

Implementación de una glorieta semaforizada – caso de estudio intersección bulevar
Santander con carrera 21, en la ciudad de Bucaramanga

Daniel Alfonso Ávila López

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Jhon Jairo Cáceres Jiménez

PhD. Ingeniería Civil y Costera

Codirectora

Claudia Patricia Báez Trujillo

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Quiero dedicar este gran paso a Dios padre, hijo y espíritu santo y a mi virgencita de Chiquinquirá.

A mi nonita Lenis por su infinito amor y apoyo, y por ser mi segunda madre.

A mi madre Julia por ser mi primera y gran maestra de vida, por su sacrificio, por sus desvelos, por la educación, en principios y valores, que me brindó y que me ha convertido en un hombre de bien.

A Mauricio Rojas por criarme como a su propio hijo y ser un gran ejemplo de hombre a seguir.

A mis hermanos, Maureen y Julian, por ser gran parte de mi vida y motivación.

A mi novia Yeniffer por apoyarme justo en los momentos más difíciles de mi carrera, por enseñarme lo que es el amor sincero y desinteresado, y por ser parte de mi felicidad.

Esto es por ustedes y para ustedes, los y las amo.

Agradecimientos

A Dios por su extraña, pero perfecta forma de hacer las cosas

A mi familia por inculcarme el amor por el estudio y la ingeniería civil

A mis directores Jhon Jairo Cáceres y Claudia Patricia Báez

A la ingeniera Claudia Patricia Báez especialmente, por su paciencia, tiempo, conocimientos, esmero; por su forma tan respetuosa y amable de dirigirme el proyecto y por su valiosa enseñanza.

Al ingeniero Nelson Deiwer Baza Solares por toda su colaboración y apoyo en las diferentes etapas de este trabajo

A la profesora Silvia Susana Espinel por ser tan maternal con nosotros sus estudiantes brindándonos su amor y apoyo desinteresadamente.

A Jaime Otoniel Ayala Pimentel y Teresa Briceño Pineda por darme la mano cuando lo necesité

A aquellos amigos y compañeros que me brindaron su amistad desinteresadamente.

Finalmente, quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que influyeron positivamente en mí durante mi estadía universitaria, cada uno de ustedes sabe lo agradecido que estoy.

Mil gracias.

Tabla de Contenido

	Pág.
1 Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 Planteamiento y Justificación del Problema.....	17
3 Revisión Bibliográfica.....	18
3.1 Investigación Documental	18
3.2 Búsqueda Bibliográfica.....	19
3.3 Clasificación y Selección de Artículos	19
3.4 Bibliometría	20
4 Marco de Referencia	21
5 Glorietas Semaforizadas.....	23
5.1 Desarrollo Histórico.....	23
5.2 Información sobre Implementación de Glorietas Semaforizadas	23
5.3 Metodologías de Análisis y Modelos para Estimar los Impactos de las Glorietas Semaforizadas.	27
5.4 Principales Programas de Modelado Usados.....	29
5.5 Ventajas y Desventajas de la Implementación de Glorietas Semaforizadas.....	30
5.6 Recomendaciones para la Implementación.....	30
5.7 Conclusiones de la Revisión Bibliográfica.	32
6 Caracterización de la Zona de Estudio	33
6.1 Zona de Estudio	33
6.2 Zona de Influencia Directa.....	34
6.3 Ubicación de la Zona de Estudio.	34
6.4 Áreas de Actividad en la Zona de Estudio.....	35
6.5 Caracterización de la malla vial de la zona de estudio.	36
6.6 Caracterización de la zona de influencia directa.....	37
6.6.1 Perfiles viales.	39
6.6.2 Estado de Andenes.....	40
6.6.3 Estado de Calzadas.	42
6.6.4 Señalización Vertical..	43

6.6.5 Señalización Horizontal	45
6.6.6 Semáforos.	46
6.7 Volúmenes vehiculares.	46
6.7.1 Hora de máxima demanda..	49
7 Análisis de la Situación Actual	50
7.1 Estructuración de la red vial.	50
7.2 Asignación de los flujos de la red de micro simulación.	50
7.3 Matriz origen-destino principal para asignación de flujos.....	53
7.4 Calibración y validación del modelo	56
7.5 Configuraciones claves para el éxito de la calibración.	57
7.5.1 Parámetros de comportamiento y configuraciones..	57
7.5.2 Modificaciones a la malla vial.	59
7.6 Nomenclatura de los tramos viales.	61
7.7 Resultados de la Situación Actual.....	62
8 Evaluación técnica del funcionamiento de la glorieta en estudio	64
9 Alternativas Semafóricas propuestas	64
9.1 Alternativa 1.....	65
9.2 Alternativa 2.....	66
9.3 Alternativa 3.....	67
10 Comparación de los Resultados de las Alternativas Estudiadas	68
10.1 Análisis de los resultados.....	70
10.2 Proyeccion de Escenarios Futuros	72
10.2.1 Proyección de volúmenes vehiculares.	73
10.2.2 Resultados de la simulación de la alternativa 3 con proyección vehicular al año 2019. ...	74
11 Recomendaciones.....	75
12 Conclusiones	76
Referencias Bibliográficas	79

Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados obtenidos de las bases de datos	19
Tabla 2. Vías importantes de la zona de influencia	37
Tabla 3. Perfiles viales normativos	39
Tabla 4. Obstáculos y discontinuidades en los andenes	41
Tabla 5. Fases y tiempos semafóricos existentes en la zona de estudio	46
Tabla 6. Factores de equivalencia vehicular	48
Tabla 7. Matriz O-D aforo aportes de motos de cada acceso de la glorieta	52
Tabla 8. Matriz O-D porcentajes de aporte de motos de cada acceso de la glorieta	52
Tabla 9. Matriz de aporte final para motos	53
Tabla 10. Aforo motos intersección B. Santander con cra 22 y cll 16	54
Tabla 11. Aforo Glorieta – Flujo motos de aporte de cada acceso a la salida Suroccidente	55
Tabla 12. Aforo motos Intersección B. Santander con cra 20 y cll 18	55
Tabla 13. Resultados de calibración	57
Tabla 14. Resultados situación actual	63
Tabla 15. NDS Situación Actual	63
Tabla 16. Configuración semáforo Kr 21- Glorieta	66
Tabla 17. Resultados de la alternativa 1	66
Tabla 18. Tiempos semafóricos semáforo de la intersección calle 18 con carrera 20	67
Tabla 19. Resultados de la alternativa 2	67
Tabla 20. Configuración semafórica alternativa 3	68
Tabla 21. Resultados de la alternativa 3	68
Tabla 22. Análisis general de alternativas y situación actual	69

Tabla 23. NDS Corredores viales de la rotonda	70
Tabla 24. Alternativa 3 proyectada al año 2023 vs situación actual	73
Tabla 25. Alternativa 3 proyectada al año 2019 vs situación actual	74

Lista de Figuras

Figura 1. Publicaciones por país.	20
Figura 2. Publicaciones por año.	21
Figura 3. Glorieta Isaac Rabin con 19 semáforos.	25
Figura 4. Glorietas en Medellín, Antioquia.	25
Figura 5. Glorieta semaforizada.	26
Figura 6. Glorieta Américas.	26
Figura 7. Zona de estudio	33
Figura 8. Ubicación de la zona de influencia directa	34
Figura 9. Áreas de actividad.	35
Figura 10. Jerarquía vial de la zona de estudio.	36
Figura 11. Vías inventariadas.	38
Figura 12 Vías correspondientes a cada tipo de perfil.	39
Figura 13. Cumplimiento de perfiles viales normativos	40
Figura 14. Distribución del estado físico de los andenes según su material.	40
Figura 15. Tipos de fallas.	42
Figura 16. Severidad por tipo de daño.	43
Figura 17. Estado físico por tipo de señal.	44
Figura 18. Estado Físico por tipo de señal horizontal.	45
Figura 19. Estaciones de conteos vehiculares.	47
Figura 20. Nomenclatura para los movimientos vehiculares en una intersección.	47
Figura 21. Nomenclatura tipo para las intersecciones aforadas.	48
Figura 22. Vehículos Equivalentes en la glorieta.	49

Figura 23. Distribución modal en el sector para la hora pico.	50
Figura 24. Captura de video realizado por el dron.	52
Figura 25. Ruta ejemplo para la asignación de flujo a un par Origen-Destino	54
Figura 26. Fragmento de la matriz origen-destino de motos.	56
Figura 27. Lane Connector en una intersección.	60
Figura 28. Puntos de parada en una intersección tipo.	61
Figura 29. Nomenclatura de un tramo.	62
Figura 30. Nomenclatura de tramos en la glorieta	62
Figura 31. Esquema de la alternativa 1	65
Figura 32. Esquema de propuesta 2.	66
Figura 33. Esquema de propuesta 3	68
Figura 34. Niveles de servicio de cada alternativa.	69
Figura 35. Demoras de la alternativa 1 vs escenario actual	71
Figura 36. Demoras de la alternativa 2 vs escenario actual	71
Figura 37. Demoras de la alternativa 3 vs escenario actual	72

Lista de Apéndices

“Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice A. Inventario Bibliográfico

Apéndice B. Bibliometría

Apéndice C. Perfiles viales normativos de la zona de influencia

Apéndice D. Inventario de perfiles viales en la zona de influencia

Apéndice E. Cumplimiento de perfiles viales normativos en la zona de influencia

Apéndice F. Estado de andenes

Apéndice G. Levantamiento de campo de los perfiles viales en la zona de influencia

Apéndice H. Señales verticales

Apéndice I. Señales horizontales

Apéndice J. Registro de tiempos y fases de semáforos existentes en la zona de estudio

Apéndice K. Aforos

Apéndice L. Cálculo hora de máxima demanda

Apéndice M. Matrices vehiculares estado actual

Apéndice N. Calibración escenario actual

Apéndice O. Niveles de Servicio

Apéndice P. Análisis técnico de la capacidad de la glorieta

Apéndice Q. Cálculo de semáforos

Apéndice R. Proyecciones vehiculares

Apéndice S. Escenarios Modelados

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE UNA GLORIETA SEMAFORIZADA – CASO DE ESTUDIO INTERSECCIÓN BULEVAR SANTANDER CON CARRERA 21, EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA*

AUTOR: DANIEL ALFONSO AVILA LOPEZ**

PALABRAS CLAVE: Micro simulación, Transmodeler, Movilidad, semaforización, Glorietas.

DESCRIPCIÓN:

Es evidente la necesidad que surge en las ciudades de dar solución a los problemas de congestión vehicular que actualmente se presentan, derivados de los altos volúmenes vehiculares que se dan en las glorietas como puntos críticos de conexión de las mallas viales. La pérdida de la capacidad de las rotondas no permite el correcto funcionamiento de las mismas, ocasionando que se presenten congestionamientos y obstrucciones del flujo en sus cercanías, deficiencia en la conexión de espacios urbanos e impactos ambientales y sociales negativos por parte de los vehículos motorizados. En la presente investigación se realiza un estudio de viabilidad de la implementación de controles semafóricos en una glorieta ubicada en la ciudad de Bucaramanga, como parte de la búsqueda de soluciones de bajo costo que mitiguen las externalidades negativas del transporte presentes en su zona de influencia. Partiendo de una revisión bibliográfica de documentos de carácter investigativo, con el fin de tener una panorámica clara de las implicaciones que traen las glorietas semaforizadas, posteriormente se realiza una caracterización del estado actual del tránsito en una zona de influencia directa de la glorieta. Finalmente, mediante un modelo de micro simulación de tráfico, se analiza el comportamiento de tres alternativas de semaforización, se realizan proyecciones vehiculares a 1 y 5 años, y se determina la viabilidad de implementación de la alternativa que mejores resultados, en términos de movilidad, proporciona.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez, Ingeniero de Sistemas.

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF A SEMAFORIZED GLORIET - CASE STUDY
INTERSECTION BULEVAR SANTANDER WITH CARRERA 21, IN
THE CITY OF BUCARAMANGA *

AUTHOR: DANIEL ALFONSO AVILA LOPEZ**

KEY WORDS: Micro simulation, Transmodeler, Mobility, Traffic Signals, Roundabouts.

DESCRIPTION:

It is evident the need that arises in cities to solve the problems of vehicular congestion that currently arise, derived from the high volumes of vehicles that are present in roundabouts as critical points of connection of road networks. The loss of the capacity of the roundabouts does not allow the correct operation of the same, causing congestions and obstructions of the flow near by, deficiency in the connection of urban spaces and negative environmental and social impacts on behalf of motorized vehicles. A feasibility study of the implementation of traffic light controls in a roundabout located in the city of Bucaramanga is carried out in the present investigation, as part of the search for low-cost solutions that mitigate the negative transport externalities present in its area of influence. Starting from a bibliographical revision of research documents with means of obtaining a clear view of the implications that signalized roundabouts bring. Afterwards, the characterization of the current state of transit is carried out in a direct zone of influence of the roundabout. Finally, through a model of micro simulation of traffic, the behavior of three alternatives of traffic light implementation is analyzed, vehicular projections to 1 and 5 years are carried out, and the viability of the implementation of the alternative that brings about the best results is determined.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez, System Engineer.

Introducción

El presente trabajo de investigación determinará la viabilidad de implementar controles semafóricos en la glorieta San Francisco ubicada en la ciudad de Bucaramanga. Lo anterior, como alternativa de solución a los problemas de movilidad vehicular presentes en la zona, producto de los altos volúmenes vehiculares que transitan en el sector que exceden los límites de capacidad de la glorieta.

Como parte del desarrollo del proyecto, se realizó una revisión bibliográfica de documentos de carácter científico e investigativo, con el fin de determinar los criterios a tener en cuenta para una apropiada ubicación de los semáforos. Acto seguido se llevó a cabo la caracterización vial de la zona objeto de estudio, buscando identificar las condiciones normativas, operacionales y funcionales de los corredores viales presentes en el sector. Se realizó un registro y análisis cuantitativo y cualitativo de elementos propios de la zona como la señalización vial, infraestructura peatonal y vehicular.

Con base en la caracterización realizada, se elaboró un modelo de micro simulación que buscó representar la situación actual de la zona en estudio. A partir de esta representación, se evaluaron 3 alternativas de solución posibles para la problemática estudiada, analizando posteriormente los resultados obtenidos. Finalmente, se realizó una evaluación detallada a la alternativa de mayor funcionabilidad para el sector, estableciendo las condiciones para el éxito de su implementación y determinando la viabilidad de la misma.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la viabilidad en términos de movilidad vehicular de la implementación de controles semafóricos en la glorieta “San Francisco” ubicada en la intersección entre el Boulevard Santander y la carrera 21, en la ciudad de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión bibliográfica sobre la implementación de glorietas semaforizadas para determinar las principales características, ventajas y desventajas que ofrece este tipo de intersección a nivel vehicular y peatonal.

