en oficina, por la tanto, es importante encontrar la forma de mantener actualizada la información, es decir, que cuando se necesite modelar la demanda de la ciudad no sea necesario hacer una revisión individual de los 12,162 elementos que componen la red, sino que con información alimentada con mayor frecuencia este trabajo sea innecesario.

- El registro de la información se hizo con cámaras y drones, lo que facilitó la captación, sin embargo, por la hora (18:00 a 19:00 horas) y la altura, con el dron se dificultaba la identificación de los vehículos. En estos casos sería pertinente que una persona registre en tierra los vehículos de menor frecuencia, como los camiones, dado que la vista en planta con el dron no permite la identificación de los ejes.
- La herramienta de estimación de matrices O-D en TransCAD es útil, en el sentido de que no se requiere información costosa y extensa como la proveniente de encuestas. Además ofrece buenos resultados, como se comprobó en este proyecto, donde se partió de una matriz de viajes O-D del 2005 y se obtuvo la del 2018, cumpliendo a cabalidad unos de los indicadores de ajuste para el proceso de estimación, el grafico de dispersión, además el GEH, que es uno de los indicadores más exigentes, presentó ajuste moderado, sin embargo la actualización de la matriz O-D en TransCAD 5.0 es un proceso que requiere la intervención del usuario, es decir, el

programa no itera hasta encontrar la matriz que se ajuste a los datos de aforos ingresados, tampoco funciona ingresar la matriz estimada en una iteración anterior como matriz similla en los datos de entrada de la herramienta OD Matrix Estimation, entonces para lograr la estimación de la matriz actual se requiere que el usuario modifique la matriz original en las celdas donde se presentan sobreestimaciones o subestimaciones de los viajes.

- Se consultaron los métodos de asignación de tráfico y se encontró que los modelos de equilibrio son los más recomendados, por su mayor acercamiento a la realidad del transporte urbano. Se seleccionó inicialmente Equilibrio del Usuario Estocástico (SUE), pero en el proceso de actualización de la matriz O-D se decidió medir la sensibilidad del modelo con Equilibrio del Usuario (EU), presentándose mayor coincidencia con la información recolectada, posiblemente porque en la ciudad la mayoría usan los corredores principales, que son los más atractivos con respecto a tiempos de viaje y es así como funciona EU, por lo tanto, se decidió trabajar la demanda de la ciudad con Equilibrio del Usuario.
- Con indicadores como el total de horas de viaje (VHT) y la distancia total recorrida de los vehículos en el sistema (VMT), junto con evaluaciones de flujos vehiculares y tiempos de viaje en corredores de control, se estableció la siguiente priorización de cuatro de los proyectos viales presentes en el Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010-2030 y en el Plan Maestro de Movilidad, Área Metropolitana de Bucaramanga 2011-2030:

Tabla 13.

Priorización proyecto viales en la ciudad de Bucaramanga

AÑO	Proyecto Vial
-----	---------------

2028	Troncal Norte Sur
2028	Conexión alterna centro-real de minas
2038	Transversal Nazareth
2038	Calle 54 doble calzada

Esta configuración evidencia que la priorización propuesta en los planes de movilidad no sería la más adecuada con la demanda proyectada en este modelo, en miras de reducir variables como el tiempo de viaje.

- El trabajo realizado para obtener la priorización de proyectos es un trabajo meticulosamente exigente, lo cual es prueba de lo importante que es la presencia de un ingeniero especialista en tránsito y transporte para dar un soporte técnico a la toma de decisiones en proyectos de infraestructura vial.

6. Recomendaciones

Los parámetros alfa y beta utilizados en la función de impedancia, que recomiendan los autores Fehr y Peers, son parámetros desarrollados para el tráfico vehicular del condado de Mendocino en Estados Unidos, sin embargo, han sido usados en diferentes modelos a nivel mundial por su buen ajuste con la jerarquización vial que proponen, se aconseja entonces, para futuras investigaciones, desarrollar estudios orientados a obtener estos valores para el comportamiento del tráfico vehicular del área en estudio, en este caso la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, porque estos datos son relevante para la estimación de la congestión en análisis del comportamiento de la demanda vehicular.

Para la estimación de la proyección de la población se usó la información de la base de datos del DANE, quienes proyectan los datos del censo 2005 con el método demográfico de los componentes, esta información para los municipios de Bucaramanga, Florida, Piedecuesta Y Girón presentan funciones polinómicas de grado tres, cuando se suman los datos de población para los cuatros municipios, esta suma en conjunto presenta una tendencia lineal, además los datos de parque automotor para este proyecto se tomaron con regresión lineal de acuerdo a los datos de la Dirección de Transito de Bucaramanga, sin embargo este tipo de tendencias es ideal y puede no reflejar la situación actual de la ciudades, se recomienda entonces hacer estudios minuciosos de estas dos variables explicativas de la generación y atracción de viajes, para que se desarrollen modelos matemáticos que se ajusten a las condiciones reales del área estudio, y así poder priorizar los proyectos de infraestructura vial con estimaciones más conservadoras.