Identificar las principales problemáticas de movilidad vehicular y peatonal asociadas a los diferentes modos de transporte con base en una caracterización del estado actual del tránsito de la intersección ubicada en el Boulevard Santander con Carrera 21

Estimar el impacto en la movilidad vehicular la zona de influencia de la glorieta San Francisco por la implementación de semáforos para regular el tráfico, mediante un modelo de microsimulación de tráfico.

2 Planteamiento y Justificación del Problema

El incremento del parque automotor en el Área Metropolitana de Bucaramanga, en adelante AMB, cada vez es mayor. En un informe reciente publicado el 31 de diciembre de 2017(Dirección de Transito de Bucaramanga, 2017), el parque automotor del AMB asciende a la cifra de 674317 vehículos que, comparada con los 632.104 vehículos registrados a diciembre del 2016, representa un incremento del 6.7% en un periodo de tiempo de 1 año. Este aumento se debe entre otros aspectos, al crecimiento desordenado y expansivo de la ciudad que ha sido favorecido por diferentes factores como las características geográficas y topográficas de la ciudad, factores políticos, técnicos y sociales. (Área metropolitana de Bucaramanga, s.f., p.24)

Por otro lado, según el Plan de Desarrollo 2016-2019 Gobierno de las Ciudadanas y los Ciudadanos de Bucaramanga, “La movilidad urbana se ha convertido en una problemática recurrente dentro del contexto urbano de la ciudad de Bucaramanga”(Alcaldía de Bucaramanga, 2016), esta problemática se ve claramente reflejada en la congestión, la deficiencia en la conexión de espacios urbanos, impactos ambientales y sociales negativos por parte de los vehículos motorizados, que favorecen al vehículo por sobre el peatón y con ello a los demás modos de transporte amigables con el medio ambiente como lo es la bicicleta y los viajes a pie. Por esto es necesario realizar estudios de movilidad encaminados al mejoramiento de las condiciones de transporte del peatón y de los modos de transporte no motorizados, para así darles la importancia que les corresponde.

En el barrio San Francisco de la ciudad de Bucaramanga, específicamente en el Bulevar Santander con carrera 21, existe una glorieta con un área total de 8981 m² que alberga un parque público y es un punto importante de conexión vial. Debido a la fuerte actividad comercial que se presenta a sus alrededores tal como: venta de calzado, alimentos, productos y servicios de

diferentes características; esta se convierte en un atractivo para la ciudadanía, generando así un constante y gran flujo vehicular que no solo desemboca en problemas de congestión, sino que también dificulta el acceso de los peatones al parque.

En la búsqueda de soluciones que mitiguen esta problemática, se encontró que es posible resolver esta situación de congestión mediante la instalación de semáforos en puntos estratégicos de la glorieta, cuya ubicación deberá ser estudiada, buscando que el impacto que se genere en la movilidad vehicular sea el mínimo y la integración con los peatones para garantizar seguridad en sus desplazamientos hacia el parque (Darder, 2005). Desde este panorama y con el fin de conocer el impacto de esta medida en el sector estudiado, la presente investigación pretende resolver el siguiente interrogante: ¿Qué tan eficiente y efectivo sería, en términos de movilidad vehicular, la implementación de semáforos en una glorieta para regular el tránsito de vehículos y permitir el cruce de peatones de forma segura?

3 Revisión Bibliográfica

El objetivo de la revisión bibliográfica fue resolver una serie de preguntas de investigación planteadas inicialmente. Para esto, se realizó una búsqueda, extracción y clasificación de artículos científicos y demás documentos académicos en diferentes bases de datos de talla internacional. Seguidamente se seleccionaron aquellos documentos que cumplieron una serie de filtros propuestos y finalmente, se procedió a leer y extraer de estos, toda la información pertinente para la investigación.

3.1 Investigación Documental

Para realizar una búsqueda bibliográfica objetiva y clara se desarrollan las siguientes preguntas de investigación:

- ✓ ¿Qué tipo de investigación se ha realizado con respecto a glorietas semaforizadas?
- ✓ ¿Por qué se implementaron?
- ✓ ¿Qué se busca con la implementación de este tipo de intersección?
- ✓ ¿Cuáles son las principales características, ventajas y desventajas que ofrece este sistema?

3.2 Búsqueda Bibliográfica.

La búsqueda de artículos de investigación se llevó a cabo en bases de datos internacionales tales como: Science Direct, EbscoHost, ASCE, Scopus y JSTOR, sin embargo, los resultados redireccionaban, en su mayoría, a Science Direct por lo que se optó por usar esta última como la principal fuente de búsqueda.

Posteriormente, se determinaron las palabras clave y se configuraron sus combinaciones con los operadores booleanos, obteniendo la cantidad de artículos por cada combinación que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Resultados obtenidos de las bases de datos

Combinaciones Empleadas	Artículos
roundabouts AND (signalized OR traffic signals OR microsimulation OR semaphore) AND characteristics NOT (noise OR pollution)	592
Roundabout AND signalized	315
roundabout AND (traffic lights OR traffic control OR signalized OR signals) NOT (noise OR pollution)	1692
roundabout AND signalized AND (traffic lights OR traffic control OR signals) NOT (noise OR pollution)	219

3.3 Clasificación y Selección de Artículos

Con el fin de seleccionar los artículos base de la investigación a desarrollar, se realizó una selección de documentos cuyo título tuviera mayor relación con el tema a investigar; en total se preseleccionaron 71 artículos que cumplieron este criterio. Posteriormente se leyeron los abstracts de cada artículo, descartaron 21 documentos que en resumen no aportaban información pertinente

para la investigación. Finalmente se procedió a leer tanto la introducción como las conclusiones obtenidas de los artículos restantes, seleccionando definitivamente 14 documentos para su posterior análisis y extracción de información, la base de datos realizada se presenta en el Apéndice A.

3.4 Bibliometría

En este punto se pretende analizar el estado actual de la investigación de glorietas semaforizadas en cuanto a publicaciones, autores, citaciones, crecimiento de la investigación a lo largo del tiempo entre otros. Se utilizó la base de datos propia del autor para ordenar y cuantificar la información extraída. A continuación, se presenta la bibliometría relacionada con la búsqueda bibliográfica encontrada para ver la bibliometría general de la revisión ver Apéndice B.

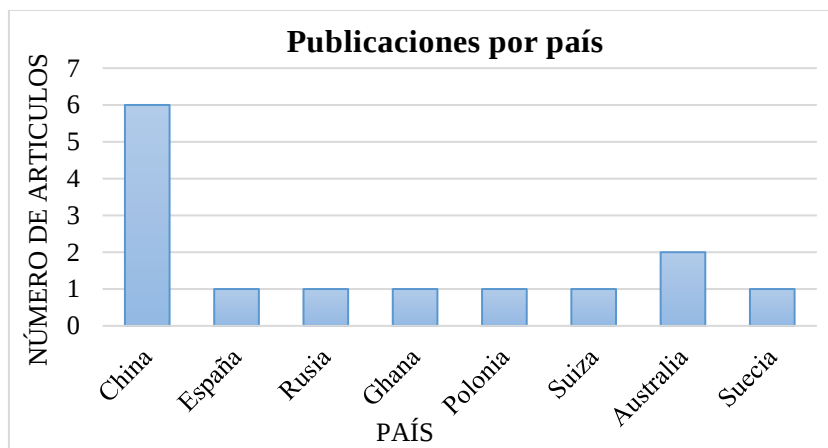


Figura 1. Publicaciones por país.

En la “Figura 1” se presenta el número de publicaciones realizadas por país, se puede apreciar que el país con mayor producción científica sobre el tema en cuestión es China, seguido de Australia entre otros.



Figura 2. Publicaciones por año.

Como se puede observar en la “Figura 2”, desde el año 2004 ha habido una baja producción de contenido científico, solo hasta el año 2016 hubo un leve incremento de investigaciones y documentos sobre glorietas semaforizadas. Para el año 2017 solo se encontró una publicación que aborta el análisis de eficiencia de las rotondas con semáforos (Nikitin, Patskan, & Savina, 2017).

4 Marco de Referencia

Las glorietas son soluciones viales en forma de intersección giratoria. Gallardo (2005) afirma: “La principal misión de estas glorietas es garantizar el correcto funcionamiento de la intersección”. Aparecen en las grandes ciudades europeas a finales del siglo XIX, con el fin de mitigar la saturación de tráfico generado por una gran cantidad de vehículos que para esa época circulaban por sus calles; tan solo en la ciudad de París se contabilizaba en 1906 la suma aproximada de 231.313 vehículos de todo tipo con influencia sobre el tráfico (Darder Gallardo, 2005).

Las intersecciones giratorias o glorietas son una intersección basada en la circulación de vehículos en la cual confluyen diferentes vías, estas funcionan alrededor de un islote central donde se le brinda prioridad a los vehículos que circulan por el carril izquierdo (Darder Gallardo, 2005).

Dependiendo de sus funciones y características, existen diferentes tipos de glorietas tales como; mini glorietas, glorietas dobles, glorietas a distinto nivel, intersecciones anulares, glorietas partidas y finalmente, glorietas semaforizadas.

Un tipo de glorietas que no son tan comunes, son las glorietas semaforizadas, que al igual que las glorietas tradicionales poseen calzadas circulares, además, cuentan con un sistema de regulación de tráfico iluminado (semáforos). Su implementación se dio debido a múltiples razones entre las cuales se destaca, el desequilibrio del flujo vehicular entre las entradas, que se da cuando un flujo vehicular predomina en un cierto movimiento, impidiendo la incorporación de otros vehículos en las otras entradas a la calzada anular, este desequilibrio genera una deficiente autorregulación propia de la glorieta, llegando a producir congestión. Así mismo, la disposición de glorietas en zonas urbanas hace notoria la importancia del tráfico peatonal en su comportamiento, en donde todos los tipos de usuarios de la glorieta hacen parte del entorno y deben considerarse en su funcionamiento, con el fin de garantizar seguridad, comodidad y accesibilidad.

Las glorietas semaforizadas permiten un espacio de circulación mixta entre peatones y vehículos, lo cual no solamente mejora las condiciones del tráfico gracias a su implementación; siempre y cuando se realice un estudio detallado de la capacidad de la glorieta, sino que permite mejoras a nivel urbanístico, así los islotes que se encuentran en el centro de las glorietas, pasan de ser espacios desaprovechados a convertirse en sitios de esparcimiento, aprovechamiento y calidad (Darder Gallardo, 2005). Dos glorietas que son ejemplo de este sistema son las llamadas “San Juan” y “Don Quijote”, las cuales están ubicadas en la ciudad de Medellín, Colombia.

5 Glorietas Semaforizadas

A continuación, se presenta información detallada sobre glorietas semaforizadas obtenida de la revisión bibliográfica, presentando el origen y evolución de este tipo de intersecciones, su participación a nivel nacional e internacional, importantes aportes a la investigación de este tema, el tipo de metodologías que se han implementado para su análisis, herramientas computacionales desarrolladas para su estudio, ventajas y desventajas de su implementación y recomendaciones para el éxito de su funcionamiento.

5.1 Desarrollo Histórico.

Considerando los antecedentes de la temática abordada, se encontró que autores como Sun, Ma, & Huang (2016) afirmaron que: “la idea de usar señales de tráfico fue desarrollada en los años 1970”. Sin embargo, autores como Tollazzi (2015) y Opoku-Agyekum (2016) coinciden en que este concepto se desarrolló en 1959 producto de la investigación de los ingenieros del reino unido. En el año 1959 se conoce el primer experimento con glorietas semaforizadas cuyo objetivo fue evitar bloqueos y congestiones en horas pico (Opoku-Agyekum, 2016).

En cuanto a investigaciones realizadas, Sun et al. (2016) realizaron un trabajo de investigación con el objetivo de comparar la capacidad de glorietas semaforizadas con intersecciones tradicionales semaforizadas, esto debido a que en su investigación realizaron una breve revisión bibliográfica sobre este tema y encontraron que la aplicabilidad en términos de capacidad de una glorieta semaforizada en comparación con una intersección semaforizada no había sido investigada.

5.2 Información sobre Implementación de Glorietas Semaforizadas

Las glorietas semaforizadas son usadas extensamente en Europa, Australia y en el 2004 recibieron más aceptación en Reino Unido y otros países. En Polonia, por ejemplo, las glorietas

semaforizadas han sido construidas durante aproximadamente 40 años (Tracz & Chodur, 2012). En Cracovia existen 11 glorietas semaforizadas (Tracz & Chodur, 2012). En china existe una gran cantidad de glorietas semaforizadas de gran dimensión ubicadas en zonas con importantes flujos vehiculares (Bie, Mao, & Yang, 2016). Las glorietas semaforizadas son comunes en áreas urbanas y suburbanas de las ciudades polacas, también se les conoce como “intersecciones con isla central”. Este tipo de glorietas se caracterizan por las maniobras de cruce, en vez de maniobras de entrada, fusión y salida típicas de una glorieta no semaforizada (Tracz & Chodur, 2012).

España posee una cantidad importante de glorietas semaforizadas, las cuales en un inicio eran glorietas tradicionales o incluso intersecciones muy complejas a desnivel y que, por motivos relacionados con el aumento de tránsito vehicular, la presencia de grandes flujos peatonales y motivos urbanísticos se modificaron o demolieron para dar paso a su diseño y construcción. Algunas de las glorietas o intersecciones que sufrieron estas modificaciones están ubicadas en diferentes plazas como: La plaça Espanya, Portal de la Pau, de Joan Carles I, Tetuan, Gregori Taumaturg, la plaça de la Carbonera, Isaac Rabin ver figura 3, Prat de la Riba o la Glorieta de Carlos V. Esta última fue inicialmente una intersección de distintos pasos a desnivel, la cual fue demolida y reemplazada por una glorieta para recuperar el paisaje urbanístico debido a que la estructura ocultaba de la vista sitios importantes de la capital española como el Paseo del Prado, el Parque del Retiro, el casco antiguo de la Ciudad, la estación de trenes de Atocha y el ministerio de Agricultura (Darder Gallardo, 2005).



Figura 3. Glorieta Isaac Rabin con 19 semáforos. Nota: Adaptado de Google. (s.f.). [Streetview glorieta, España en Google maps]. Recuperado el 7 de noviembre, 2018, de: <https://bit.ly/2SLYgK8>

Según Xia & Shi (2013), las glorietas semaforizadas se implementan en casos donde el flujo vehicular excede los límites de capacidad de la glorieta, ocasionando grandes congestiones. En Colombia existen glorietas semaforizadas que como en la mayoría de los casos se reestructuraron de esta forma por diferentes motivos entre lo que se encuentran la alta demanda vehicular, comportamientos agresivos de los conductores y presencia de peatones. Algunas de las glorietas que se encuentran en el país se muestran a continuación:

La glorieta San Juan ubicada y la glorieta Don Quijote, de la Ciudad de Medellín, Antioquia, es un ejemplo de implementación de este tipo de intersecciones, ver figura 4.



Figura 4. Glorietas en Medellín, Antioquia. (a) Glorieta San Juan (b) Glorieta Don Quijote. Nota: Adaptado de Google. (s.f.). [Streetview glorieta, Colombia en Google maps]. Recuperado el 7 de noviembre, 2018, de: (a) <https://bit.ly/2EUwveN> (b) <https://bit.ly/2TluHEz>.

Otro ejemplo es la glorieta ubicada en la Carrera 64C con calle 77 Medellín, Antioquia, ver figura 5. Es una glorieta de grandes dimensiones que presenta fallas por la impericia de los conductores como lo afirmó Víctor Gabriel Valencia, docente de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional al periódico El Mundo (Mejía Angel, 2011).



Figura 5. Glorieta semaforizada. Nota: Adaptado de Google. (s.f.). [Streetview glorieta, Colombia en Google maps]. Recuperado el 7 de noviembre, 2018, de: <https://bit.ly/2C8ekjQ>

La glorieta Américas con Ciudad de Cali, ver figura 6, ubicada en la avenida carrera 86 con avenida las américas en la Ciudad de Bogotá; posee un diámetro de aproximadamente 80 m del islote, adicionalmente posee un carril que la atraviesa con un diámetro interno de 50 metros, que es exclusivo para el tránsito de transporte publico Transmilenio SITP.

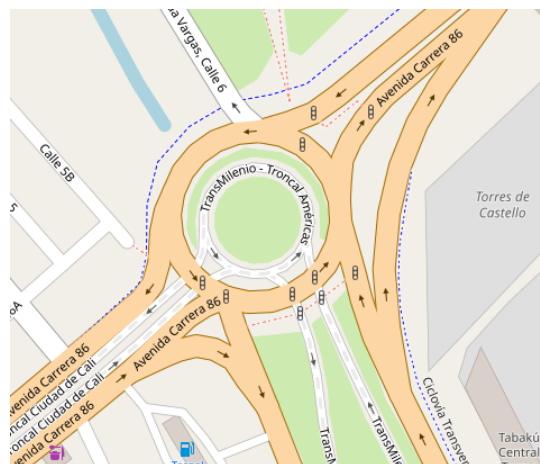


Figura 6. Glorieta Américas. Nota: Adaptado de OpenStreetMap (s.f) [Mapa glorieta, Colombia en OpenStreetMap] Recuperado el 7 de marzo, 2019, de <https://bit.ly/2NMR53l>.

5.3 Metodologías de Análisis y Modelos para Estimar los Impactos de las Glorietas Semaforizadas.

En cuanto a la forma en la que se pueden controlar los flujos vehiculares, Natalizio (2005) presenta dos tipos de control en glorietas semaforizadas, control directo y control indirecto, el primero afecta tanto a los flujos externos como internos; el control indirecto afecta el flujo vehicular a una distancia del punto de entrada a la glorieta. Natalizio también presenta que el tiempo de operación de la semaforización puede darse a tiempo completo o por intervalos donde se considere necesario regular el tráfico con semáforos.

Por otra parte, las entradas pueden ser controladas de dos formas: Control total o control por partes. El control total se implementa en todas las entradas a la glorieta, mientras que, el control por partes hace referencia a la señalización de una o más entradas, pero no todas, las restantes se regirán por la ceda al paso (Opoku-Agyekum, 2016).

Con respecto a ajustes de tiempos semafóricos en una glorieta semaforizada, se encontró una metodología de análisis llamada red neuronal de propagación de retorno, que se encarga de autoajustar los tiempos de cada fase para optimizar el flujo vehicular (Xia & Shi, 2013).

En relación con lo anterior, es claro que la semaforización se da en múltiples situaciones ya mencionadas anteriormente; y así, como en las intersecciones tradicionales, las glorietas también se pueden valer de detectores de tráfico; denominados sistemas de control medido, que pueden mejorar la demora al generar espacios suficientemente amplios para que el conflicto entre dos o más corrientes vehiculares sea menor. Un estudio realizó una micro-simulación usando el software VISSIM para analizar las mejoras en cuanto a capacidad y operación en glorietas suburbanas de España y así, encontrar un esquema de señalización medida óptima; con 400 combinaciones

diferentes, los autores lograron mejorar la demora promedio entre 10% y 60% en una glorieta de un solo carril y 80 m de diámetro del islote central (Gasulla, Garcia, Moreno, & Llorca, 2016).

Por otra parte, (Bie, Mao, & Yang, 2016) analizaron el impacto de los detectores utilizando dos esquemas de fase fijos, lo que convierte este sistema en un control semafórico que se adapta a las condiciones de tráfico detectando en tiempo real los volúmenes de tráfico en las diferentes entradas de la glorieta; Además, desarrollaron modelos de retardo y longitud de cola con un nivel de precisión bastante alto para cada esquema de fase propuesto, estos modelos dependen del volumen de vehículos que se aproxima a la glorieta. Existe una limitación con respecto a los detectores de bucle y es que no existe una forma 100% efectiva de detectar los volúmenes vehiculares con estos elementos (Bie, Mao, & Yang, 2016).

Sin embargo, no en todas las situaciones se emplean los detectores de tráfico; puede encontrarse que el sistema de semáforos se configure con patrones de ciclo de la señal predefinidos, por ejemplo, el TSLT = “two stop line for left-turn control”, el cual es uno de los patrones más eficientes para lograr alta capacidad; consiste en dos líneas de parada para movimientos a la izquierda ubicados de la siguiente forma: La primera línea de stop se ubica en los carriles de entrada y la segunda línea en los carriles circulatorio (Yang, Li, & Xue, 2004). Esto lo que hace es convertir una glorieta de cuatro ramas en una intersección señalizada con cuatro sub intersecciones (Ma, Liu, Head, & Yang, 2013).

Otros autores como Tracz y Chodur (2012), analizaron dos esquemas de fase semafórica, uno de dos fases y otro de seis. El primer esquema funciona apropiadamente siempre y cuando los parámetros de diseño geométrico y de longitud del ciclo semafórico sean óptimos, esto se debe a que, si se sobrecargan los almacenamientos internos de la glorieta, la capacidad disminuye y las demoras incrementan. En comparación, el segundo esquema presenta buen desempeño en casos

donde los volúmenes son mayores, ya que soluciona los problemas de sobrecarga del primero; sin embargo, la capacidad general de la intersección y el rendimiento de las entradas se deterioran un poco.

En otro caso de estudio, Opoku-Agyekum (2016) realizó un estudio donde analizó tres casos de semaforización de una glorieta en Ghana utilizando el software VISSIM 2009, el primero tiene que ver con la señalización completa de la glorieta (control directo), lo que incluye tanto las entradas como el anillo circular de la glorieta. El segundo caso estudia la semaforización medida, en el cual se usan detectores de cola en las entradas que no están semaforizadas para que cuando estas se congestionen, el sistema detiene el flujo vehicular en la entrada inmediatamente anterior y así producir espacio para que el flujo vehicular congestionado pueda entrar a la glorieta. El último caso de estudio efectúa un control denominado entrada por entrada donde se le da acceso a un flujo en determinada entrada por un periodo de tiempo, luego se detiene y se le da paso a la siguiente entrada y así sucesivamente, este control y el anterior son medios de control indirectos.

5.4 Principales Programas de Modelado Usados.

El software de modelación más empleado es PTV VISSIM (Gasulla, Garcia, Moreno, & Llorca, 2016), (Opoku-Agyekum, 2016) propiedad del grupo alemán PTV GROUP. Por otro lado, Bu et al. (2010) usaron MATLAB 2009 para probar un modelo matemático que construyeron con el fin de aproximarse al intervalo de cambio de fase óptimo para el sistema de semáforos, a pesar de que ignoraron la longitud de los vehículos y las brechas mínimas cuando los carros que se aproximan entran en la glorieta, el resultado de la simulación mostró ser válido para diferentes situaciones.

En adición, SIDRA Intersection, RODEL y Synchro son tres herramientas computacionales que se han empleado para el análisis y simulación de ciclos óptimos de los semáforos y en general de redes de tráfico (Akçelik, 2011), (Opoku-Agyekum, 2016).

5.5 Ventajas y Desventajas de la Implementación de Glorietas Semaforizadas.

Según Azhar y Svante (2011), la semaforización de glorietas es favorable y posee ventajas como la reducción de la demora, la congestión y más importante aún, la accidentalidad. Además, genera un flujo vehicular mejor balanceado permitiendo inclusive dar prioridad al sistema de transporte público y a los peatones (Xia & Shi, 2013), por otro lado, la semaforización también genera un impacto positivo con el medio ambiente y es una solución económica en comparación con otras medidas (Bu, Zhang, & Du, 2010).

En todos los casos encontrados, los resultados fueron positivos en cuanto a generar aumento en la capacidad de la glorieta reflejándose en un índice de congestión menor. Adicionalmente, se presenta una mejora en la seguridad para el peatón ya que, en algunas ciudades como Cracovia, por ejemplo, la tendencia del número de accidentes en las 11 glorietas semaforizadas disminuyó considerablemente, de la misma forma que disminuyó el número de lesionados (Opoku-Agyekum, 2016).

5.6 Recomendaciones para la Implementación.

En cuanto a glorietas en general, el mejor método para el movimiento en la glorieta es que tanto los vehículos que deseen seguir recto o girar a la derecha deben mantenerse en los carriles exteriores de la glorieta, aquellos cuyo destino sea la izquierda deberán viajar por los carriles internos e ir entrelazándose con los externos conforme van aproximándose a su destino hasta llegar al carril externo justo antes de la salida que buscan, los vehículos que no han ingresado a la glorieta deberán, por lo tanto, esperar un espacio prudente para intentar una maniobra de ingreso. Finalmente, para que todo se dé en condiciones de seguridad optimas, todos los vehículos deben ingresar y mantenerse en la glorieta a una velocidad uniforme y calmada (Xia & Shi, 2013, pág. 1888)

Por otro lado, Según Martín-Gasulla et al, (2016) una distancia óptima para ubicar el semáforo en esquemas de control semi-actuado (sistema de control medido) a la línea de ceda el paso es de 20 metros. Mientras que, para el esquema TSLT, La primera línea de parada se debe ubicar en cada entrada con carriles de giro a la izquierda y semáforos y la segunda línea de parada; con sus correspondientes semáforos, en los carriles circulares justo antes de los potenciales puntos de conflicto. Así mismo, cada brazo i de la glorieta comparte la fase con el brazo $i+2$. En cuanto a la forma en que el esquema TSLT controla el flujo vehicular; para la primera fase, la señal de la primera línea de parada cambia a verde, permitiendo entrar a la glorieta tanto los vehículos que van derecho, como aquellos que giran a la izquierda; sin embargo, los vehículos que van a girar a la izquierda no pueden seguir como usualmente lo hacían; al contrario, deben parar en la segunda línea de stop y esperar hasta que esta les permita el paso. Esto se alterna con la segunda fase en donde, los vehículos que estaban en la segunda línea de stop tendrán luz verde y aquellos que iban recto, tendrán que parar (Sun, Ma, & Huang, 2016).

La capacidad de una glorieta semaforizada es más sensible a variaciones en los valores de los parámetros de la señal, por lo tanto, se recomienda diseñar cuidadosamente estos parámetros para asegurar la más alta capacidad. Los tiempos de verde están determinados por los movimientos que van derecho, ya que, los vehículos que van a la izquierda pueden empezar más tarde para evitar el desborde de vehículos en la cola de la segunda línea de parada. Además, el tiempo de verde para los vehículos que giran a la izquierda no necesitan ser igual al de los que van recto; debido a que hay limitación en el área de almacenaje frente a las segundas líneas de parada (Sun, Ma, & Huang, 2016).

5.7 Conclusiones de la Revisión Bibliográfica.

Los estudios en general se enfocan en el diseño óptimo de la longitud del ciclo de la señal semafórica, esto debido a que la capacidad de las glorietas semaforizadas es muy sensible a cambios en este factor de tiempo. También presentan diseños de fases para agilizar el flujo y reducir las demoras.

Por otro lado, para señalar una glorieta, no es necesario señalarla completamente, en algunos casos se podría optar por señalar solo aquellas entradas que presentan flujos dominantes y que por lo tanto desbalancean el rendimiento de la misma. A demás, tampoco es necesario que la señalización funcione a tiempo completo, pues se puede regular por periodos de tiempo donde la glorieta presenta deficiencias de rendimiento, por ejemplo, en las horas pico.

La mayoría de glorietas semaforizadas se encuentran en Europa, con mayor presencia en España; esto se debe, según varios autores, al incremento de la demanda vehicular y los grandes volúmenes peatonales que se presentan en las plazas, debido al atractivo que tienen estas estructuras viales.

En Colombia las glorietas se han semaforizado debido a que se excede su capacidad de operación, presencia de flujos no balanceados o inseguridad para el peatón. El bajo rendimiento de una glorieta no siempre es por factores de tiempo o espacio, también puede darse por desconocimiento de cómo se aborda, transita y se sale de esta (Mejía Angel, 2011).

Finalmente, a pesar de que existen diferentes estudios sobre señalización en glorietas, no se encontró información sobre glorietas de grandes dimensiones como la glorieta de San Francisco.

6 Caracterización de la Zona de Estudio

Para caracterizar la zona de estudio se definió y recolectó toda la información primaria y secundaria relacionada con las áreas de actividad, perfiles viales, estado de andenes, calzadas y de señalización vial en general. Además, se registró la configuración semafórica existente y se determinó la hora de máxima demanda mediante el análisis de aforos vehiculares en diferentes puntos de la zona de estudio.