Referencias Bibliográficas

- APP Accesos Norte de Bogota. (2016). Volumen de tránsito y transporte. Recuperado de <ftp://ftp.ani.gov.co/Iniciativas%20Privadas/IP%20ACCESOS%20NORTE%20FASE%201/01%20Estudio%20de%20Transporte/1.3-Volumen%20de%20Tr%C3%A1nsito%20y%20Transporte%200704.pdf>
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2011). Desarrollo urbano y movilidad en América Latina. Banco de desarrollo de América Latina. Recuperado de https://www.caf.com/media/4203/desarrollourbano_y_movilidad_americalatina.pdf
- Bocanegra, H. (2005). Estimación de una matriz origen-destino a partir de aforos vehiculares (tesis de maestría). Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/6807/1/1080126963.PDF>
- Capitol Area Metropolitan Planning Jefferson City. (2013). Travel Demand Forecasting Model Documentation. Recuperado de <http://cms4.revize.com/revize/jeffersonmo/11Jan2013CAMPOTDMDocumentation.pdf>
- Castillo, M., Martínez, Y., y Porras, H. (2010). Modelo de asignación de tráfico y su uso en la priorización de proyectos viales del área metropolitana de Bucaramanga. n/a, 1-12.
- Castro, L., Picado, G., y Rodríguez, S. (2017, julio). Modelación de la demanda de transporte urbano en Costa Rica, de Emme a TransCAD. Revista Infraestructura Vial, 19(33), 45-53. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/32922/32354>
- Chávez, V. (2014). Proyecto de Investigación III. Avance de Escritura Correspondiente al Trimestre 13-P. Recuperado de <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/hect/tesis/TesisVictoria-M.pdf>
- Cuellar, O. (2016). Actualización y Calibración del Modelo de Asignación de Tráfico de Hora Pico para Vehículo Particular y Estudio del Modelo a través del Análisis de Resultados y Sensibilidad. Aplicación al Caso de Bogotá (tesis de maestría). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/56185/7/1026260223.2016.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2009). Metodología Sistema de Información Geoestadístico (93). Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/Sistema_informacion_geoestadistico.pdf
- Des Moines Area Metropolitan Planning Organization. (2006). Des Moines Area Travel Demand Model Documentation & User Guide. Recuperado de https://web.engr.uky.edu/~rsouley/CE%20451/LABS/Lab%2012/DSM_Documentation.pdf
- Durán, H. (2007). Metodología para el desarrollo de infraestructura carretera mediante el uso del paquete computacional TransCad (tesis doctoral). Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1918/duranlopez.pdf?sequence=1>
- Fehr & Peers Transportation Consultants. (2010). Mendocino county travel demand model, user's guide. Recuperado de <http://www.mendocinocog.org/pdf/MCOG%20Travel%20Model-User%20Guide.pdf>

- Gabriel, L. G., y Henry, J. M. (2010, junio). Comparación de métodos de asignación a redes para distintos volúmenes de tránsito. *UIS Ingenierías*, 9(1), 77-84. Recuperado de <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/1058/1437>
- Girardotti, L. (2001). Demanda de Transporte dirigida a redes. Guía de estudio, Facultad de ingeniería UBA. Recuperado de: <http://materias.fi.uba.ar/6808/contenidos/DemandaRedes.pdf>
- González, C., y Sarmiento, I. (2009, junio). Modelación De La Distribución De Viajes En El Valle De Aburrá Utilizando El Modelo Gravitatorio. *Dyna*, (158), 199-208. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/15616/1/10259-19101-1-PB.pdf>
- Illinois Department of Transportation. (n/a). Illinois Model Users Group (ILMUG). Travel Demand Modeling Development & Guidelines for Small & Medium Sized MPOs. Recuperado de https://ilmug.cuuats.org/wp-content/uploads/sites/9/2016/03/ILMUG-Final_12262013.pdf
- Instituto de Estudios Urbanos de la Universidad Nacional de Colombia. (2016). Planes de Ordenamiento Territorial Departamental frente a los Municipios. *Debates Gobierno Urbano* (8). Recuperado de <https://www.institutodeestudiosurbanos.info/observatorio-de-gobierno-urbano/publicaciones-de-debates-urbanos/1401-debates-de-gobierno-urbano-8/file>
- Instituto Mexicano del Transporte. (2015). Hacia el desarrollo de un modelo nacional de transporte; primera fase: construcción de la red intermodal y primeros análisis (459). Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt459.pdf>
- Khan, T., y Anderson, M. (2016). Accurately Estimating Origin / Destination Matrices in Situations with Limited Traffic Counts : Case Study Huntsville , AL. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering* 5(3), 64–72. Recuperado de <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijtte.20160503.02.html>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2005). Metodología para el cálculo de capacidad vial. Recuperado de http://www.academia.edu/7409119/METODOLOG%20%8DA_PARA_EL_C%81LCULO_DE_CAPACIDAD_VIAL
- Ortuzar, J. de D. (2000). Modelos de Demanda de Transporte. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/234530186/modelos-de-demanda-de-transporte-pdf>
- Ortuzar, J. de D., y Willumsen, L. G. (2011). Modelling Transport. Recuperado de https://www.studyindia.com/Pdf_Viewer/web/pdfviewer.aspx?ID=22016%20&file=32812011Juan_de_MODELLINGtransport_SI9o3.pdf
- Piraquive, S. (2014). Sistema Multimodal De Transporte Como Estrategia Aplicada Al Proceso De Metropolitacion De Bogotá D.C-Estación Multimodal De Transporte-Hayuelos (Fontibon) (tesis de pregrado). Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/17286>
- Santos y Ganges, L., y Rivas Sanz, J. L. D. L. (2008). Ciudades con atributos: conectividad, accesibilidad y movilidad.
- TransCad 5.0. (2008). Travel Demand Modeling with TransCAD 5.0 User's Guide. Boston,

Estados Unidos: Caliper Corp

- Vozzi, L. M., y Acquaviva, L. A. (2011). Modelización Del Sistema De Transporte De Rosario. *Mecánica Computacional*, XXX, 2891–2903. Recuperado de <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3959/3876>
- Wong, S. C., Tong, C. O., Wong, K. I., Lam, W. H. K., Lo, H. K., Yang, H., y Lo, H. P. (2005, marzo). Estimation of Multiclass Origin-Destination Matrices from Traffic Counts. *Journal of Urban Planning and Development*, 131(1), 19-29. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2005\)131:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2005)131:1(19))