6.1 Zona de Estudio

La zona de estudio se presenta en la figura 7 y se determinó con base en el reconocimiento visual en campo de las vías que se ven afectadas por los niveles de congestión del sector. Lo anterior debido a que, al generarse colas en las entradas de la glorieta, estas se propagan a lo largo de aproximadamente 500 metros a la redonda. No obstante, la caracterización de la zona de estudio se limitó a la zona de influencia directa de la glorieta, como punto crítico de movilidad del sector, de forma que se considera en todos los casos, las repercusiones de esta última en calles aledañas.

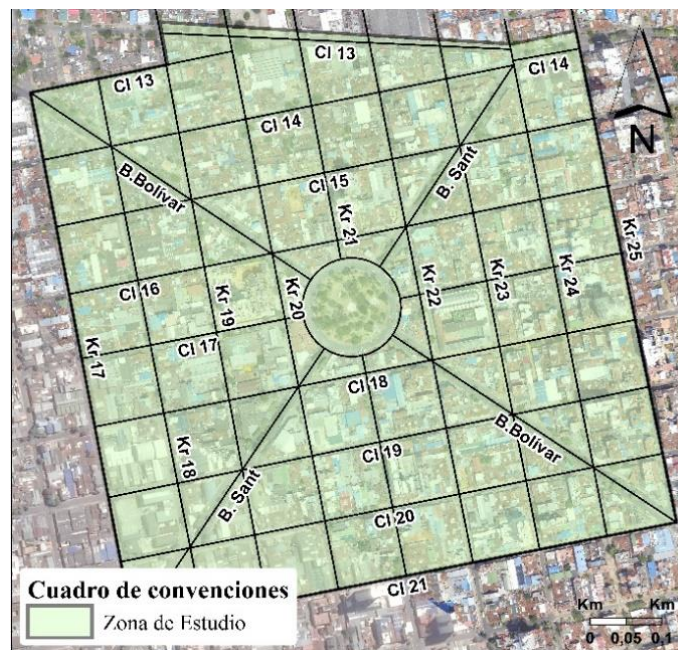


Figura 7. Zona de estudio

La caracterización de la zona de estudio comprende la delimitación de la zona de influencia directa. A esta última se le realizó una identificación de los factores más relevantes relacionados con la movilidad vehicular y peatonal mediante la recolección y análisis de información primaria y secundaria del estado físico y normativo de perfiles viales, calzadas, andenes, señales horizontales, señales verticales, aforos vehiculares, entre otros.

6.2 Zona de Influencia Directa

La zona de influencia directa se determinó como un área menos extensa dentro de la zona de estudio, la cual permite recopilar información suficiente para el correcto análisis de los factores que inciden en la generación de la problemática actual y que permitirán identificar claramente los factores que en ella intervienen. Está delimitada de sur a norte por las calles 19 y 15, y de oeste a este por las carreras 19 y 23; en la figura 8 se puede observar la zona de influencia directa.

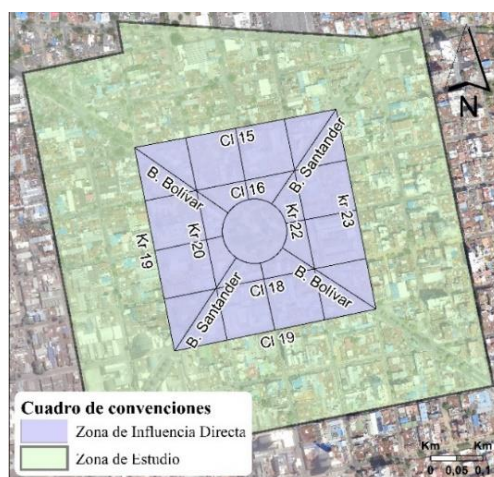


Figura 8. Ubicación de la zona de influencia directa

6.3 Ubicación de la Zona de Estudio.

Se encuentra ubicada en el barrio San Francisco de la comuna 3 en la ciudad de Bucaramanga, Santander. Limita al oriente con la comuna 13 Oriental, al occidente con la comuna 14 Morrorico, al norte con la comuna 2 Nororiental y al sur con la comuna 15 Centro. La glorieta es la principal

conexión entre el acceso norte de la ciudad y el acceso Este de la misma, por lo que el tráfico de tracto camiones es muy común en esta zona.

6.4 Áreas de Actividad en la Zona de Estudio.

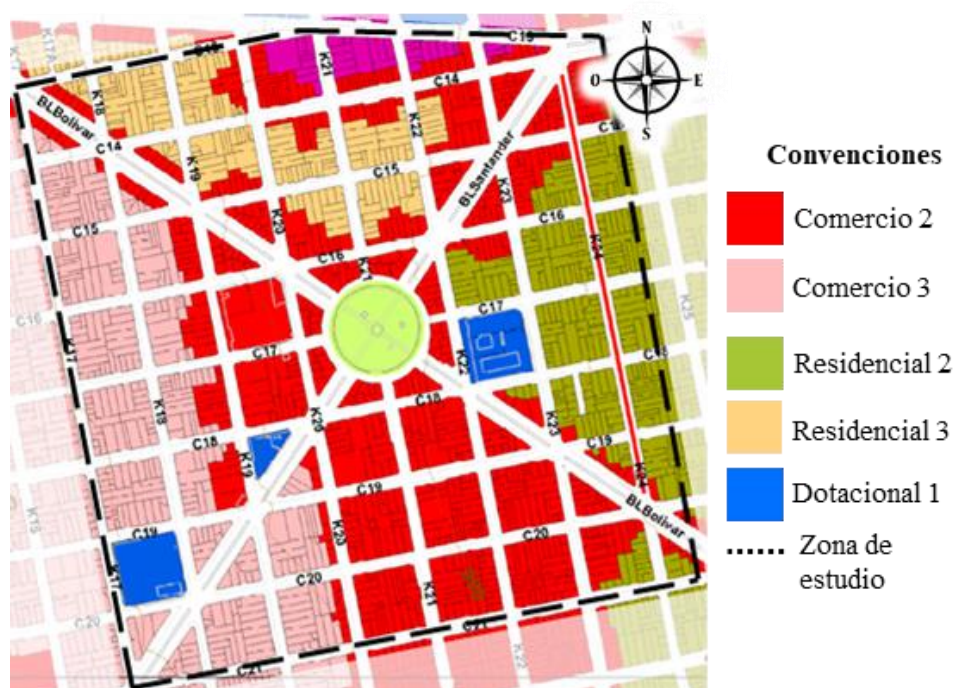


Figura 9. Áreas de actividad. Nota: Adaptado de POT Online Bucaramanga. (s.f.). Recuperado el 14 de noviembre, 2018, de: <https://bit.ly/2FHvxmI>

Como se puede observar en la figura 9 el área de actividad que predomina la zona de estudio es la comercial (rojo y rosado), sin embargo, también se evidencia un fuerte uso residencial en la zona representado por los colores verde y beige. Lo anterior sumado a la presencia de un parque en el centro de la glorieta y equipamientos como la parroquia San Francisco de Asís, el colegio Virrey Solís y el colegio Americano (Azul), explica en gran medida los altos volúmenes vehiculares reflejados en el sector (CONSEJO DE BUCARAMANGA, 2014).

6.5 Caracterización de la malla vial de la zona de estudio.

El Boulevard Bolívar es una red primaria cuyo propósito es servir de conexión al territorio metropolitano y municipal, permitiendo la articulación con los circuitos regionales y nacionales. Por esta vía transitan además del tráfico liviano general, vehículos de carga pesados con dirección a Cúcuta y al norte del país, entre otros.

La zona de influencia directa comprende vías de conexión urbana secundarias y terciarias de gran importancia como lo son el Bulevar Santander y la carrera 21. Su propósito además de articularse con vías primarias y alimentar las zonas urbanas, es el de canalizar el tráfico vehicular rápido en vías secundarias y el tráfico lento sobre vías terciarias para el tráfico público y privado.

Las demás vías pertenecen a redes locales de nivel 1 y 2 que se encargan de penetrar en los sectores residenciales y canalizar los flujos vehiculares públicos, privados y peatonales. La anterior distribución puede verse en la figura 10.

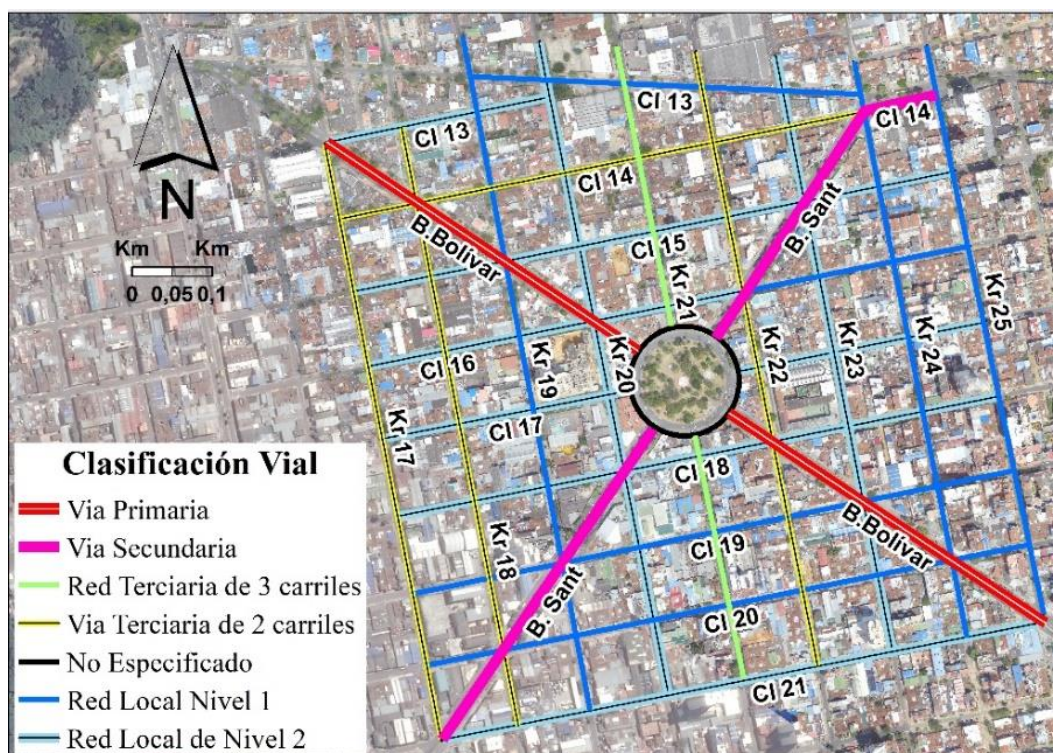


Figura 10. Jerarquía vial de la zona de estudio.

En la siguiente tabla se presentan las características de algunas vías mencionadas de la zona de influencia directa.

Tabla 2.

Vías importantes de la zona de influencia

Tramo vial	Clasificación	Características
Boulevard Bolívar	Red primaria	Debido a su importancia como principal conector entre la vía al mar y la vía a Cúcuta, posee una carga vehicular importante, sobre todo vehículos de carga pesados.
Boulevard Santander	Red secundaria	Conecta el suroccidente con el nororiente siendo así una opción importante para aquellos vehículos que se trasladan con dirección a la Universidad Industrial de Santander y sectores aledaños; Así como también, para aquellos que se dirigen al centro más hacia el occidente.
Carrera 21	Vía terciaria de 3 carriles	Alta demanda de vehículos que se transportan desde el centro más hacia el oriente hasta el norte de la ciudad, posee rutas de transporte masivo y convencional
Carrera 19	Red local de nivel 1	Transporta en su mayoría flujos vehiculares provenientes del centro de la ciudad y los conecta con la zona norte, al igual que la carrera 21, posee rutas de transporte convencional y masivo.

6.6 Caracterización de la zona de influencia directa

En adelante, información primaria entiéndase por toda aquella que se recolectó directamente por el autor en levantamientos de campo, e información secundaria como una referencia a cualquier dato o conjunto de datos proporcionados u obtenido de terceros. La principal fuente de información

secundaria se suministró por parte del grupo de investigación *Geomática, gestión y optimización de sistemas* de la Universidad Industrial de Santander, seguido de documentos técnicos normativos nacionales, departamentales y municipales.

Para la caracterización de la zona de influencia directa, se realizó una inspección visual con registro fotográfico de las vías que la conforman. Adicionalmente, se registraron medidas como ancho de calzada, anchos de separadores y andenes de las vías, seguido de un registro cuantitativo y cualitativo de la señalización vial y daños de calzadas. Se complementó la caracterización mediante información secundaria, la cual comprende la inclusión de aproximadamente el 50% de las dimensiones de los perfiles viales y andenes que conforman el sector en estudio. Se realizó este registro con el fin de generar un diagnóstico del estado físico y normativo actual de la malla vial e infraestructura peatonal que comprende la zona. En total se inventariaron 48 perfiles viales, los cuales se presentan en la figura 11 resaltados en color verde.



Figura 11. Vías inventariadas.

6.6.1 Perfiles viales. Parte de la caracterización, comprende la verificación del cumplimiento normativo de los perfiles viales con respecto a los estipulados en el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio (POT), dichos perfiles normativos se presentan en el Apéndice C. El proceso de levantamiento de información se llevó a cabo registrando las dimensiones de ancho de calzada, ancho de andén, separador y altura de andén. Se determinó un punto medio como referencia general para caracterizar cada tramo. La tabla de registro se presenta en el Apéndice D.

En la figura 12 se identificaron gráficamente los corredores viales con su respectivo tipo de perfil normativo

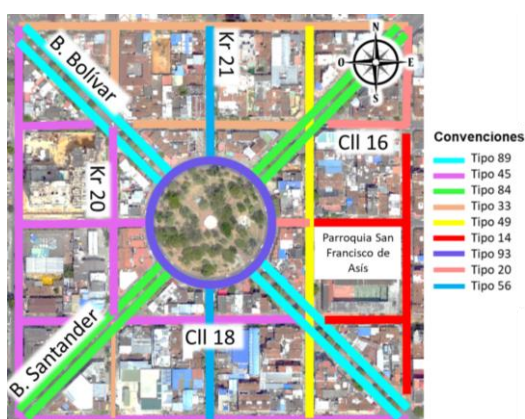


Figura 12 Vias correspondientes a cada tipo de perfil.

Algunas de las dimensiones normativas para cada tipo de perfil se presentan en la **Tabla 3**, la información detallada del cumplimiento de los perfiles normativos se encuentra en el Apéndice E.

Tabla 3.

Perfiles viales normativos.

Perfil tipo	Andén A [m]	Calzada 1 [m]	Andén B [m]	Sep. Central [m]	Calzada 2 [m]
14 13 m - B	3	7	3	-	-
33 15 m - F	4	8	4	-	-
45 16 m - E	4	8	4	-	-
49 17 m - A	4.5	9	4.5	3	9
84 30m - A	4	9	4	-	-
89 33m - A	5	10.5	5	2	10.5
56 19 m - A	4.7	9.6	4.7	-	-
20 17 m - A	4	9	4	-	-

La malla vial que comprende la zona de influencia directa presenta un porcentaje de incumplimiento de la norma de un 95.83 %, en la figura 13 se presentan los corredores viales que están en cumplimiento, los cuales corresponden a la calle 17 # 22 y calle 18 # 22.



Figura 13. Cumplimiento de perfiles viales normativos

6.6.2 Estado de Andenes. Mediante una inspección visual en campo se determinó la presencia de obstáculos en los andenes, tales como: grupos de escalones, árboles, postes de luz y bancas, además, el estado físico y el material que los constituye. Esta información se encuentra tabulada y organizada en el Apéndice F.

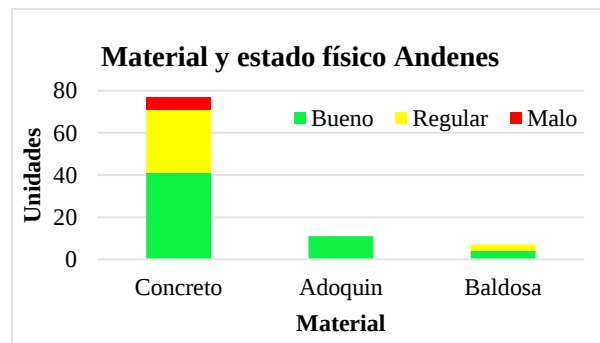


Figura 14. Distribución del estado físico de los andenes según su material.

Como se observa en la anterior figura, el tipo de material con mayor frecuencia de uso en los andenes de la zona de influencia es el concreto; con un porcentaje de uso del 80%, seguido del adoquín con un porcentaje del 12% y finalmente, la baldosa con el 7%. En cuanto al estado físico, el 58% de los andenes registrados se encuentran en condiciones físicas regulares, el 35 % se encuentran en buen estado y el 7% restante en mal estado.

Como se aprecia en la figura 14, el estado físico de los andenes se encuentra en un estado regular, por lo que es recomendable intervenirlos con el fin de mejorar las condiciones de movilidad y comodidad de los peatones. Para el caso del Adoquín, los andenes con este tipo de material están recién contruidos y por esto todos presentan condiciones físicas favorables.

En cuanto a los obstáculos, en la tabla 4 se presenta el resumen de la cantidad total de obstáculos registrados en la de la zona de influencia. Sin embargo, en cuanto a otro tipo de obstáculos que no se registraron debido a que su presencia en el andén no es permanente, se observó la concurrencia indiscriminada de vehículos estacionados en la franja de circulación peatonal; obligando a los peatones a ingresar de forma peligrosa en la calzada vehicular.

Tabla 4.
Obstáculos y discontinuidades en los andenes.

Obstáculo	Cantidad	%
Postes eléctricos	289	36%
Grupos de escalones	159	20%
Bancas	17	2%
Arboles	328	41%

6.6.3 Estado de Calzadas. Se realizó una inspección visual mediante el uso de una cámara 360°cam identificando, clasificando y determinando la severidad de las fallas o alteraciones presentes en la calzada con base en el Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles (Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Vías, 2006). Se determinó el estado de la capa de rodadura, el tipo de pavimento y el daño sobre cada corredor vial. La información obtenida se presenta en el Apéndice G.

Para las vías en estudio, se encontraron fallas tales como: fisuras longitudinales y transversales, daños en la capa asfáltica relacionados con desintegración, piel de cocodrilo, descascaramiento y baches. Adicionalmente se encontraron deformaciones como ondulaciones o abultamientos. En la figura 15 se presentan ejemplos de algunas de las fallas encontradas.

Todos los corredores viales de la zona de influencia que se inspeccionaron están compuestos por pavimento flexible. El daño con mayor frecuencia es el desgaste superficial; con una participación del 17%, seguido de los baches, descascaramiento de la capa de rodadura, parches y otros daños.

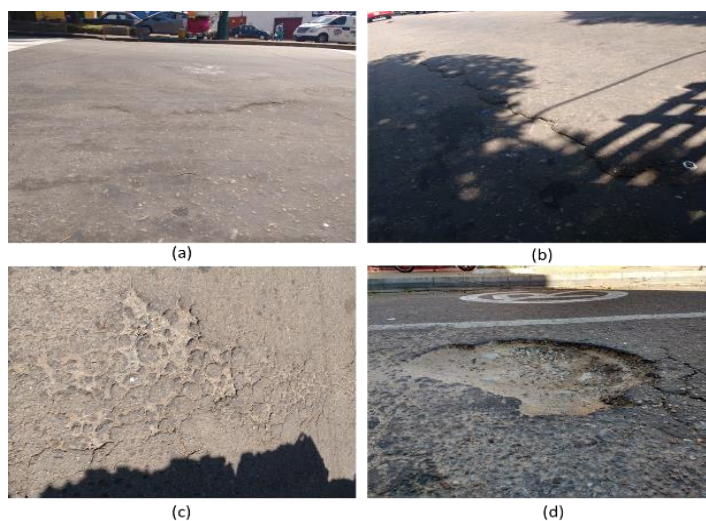


Figura 15. Tipos de fallas (a) Ondulaciones, (b) Abultamiento, (c) Descascaramiento, (d) Bache.

Con respecto al estado físico del pavimento, en total se registraron 170 daños en la capa asfáltica de la red en estudio, con grados de severidad baja, media y alta. En la figura 16 se presenta un resumen de los daños y distribución de severidades de cada uno. Es necesario aclarar que las abreviaturas D.S y DES significan Desgaste Superficial y Descascaramiento respectivamente. La tabla con el registro de cada falla se encuentra en el Apéndice H.

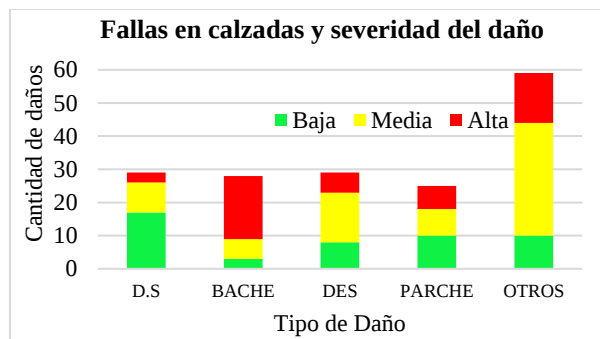


Figura 16. Severidad por tipo de daño.

En promedio el 42% de las fallas presentan un estado de severidad media (amarillo), seguido de la severidad alta (color rojo) con un porcentaje de 30% y Baja (color verde) con 28% del total de daño.

A pesar de la gran cantidad de fallas encontradas, es necesario resaltar el hecho que 3 corredores viales presentaron condiciones físicas muy buenas dado que fueron intervenidas recientemente, estos son la calle 18 con carrera 22, calle 16 con carrera 22 y la carrera 23 calle 18.

6.6.4 Señalización Vertical. Se realizó un inventario de la señalización vertical existente en la zona de influencia, clasificándose en señales preventivas, reglamentarias, informativas y transitorias, con su respectiva codificación y estado físico.

El estado físico de la señal se clasificó en tres categorías, Bueno, Regular y Malo, donde “Bueno” corresponde a aquellas señales cuya pintura reflectora no esté decolorizada y posea los colores normativa, además de no presentar ningún tipo de torceduras o daños como zonas oxidadas

o faltantes. En la categoría “Regular” entran aquellas señales que posean daños parciales de pintura, panfletos o marcas de grafiti. Finalmente, la categoría “Malo” abarca las señales que no son visibles, tienen dobleces o deterioro avanzado (Ministerio de Transporte, 2015).

Se registraron 42 señales verticales (Ver Apéndice H), entre señales preventivas, informativas y reglamentarias. El 79% corresponden a las señales reglamentarias, el 14% a señales informativas y el 7% son señales preventivas. En promedio el 78% de las señales verticales presenta un estado físico “Bueno”, el cual corresponde a aquellas señales cuya pintura reflectora no esté decolorada ni posea algún tipo de torceduras o daños como zonas oxidadas o faltantes. El 17% presenta irregularidades de pintura que las clasifican como “Regulares” y el 2% restante está en condiciones de deterioro considerables lo que las ubica en la categoría de estado físico “Malo”.

En la figura 17 se presenta el resumen del estado físico por tipo de señal. El resultado del levantamiento permite concluir que el sistema de señalización vial vertical está en óptimas condiciones físicas, lo cual es importante para un correcto control vehicular.

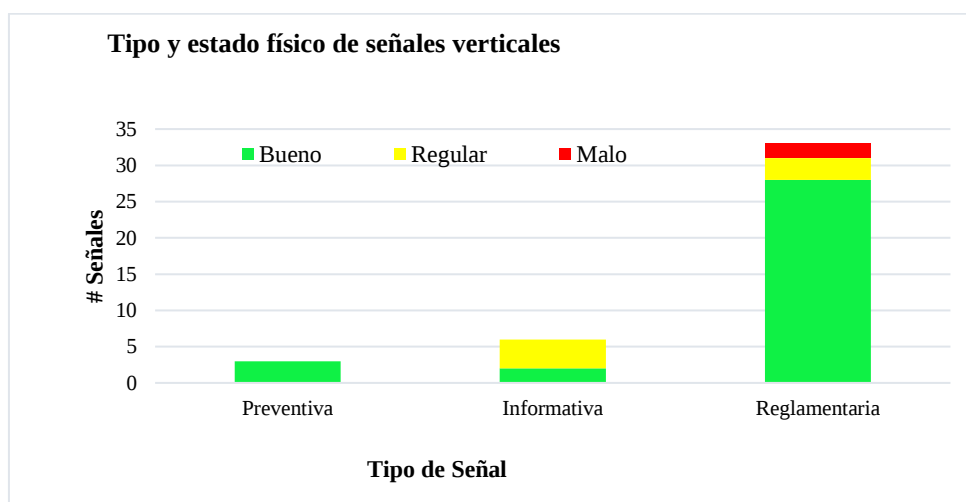


Figura 17. Estado físico por tipo de señal.

6.6.5 Señalización Horizontal. Se realizó un procedimiento muy similar al anterior, basandose en las indicaciones del manual de señalización del INVIAS, igualmente el estado físico se clasificó en tres categorías: Bueno, Regular y Malo. Un estado físico “Bueno” hace referencia a un estado optimo de demarcación, “Regular” presenta daños parciales en la pintura y “Malo” es el estado físico donde la señal no es visible. Los datos recopilados se encuentran en el Apéndice I.

En la figura 18, se presentan los tipos de señales horizontales y su estado físico, según el levantamiento de campo realizado. Se registraron 65 señales horizontales en donde, el 46% pertenece a señales de “Pare”, el 15% a “Cebra”, 2% a “Paradero de Bus”, 2% a “Zona Escolar”, 9% a “Prohibido Parquear” y 26% a flechas de giros permitidos. Se puede encontrar información más detallada sobre el levantamiento en el Apéndice J.

Como se evidencia en la figura 18, las señales horizontales presentan condiciones físicas regulares, esto quiere decir que poseen perdidas parciales de visibilidad debido al continuo paso de vehículos y poco o nulo mantenimiento que se les ha realizado.

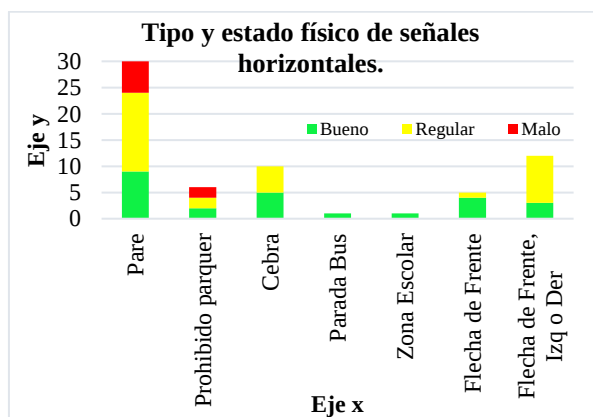


Figura 18. Estado Físico por tipo de señal horizontal.

6.6.6 Semáforos. El comportamiento del tránsito dentro de la zona de estudio se ve afectado por la presencia de 4 intersecciones semaforizadas. Por tal razón fue necesario hacer un registro de las fases y tiempos semafóricos de cada intersección, así como determinar el desfase entre cada fase para mejorar el nivel de aproximación del modelo, ver tabla 5. El registro y análisis de las fases se encuentra en el Apéndice J

Tabla 5.

Fases y tiempos semafóricos existentes en la zona de estudio.

Intersección	Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Desfase
Cll 20 con Kr 18	28	28	19	N/A	77
Cll 19 con Kr 19	31	29	15	N/A	73
Cll 15 con Kr 19	11	19	11	29	0
Cll 18 con Kr 21	19	38	18	N/A	2

Nota: Los valores numéricos están dados en segundos y representan el tiempo de verde de cada fase.

6.7 Volúmenes vehiculares.

Para el registro de volúmenes vehiculares se contó con información primaria y secundaria (ver apéndice K). La información secundaria constó de aforos vehiculares de todos los accesos y salidas de la glorieta de San Francisco; realizados en tres franjas horarias: entre las 6:15 am a 8:30 am, 11:15 am a 1:30 pm y 5:00 pm a 7 pm. La información primara se recolectó en campo los días martes 22 y jueves 24 de mayo del 2018, en 4 puntos ubicados cada uno en un bulevar diferente. Estos puntos de aforo se determinaron debido a un análisis en campo de la congestión presente en el sector. En la figura 19 se pueden observar los puntos aforados.

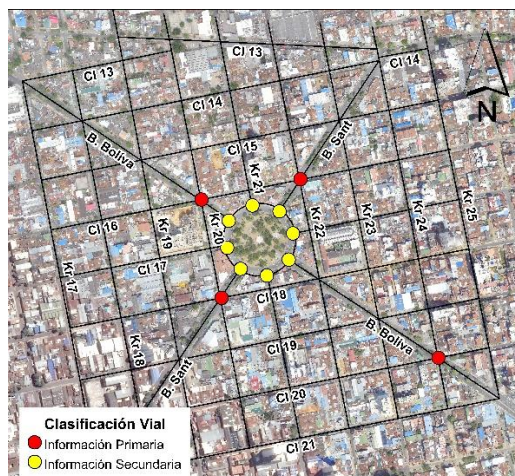


Figura 19. Estaciones de conteos vehiculares.

Para el cálculo de los volúmenes vehiculares, se identificaron y se codificaron los giros de acuerdo a la dirección de origen y destino de los vehículos en cada intersección, con base en el manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte (Cal y Mayor y Asociados, Alcaldía Mayor de Bogotá, 2005) como se observa en la figura 20. La geometría de una de las intersecciones aforadas y la codificación que se tomó de ejemplo se presentan en la figura 21.

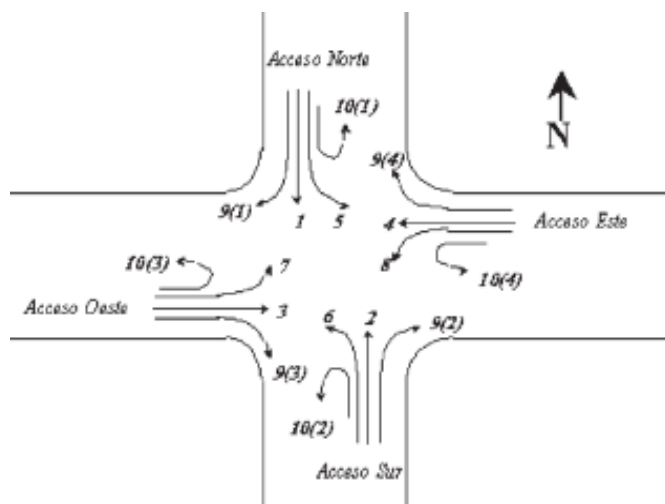


Figura 20. Nomenclatura para los movimientos vehiculares en una intersección. Nota: Adaptado de Manual de Planeación y diseño para la administración del tránsito y el Transporte, 2005. Tomo III Figura 5.3.



Figura 21. Nomenclatura tipo para las intersecciones aforadas.

Con el fin de identificar los flujos vehiculares más cargados y la hora pico del sector en estudio, fue necesario convertir los flujos de vehículos mixtos a vehículos equivalentes. Lo anterior permite expresar cada modo de transporte como un vehículo equivalente. Los factores de equivalencia empleados se tomaron del Manual de diseño geométrico de carreteras (2008) y se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.

Factores de equivalencia vehicular

Modo	Factor Equivalente
Bicicleta	0.5
Moto	0.75
Liviano	1
Bus	2.8
Camión	2.8

Nota: Adaptado de Manual de diseño geométrico de carreteras (2008).

6.7.1 Hora de máxima demanda. La hora punta o de máxima demanda, se determinó en el periodo comprendido entre las 11:30 am y las 12:30 pm, como se puede observar en la figura 22. El pico máximo de flujo se encuentra en este intervalo de tiempo, encontrándose que el acceso a la glorieta con mayor flujo es el ubicado al Sur de la glorieta con un total de 1327 vehículos mixtos, seguido del acceso Sur-Oeste con 1127 y el acceso Sur-Este con 1216.

En el Apéndice L, se encuentra la información detallada con la participación vehicular de cada acceso en el sector en estudio.

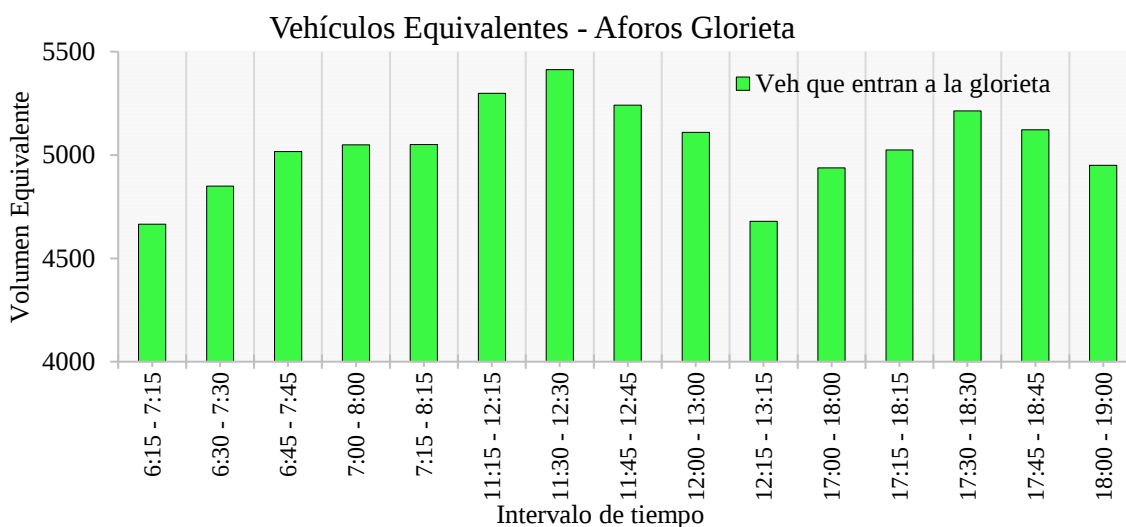


Figura 22. Vehículos Equivalentes en la glorieta.

Adicionalmente, se analizó la distribución modal del tráfico vehicular, encontrando que las motocicletas son los vehículos con mayor presencia en la glorieta, seguidas de los vehículos livianos como taxis, autos y camionetas particulares, y los vehículos pesados como buses, camiones y tracto camiones, ver figura 23.

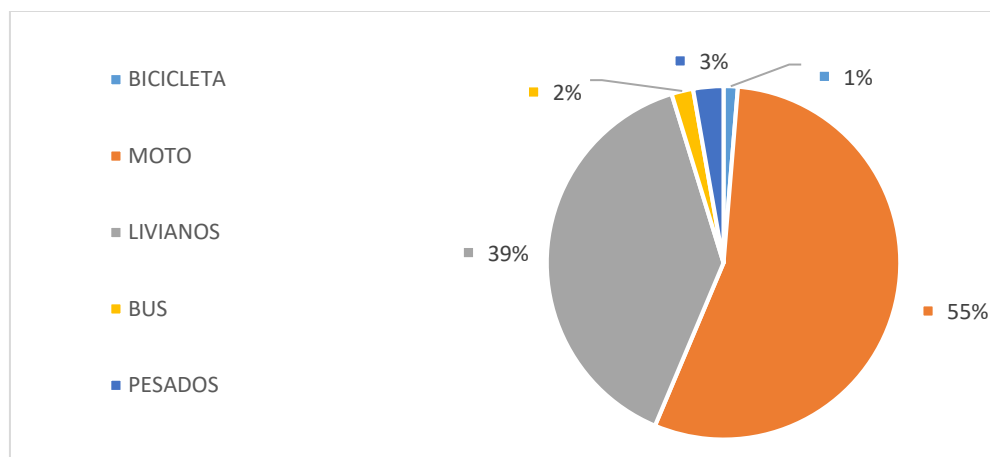


Figura 23. Distribución modal en el sector para la hora pico.

7 Análisis de la Situación Actual

A continuación, se describen los principales parámetros considerados en la calibración y validación del modelo de simulación realizado como soporte para el análisis de los resultados de la situación actual.

7.1 Estructuración de la red vial.

El software de micro simulación Transmodeler utilizado para la creación del modelo, fue proporcionado por el grupo de investigación Geomática. Con la información primaria y secundaria de los perfiles viales se procede a generar la trama vial de la zona de estudio asignando la jerarquía vial que le corresponde a cada corredor, se establecieron los giros permitidos de cada intersección y demás componentes normativos para el correcto control de los vehículos como señales viales y semáforos.

7.2 Asignación de los flujos de la red de micro simulación.

La asignación de los vehículos se generó a partir de los datos recopilados de los diferentes aforos y su debido procesamiento. Se definieron cuatro modos de transporte como entrada para el

programa, los cuales son: moto, auto liviano, bus y camión. La matriz generada de cada modo de transporte se encuentra detallada en el Apéndice M.

Como los aforos realizados en la glorieta y en las intersecciones fueron tomados en fechas diferentes; se hace un ajuste teniendo en cuenta los valores más críticos que salen y entran de la glorieta; esto se hace calculando los porcentajes únicamente de los flujos vehiculares de las intersecciones que van hacia la glorieta y los que vienen de la misma y trabajando esos porcentajes con los aforos de la glorieta, así se garantiza coherencia con los valores y se minimiza la brecha de error puesto que si en el aforo de una intersección 100 vehículos se desplazan hacia la glorieta, pero en la glorieta solo entran 120, faltarían 20 vehículos.

Dado que la glorieta presenta más accesos y salidas que una intersección tradicional; era necesario determinar los aportes vehiculares de cada entrada a cada salida para así asignar de forma precisa el destino de cada vehículo que ingresaba a la rotonda. Para esto se hizo uso de un dron, proporcionado por el grupo de investigación Geomática, el cual sobrevoló la rotonda a una altura de aproximadamente 200 metros (ver figura 24) para garantizar la cobertura de todos los accesos, y mediante videgrabación se registraron los movimientos de los vehículos que ingresaban a la rotonda por un lapso de 30 minutos.

Posterior a la toma de datos, se procede a contabilizar el tipo y número de vehículos que aportaba cada acceso a cada salida y así establecer porcentajes de aporte por entrada. Estos porcentajes fueron trasladados a los aforos inicialmente tomados para finalmente obtener las rutas realizadas aproximadamente por los vehículos aforados.



Figura 24. Captura de video realizado por el dron.

En la tabla 7 se puede ver un fragmento de lo que fue la toma de datos de los video registros del dron.

Tabla 7.

Matriz O-D aforo aportes de motos de cada acceso de la glorieta

O/D	B. Santander (NE)	B. Santander (S O)	Cra21 (N)	B. Bolívar (N-O)	Calle 17 (O)	B. Bolívar (S-E)
Calle 17 (E)	7	19	16	24	9	2
B. Santander (NE)	0	189	11	10	29	13
B. Bolívar (NO)	14	1	0	0	0	184
B. Santander (SO)	208	0	46	2	3	21
Cra21 (S)	131	4	105	80	16	13
B. Bolívar (SE)	15	24	143	146	20	6

Nota: N = Norte, S = Sur, E = Este, O = Oeste, NE = Noreste, NO = Noroeste, SE = Sureste, SO = Suroeste

Siguiente a la extracción de información, se procede a hacer el análisis numérico y estadístico de los datos, obteniendo finalmente una matriz origen-destino con porcentajes presentada en la tabla 8:

Tabla 8.

Matriz O-D porcentajes de aporte de motos de cada acceso de la glorieta

O/D	B. Santander (NE)	B. Santander (S O)	Cra21 (N)	B. Bolívar (N-O)	Calle 17 (O)	B. Bolívar (S-E)
Calle 17 (E)	9%	25%	21%	31%	12%	3%
B. Santander(NE)	0%	75%	4%	4%	12%	5%
B. Bolívar (NO)	7%	1%	0%	0%	0%	92%
B. Santander(SO)	74%	0%	16%	1%	1%	8%
Cra21 (S)	38%	1%	30%	23%	5%	4%

B. Bolívar (SE)	4%	7%	40%	41%	6%	2%
-----------------	----	----	-----	-----	----	----

Nota: N = Norte, S = Sur, E = Este, O = Oeste, NE = Noreste, NO = Noroeste, SE = Sureste, SO = Suroeste

Finalmente se calculan la cantidad de motos, vehículos livianos, buses y camiones que cada acceso provee a cada salida de la rotonda para así, determinar con mayor precisión los orígenes y destino de la matriz principal, ver tabla 9.

Tabla 9.

Matriz de aporte final para motos

O/D	B. Santander (N-E)	B. Santander (S-O)	Cra21 (N)	B. Bolívar (N-O)	Calle 17 (O)	B. Bolívar (S-E)
Calle 17 (E)	13	36	31	46	17	4
B. Santander (NE)	0	348	20	18	53	24
B. Bolívar (NO)	37	3	0	0	0	487
B. Santander (SO)	488	0	108	5	7	49
Cra21 (S)	287	9	230	175	35	28
B. Bolívar (SE)	31	49	292	299	41	12

Nota: N = Norte, S = Sur, E = Este, O = Oeste, NE = Noreste, NO = Noroeste, SE = Sureste, SO = Suroeste

Es necesario resaltar que, para la asignación definitiva de la matriz de motos, se divide en dos la cantidad real de motocicletas, esto debido a que en campo las motocicletas se acomodan dos en un mismo carril y Transmodeler asigna un carril completo para una sola moto.

7.3 Matriz origen-destino principal para asignación de flujos

Se programó una hoja de Excel donde se introdujo toda la información con respecto a cantidades, tipo y direcciones de vehículos. A continuación, se muestra un cálculo tipo empleado para calcular la cantidad de motos que se le asignaron a un par origen destino:

El siguiente cálculo se empleó para determinar el número de motocicletas cuya ruta va desde la carrera 22(Origen A), gira en el boulevard Santander hacia la glorieta, viaja a través de la glorieta y sale por el brazo Suroccidente, para finalmente girar hacia la carrera 20 en dirección sur (Destino B), ver figura 25.



Figura 25. Ruta ejemplo para la asignación de flujo a un par Origen-Destino

Para el cálculo correcto de la cantidad de motos que siguen esta ruta, se necesita información de 3 aforos; la Tabla 10 presenta la información obtenida del análisis del aforo realizado en la carrera 22 con calle 16, la Tabla 11 contiene la información de los aforos realizados en la glorieta y finalmente la Tabla 12 muestra la cantidad de motos aforadas en la intersección de la carrera 20 con calle 18 que provienen de la glorieta, todos los valores están en vehículos equivalentes.

Tabla 10.

Aforo motos intersección B. Santander con cra 22 y cll 16

ORIGEN	DESTINO	ADE	Porcentaje
N	NE	12	4%
N	E	33	11%
N	S	142	49%
N	GLORIETA	102	35%
	Total	289	100%

Nota: N = Norte, S = Sur, E = Este, O = Oeste, NE = Noreste, NO = Noroeste, SE = Sureste, SO = Suroeste

Tabla 11.

Aforo Glorieta – Flujo motos de aporte de cada acceso a la salida Suroccidente

ORIGEN	DESTINO	ADE	PORCENTAJE
Calle 17 (E)	SO	14	25%
B. Santander (NE)	SO	131	75%
B. Bolívar (NO)	SO	1	1%
B. Santander (SO)	SO	0	0%
Cra21 (S)	SO	3	1%
B. Bolívar (SE)	SO	18	7%
Total		167	108%

Nota: N = Norte, S = Sur, E = Este, O = Oeste, NE = Noreste, NO = Noroeste, SE = Sureste, SO = Suroeste

Tabla 12.

Aforo motos Intersección B. Santander con cra 20 y cll 18

ORIGEN	DESTINO	ADE	Porcentaje
Glorieta	E	3	1%
Glorieta	S	46	16%
Glorieta	SO	235	83%
Total		284	100%

Nota: N = Norte, S = Sur, E = Este, O = Oeste, NE = Noreste, NO = Noroeste, SE = Sureste, SO = Suroeste

A continuación, se presenta el cálculo tipo de la cantidad de motos a ingresar en la matriz o-d correspondiente al par A-B del ejemplo.

$$\#Motos_{a-b} = Motos_{Norte-Glorieta} * \%aporte_{B.Santander(NE)-B.Santander(SO)}$$

$$* Motos_{Glorieta-Sur} \#Motos_{a-b} = 102 * 75\% * 16\%$$

$$\#Motos_{a-b} = 12 \text{ motos en vehiculos equivalentes}$$

Dado que los valores están dados en vehículos equivalentes y que en el software se ingresa el valor real de motocicletas, se divide el resultado por 0.75 que es el factor multiplicador correspondiente para convertir motos en vehículos equivalentes.

$$\#Motos_{a-b} = \frac{12}{0.75} = 16 \text{ motos}$$

Por lo tanto, el valor de asignación que corresponde al par Origen-Destino A-B es de 16 motos.

En el modelo, este par está conformado por los nodos 22 y 31, ver figura 26.

		Destino				
Origen		12	18	23	27	31
	14	115.00	17.00	3.00	37.00	1.00
	17	15.00	8.00	0.00	1.00	3.00
	22	44.00	16.00	189.00	44.00	16.00

Figura 26. Fragmento de la matriz origen-destino de motos.

7.4 Calibración y validación del modelo

El proceso de calibración de un modelo de micro simulación consistió en la correcta configuración de los diferentes parámetros que posee el software, tales como: comportamiento del conductor, metodología para la distribución del flujo vehicular, geometría de los corredores, reguladores de tráfico, entre ellos los semáforos, señales de pare, ceda el paso y demás señales de tránsito.

Para validar correctamente el modelo se emplea el indicador GEH definida en la ecuación 1, nombrado así por su inventor Geoffrey E. Havers.

$$GEH = \sqrt{\frac{2 * (o - m)^2}{(O + M)}} \quad (1)$$

O = Volumen de tráfico observado en campo

M = Volumen de tráfico que pasa en el modelo

Según el Manual de modelación para carreteras de cuota (Transconsult, Secretaria de comunicaicones y transportes, Steer davies Gleave, 2006) un modelo de asignación de tráfico estará calibrado cuando de todos los corredores de control tengan un GEH inferior a 12, más del 95% un GEH menor a 10 y al menos el 60% posean un GEH menor a 5.

La siguiente tabla muestra que el modelo cumplió con los requerimientos de aceptación de la calibración, para ver el procedimiento de calibración dirigirse al Apéndice N.

Tabla 13.
Resultados de calibración

GEH < 5	69%
GEH < 10	100%
GEH < 12	100%

7.5 Configuraciones claves para el éxito de la calibración.

Fue necesario modificar distintos parámetros tanto de comportamiento del conductor como de algunas características de elementos propios del software además de, agregar tramos viales al modelo que no se consideraron en un principio y hacer uso de una herramienta llamada “Path”, esto con el fin de lograr una aproximación bastante adecuada del modelo de micro simulación a la situación actual del sector en estudio.

7.5.1 Parámetros de comportamiento y configuraciones. Como bien se sabe, los vehículos son conducidos por seres humanos con diferentes tipos de comportamientos a la hora de escoger la ruta de viaje, maniobras de conducción y en general con cultura vial diferente entre sí. Sin embargo, no se pueden abarcar todas las posibilidades, por lo que es necesario determinar un comportamiento en común, basándose en un margen de probabilidades que el software se encarga de calcular mediante el uso de ciertos parámetros y configuraciones que el diseñador elija.

Entre estos parámetros y configuraciones tenemos:

- **Route Choice:** Este parámetro presenta 3 métodos de asignación de tráfico, de este dependerá el criterio de elección de los conductores virtuales para ir por determinada ruta. Para este proyecto se escogió el método *Stochastic Shortest Path* o método del usuario estocástico; lo que se obtiene con este método es que el usuario escogerá ciertas rutas por donde pasar y evaluará factores como tiempos de viaje y penalizaciones que el programa le genera por determinadas maniobras como seguir derecho, giros a la

izquierda o derecha y giros en U, además de escoger el más rápido y económico, el usuario evalúa a medida que avanza desde su origen hacia su destino estos parámetros ya que, con el transcurrir del tiempo puede que otro tipo de ruta sea más efectiva para él; lo cual se acerca bastante a la realidad.

- **Trip Matrix Setting:** Consiste en la configuración que se le dará a la matriz de viajes, la cual contiene el número y tipo de vehículos que viajarán de un nodo de origen a un nodo de destino. Se manejaron 4 categorías vehiculares: motos, vehículos livianos, buses y camiones. El programa contiene tres tipos de vehículos livianos PC1, PC2 y PC3 cada uno con dimensiones distintas; se determinó que la categoría PC1 es la que más se aproxima al tamaño y de los vehículos que transitan por el sector en estudio. Para la categoría de camiones, Transmodeler posee dos: ST (single-unit trucks) y TT (Trailer trucks); en base a un análisis de los aforos vehiculares, se determinó que los camiones sin tráiler predominan en un 90% del total de camiones articulados y no articulados que transitan en la glorieta. Para las demás categorías como motos y buses el software solo maneja un tipo de vehículo para cada uno.
- **Path:** El Path es una herramienta que permite crear rutas de elección que se trazan entre un par O-D (origen-destino) para que los vehículos transiten por estos mismos, en el caso en el que existan dos o más path entre un mismo par O-D, los vehículos escogerán aquel que el método de selección determine. Dada la complejidad de la malla vial, fue necesario crear paths para que los vehículos tomaran ciertas rutas esenciales para la correcta calibración del modelo, es necesario resaltar que, esta herramienta es diferente a Route Systems o sistemas de rutas, ya que el segundo requiere que se configuren frecuencias de entrada de los vehículos a la red.

7.5.2 Modificaciones a la malla vial. Fue necesario hacer las siguientes modificaciones a la malla vial los siguientes tramos:

- Extensión de la carrera 21 hasta su intersección con la Avenida Quebrada Seca con el fin de regular el ingreso de los vehículos por el acceso Sur de la glorieta. Esta modificación contribuyó a una correcta regulación de los vehículos que avanzan por la carrera 21 ya que, sin este cambio los vehículos ingresaban a la red constantemente sin los espacios que el semáforo, que se ubica en la intersección anteriormente mencionada, genera.
- Extensión del Boulevard Bolívar hasta el semáforo ubicado en la carrera 15 con calle 11 y que regula el tráfico que se dirige hacia la glorieta por este boulevard.

Es necesario aclarar que los tiempos semafóricos de los semáforos ubicados en la Av. Quebrada seca con Cra 21 y en la carrera 15 con calle 11, se tomaron directamente en campo y se analizaron a la par con los semáforos que se encuentran en el sector de estudio inicial.

7.5.3 Lane Connectors y señalización en intersecciones. La configuración de estos elementos fue de suma importancia para la calibración del modelo. Debido a que las intersecciones a lo largo de los bulevares son de dimensiones considerablemente grandes, fue necesario modificar dos aspectos importantes que contienen los Lane connectors. Un Lane conector es un elemento de conexión entre dos segmentos de carretera que son interrumpidos por una intersección, cada uno posee un punto de parada y de ceda el paso. El punto de parada es aquel lugar donde el vehículo detendrá la marcha al acercarse a una intersección por cualquier motivo que lo requiera y el punto de ceda el paso es el punto de referencia en el cual el vehículo evaluará que tan factible es ceder el paso o seguir su marcha si ya ha pasado el punto de parada como se puede apreciar en la figura 27.

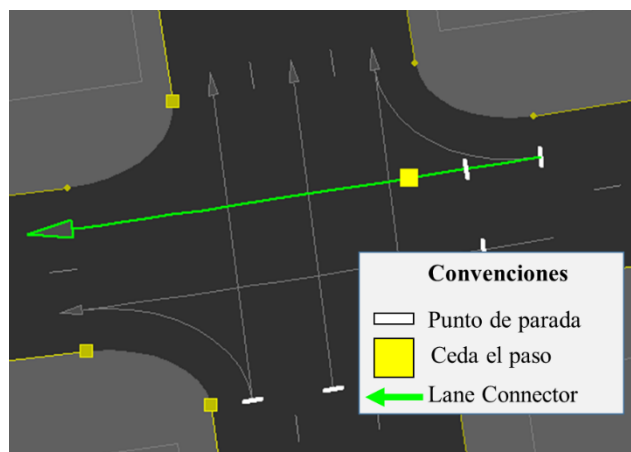


Figura 27. Lane Connector en una intersección.

También fue necesario adelantar las distancias de parada y de ceda el paso ya que, los conductores de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana poseen un comportamiento agresivo a la hora de conducir, esto se ve reflejado en el punto donde realmente se detienen para evaluar si deben realizar el respectivo pare o pueden seguir con su camino solo bajando un poco la velocidad; en la figura 28 se presenta un ejemplo de la modificación de los puntos de parada en la intersección entre el Boulevard Santander con Carrera 22 y Calle 16.

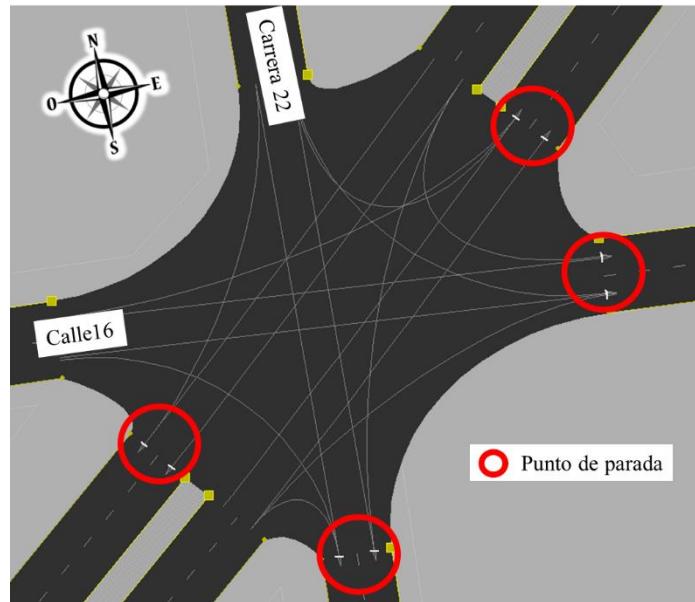


Figura 28. Puntos de parada en una intersección tipo.

Al modificar estos parámetros, no se hizo uso, en la mayoría de las intersecciones, de señales de pare o ceda el paso.

7.6 Nomenclatura de los tramos viales.

Para un adecuado entendimiento de la nomenclatura de los tramos viales, se procede a explicar la forma en la que se denomina cada calle o carrera, el nombre correspondiente a un tramo se da en función de si se está ubicado sobre una carrera o sobre una calle, así un tramo ubicado a lo largo de la carrera 21 llevara por primer nombre esta misma. El segundo nombre corresponde a la calle o carrera ubicada al norte o al oeste respectivamente, en la figura 29 se muestra un ejemplo de un tramo vial cuya nomenclatura será Carrea 21 Calle 18.



Figura 29. Nomenclatura de un tramo.

Para una correcta interpretación de la información relacionada con los corredores internos de la glorieta, fue necesario nombrar cada tramo de la glorieta como se observa en la figura 30.



Figura 30. Nomenclatura de tramos en la glorieta

7.7 Resultados de la Situación Actual

Algunos de los factores utilizados para la comparación de los escenarios de solución propuestos son, el tiempo total de demoras como factor indicativo de congestión, el tiempo total de paradas como la suma total del tiempo que cada vehículo estuvo inmóvil en los recorridos de entrada y salida de la red vial, el número de paradas totales que realizaron todos los vehículos, y el tiempo

total de viaje que requirieron todos los vehículos para completar sus viajes desde su origen hasta su destino. Los resultados de la simulación realizada para el escenario actual de la glorieta se presentan en la tabla 14.

Tabla 14
Resultados situación actual

Factores de la situación actual	
Tiempo total de paradas (segundos)	2.696
Número de paradas	10.513
Tiempo total de demoras (segundos)	3.675
Tiempo total de viaje (segundos)	259.292

Los resultados asociados a los niveles de servicio de los tramos viales más importantes, que para nuestro caso son los que están en ubicados al interior y en los accesos de la glorieta, se presentan en la tabla 15. Los niveles de servicio asociados a los demás tramos se encuentran en el Apéndice O.

Tabla 15
NDS Situación Actual

Corredor vial	NDS AB	NDS BA
Boulevard Santander Cra 20	F	B
Boulevard Santander Cra 21	F	A
Boulevard Bolívar Cra 20	F	A
Boulevard Bolívar Cra 21	F	F
Calle 17 Cra 20	A	-
Calle 17 Cra 21	F	-
Cra 21 Calle 16	B	-
Cra 21 Calle 17	F	-
Tramo rotonda R1	F	-
Tramo rotonda R2	F	-
Tramo rotonda R3	F	-
Tramo rotonda R4	F	-
Tramo rotonda R5	D	-
Tramo rotonda R6	A	-
Tramo rotonda R7	D	-
Tramo rotonda R8	E	-

Nota: NDS=Nivel de Servicio.

Con respecto a la tabla anterior, el sentido AB hace referencia al sentido de circulación de cada tramo vial, sin embargo, en el caso de los bulevares el sentido AB identifica el sentido de circulación que dirige a los vehículos en dirección hacia la glorieta, y el sentido BA representa el que dirige los vehículos en dirección opuesta a la glorieta.

8 Evaluación técnica del funcionamiento de la glorieta en estudio

Una vez realizada la evaluación de movilidad de la situación actual de la glorieta, se procedió a realizar una evaluación técnica del funcionamiento de la misma. Para esto fue necesario establecer el cálculo de su capacidad, lo que requirió datos del flujo vehicular en cada tramo, los cuales fueron tomados del modelo de simulación del sector.

Se Procedió a realizar el cálculo la capacidad vehicular que posee la glorieta actualmente, usando la metodología de análisis y determinación expuesta por Arboleda (Vélez, 2000), la cual se contrastó con los vehículos que actualmente transitan sobre ella. Se determinó que la capacidad se excede en los tramos R2, R3, R4 y R5 (ver figura 30), ya que, según el mismo autor, una glorieta excede la capacidad en un tramo cuando su reserva de capacidad es inferior al 15%. En el Apéndice P se detalla el cálculo de la capacidad práctica de la glorieta en estudio.

9 Alternativas Semafóricas propuestas

Como propuesta de solución a la problemática se planteó la ubicación y configuración de semáforos en la glorieta y sus accesos. Para tal fin, se proponen 3 alternativas, las cuales serán implementadas y modeladas de forma que se extraigan los resultados relevantes para la investigación.

Las alternativas están encaminadas a controlar los accesos más predominantes en términos de aporte vehicular. El cálculo de las fases y los tiempos semafóricos se realizó con base en la metodología propuesta por Spíndola y Cárdenas (1994) y se presentan en el Apéndice Q.

9.1 Alternativa 1

El primer escenario plantea la implementación de un semáforo en la entrada sur de la glorieta que busca controlar el paso que circula por allí. Adicionalmente se contempla otro semáforo ubicado sobre la carrera 21, tal como se muestra en la figura 31



Figura 31. Esquema de la alternativa 1

La configuración semafórica de la intersección a semaforizar se presenta en la Tabla 15. El tiempo de ciclo total es igual a la suma del tiempo verde de todas las fases más 5 segundos por cada fase, el cual es igual a 47 segundos. Una vez modelada la alternativa 1, se presentan los resultados obtenidos en términos de factores de congestión en la tabla 16.

Tabla 16

Configuración semáforo Kr 21- Glorieta

Fase	1	2
Tiempo verde (seg)	18	19

Tabla 17

Resultados de la alternativa 1

Factores de la alternativa 1	
Tiempo total de paradas (segundos)	7.780
Número de paradas	13.031
Tiempo total de demoras (segundos)	8.7.9
Tiempo total de viaje (segundos)	332.534

9.2 Alternativa 2

Como segunda alternativa, se propone adaptar la propuesta 1 y añadir un semáforo en la intersección del boulevard Santander con carrera 20 y calle 18, esto con el fin de controlar indirectamente la entrada Sur-Occidental de la glorieta y al mismo tiempo la entrada sur. El esquema de esta propuesta se puede observar en la figura 32.



Figura 32. Esquema de propuesta 2.

La configuración semafórica de las intersecciones se presenta en la tabla 18. El tiempo de ciclo del semáforo ubicado en la carrera 21 es de 47 seg y 103 segundos para el semáforo de la carrera 20 con calle 18

Tabla 18

Tiempos semafóricos semáforo de la intersección calle 18 con carrera 20.

Intersección	Tiempo verde por fase (seg)			
	1	2	3	4
Cra 21	18	19	-	-
Cra 20 # 18	57	12	9	5

Una vez modelada la alternativa 2, se procede a extraer los resultados anteriormente mencionados, lo cuales se muestran en la tabla 19.

Tabla 19

Resultados de la alternativa 2

Factores de la alternativa 2	
Tiempo total de paradas (seg)	22.019
Número de paradas	19.517
Tiempo total de demoras (seg)	23.286
Tiempo total de viaje (seg)	322.731

9.3 Alternativa 3

Por último, se propone semafórizar únicamente la intersección del Boulevard Santander con carrera 20 y calle 18. Esta alternativa busca generar un flujo intermitente en la llegada de los vehículos por el acceso sur-occidental para generar brechas mayores en el flujo que transita por el tramo R1 y facilitar el ingreso de los vehículos que se acercan a la rotonda por la carrera 21. El esquema se puede observar en la figura 33. Los tiempos y fase semafóricas de la intersección se presentan en la tabla 20.



Figura 33. Esquema de propuesta 3

Tabla 20.

Configuración semafórica alternativa 3.

Intersección	Tiempo verde por fase (seg)			
	1	2	3	4
Cra 20 # 18	57	12	9	5

Los resultados obtenidos de la modelación de la alternativa 3 se presentan en la tabla 21.

Tabla 21

Resultados de la alternativa 3

Factores de la alternativa 3	
Tiempo total de paradas (seg)	2.786
Número de paradas	10.081
Tiempo total de demoras (seg)	3.707
Tiempo total de viaje (seg)	236.026

10 Comparación de los Resultados de las Alternativas Estudiadas

A continuación, se resumen los resultados obtenidos de la simulación realizada para cada escenario propuesto. Se analizaron datos como demoras en los corredores de análisis y tiempos y número de paradas. Finalmente, se realizó la proyección vehicular para el escenario que presentó mejor rendimiento. Los resultados para los escenarios evaluados se muestran en la tabla 22.

Tabla 22.

Análisis general de alternativas y situación actual.

Análisis general	Tiempo total de parada (seg)	No. Total de paradas	Tiempo total de demoras (seg)	Tiempo total de viaje (seg)
Situación actual	2.696	10.513	3.675	259.292
Alternativa 1	7.780	13.031	8.749	332.534
Alternativa 2	22.019	19.517	23.286	322.731
Alternativa 3	2.786	10.081	3.707	236.026

En la figura 34 se presenta una comparación considerando la cantidad de tramos evaluados según su nivel de servicio en relación a la situación actual y a cada alternativa evaluada.

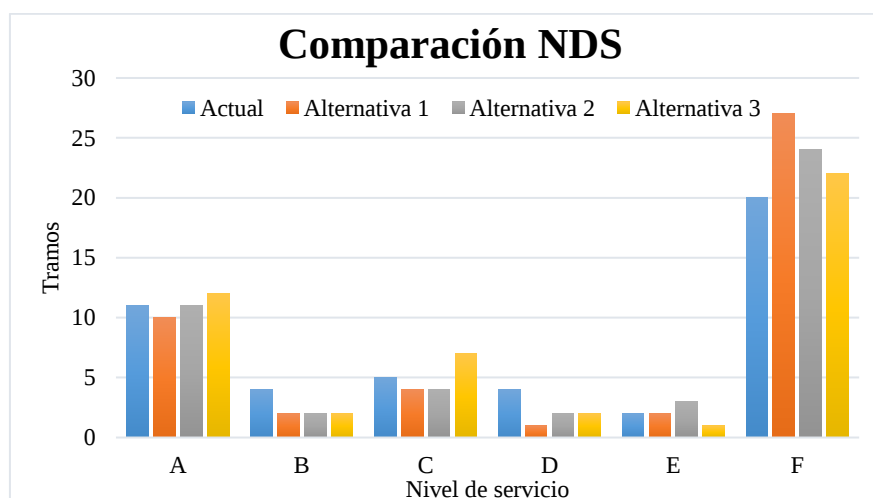


Figura 34. Niveles de servicio de cada alternativa.

Como se observa, para el caso de las alternativas 1 y 2, se incrementan en 7 y 4 respectivamente el número de tramos del sector que poseen un nivel de servicio F, esto representa un claro deterioro en el rendimiento de 11 corredores. Por otra parte, la alternativa 3 reduce el número de tramos con nivel de servicio B, D y E mejorando el desempeño en un 13% de los tramos aforados. Sin embargo, algunas vías presentan un nivel de servicio F después de la implementación de esta última alternativa, lo cual se debe a que los semáforos incrementan las demoras en estos puntos, ya que antes no existía un control semafórico.

10.1 Análisis de los resultados

De la tabla 22 se determinó que la alternativa 3 es la más recomendable para su implementación dado que, aunque el tiempo total de parada y de demora es levemente mayor que el del escenario actual, éste mejora la situación de congestión del sector. Lo anterior debido a que los incrementos producidos por el semáforo inciden en el aumento de estos valores para la propuesta evaluada. No obstante, estos incrementos no son de gran magnitud, ya que corresponden a 3% y 0.87% respectivamente. Por otro lado, el número total de paradas disminuye en 4.2% y el tiempo total de viaje se reduce casi un 9%. Los niveles de servicio mejoran en un 50% en los tramos de la glorieta como se muestra en la tabla la tabla 23.

Tabla 23.

NDS Corredores viales de la rotonda

Corredor vial	Actual	Alternativa		
		1	2	3
Tramo rotonda R1	F	F	F	E
Tramo rotonda R2	F	F	F	F
Tramo rotonda R3	F	F	F	F
Tramo rotonda R4	F	F	E	F
Tramo rotonda R5	D	D	D	C
Tramo rotonda R6	A	C	C	A
Tramo rotonda R7	D	F	F	C
Tramo rotonda R8	E	F	F	C

Además, se extrajeron los resultados de demoras en cada tramo analizado para cada alternativa y se compararon gráficamente con el escenario actual y se presentan en la figura 35, figura 36 y figura 37.

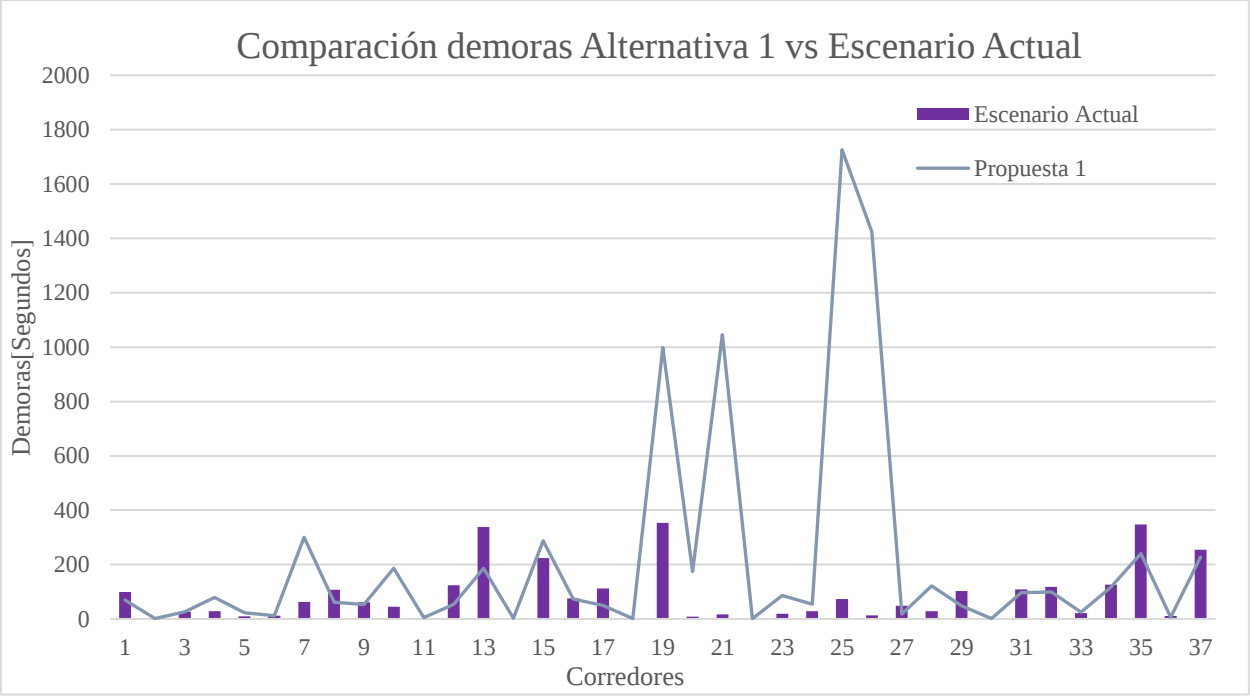


Figura 35. Demoras de la alternativa 1 vs escenario actual

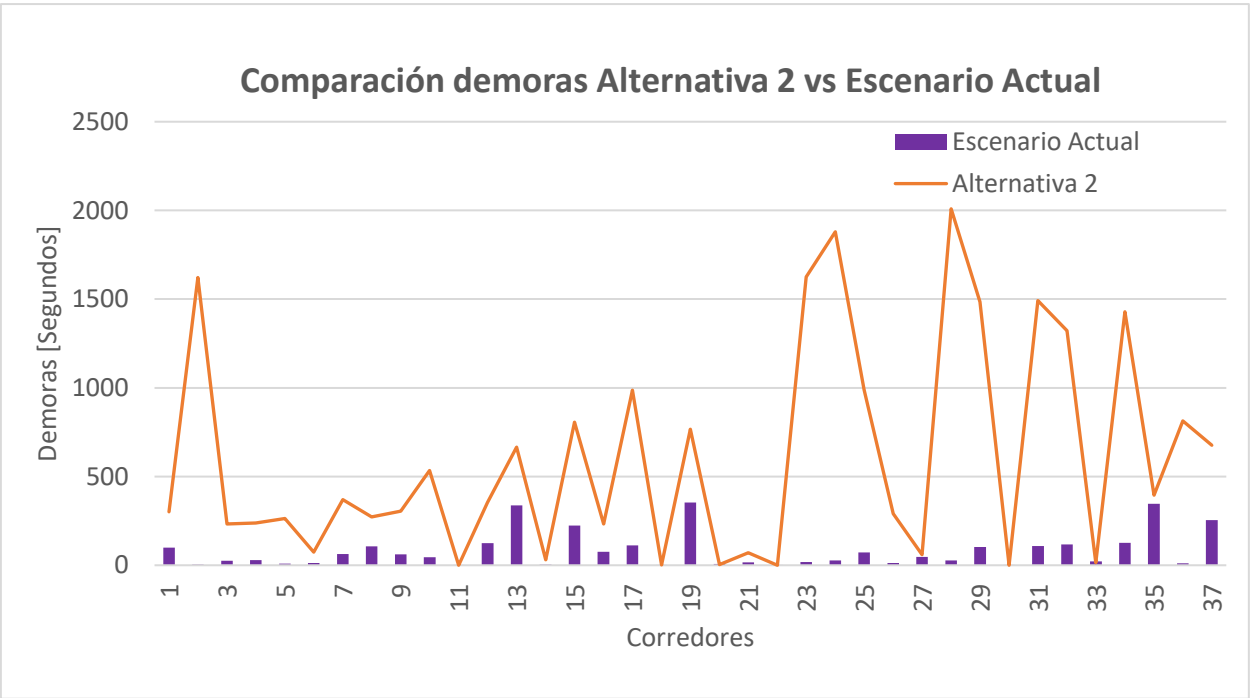


Figura 36. Demoras de la alternativa 2 vs escenario actual

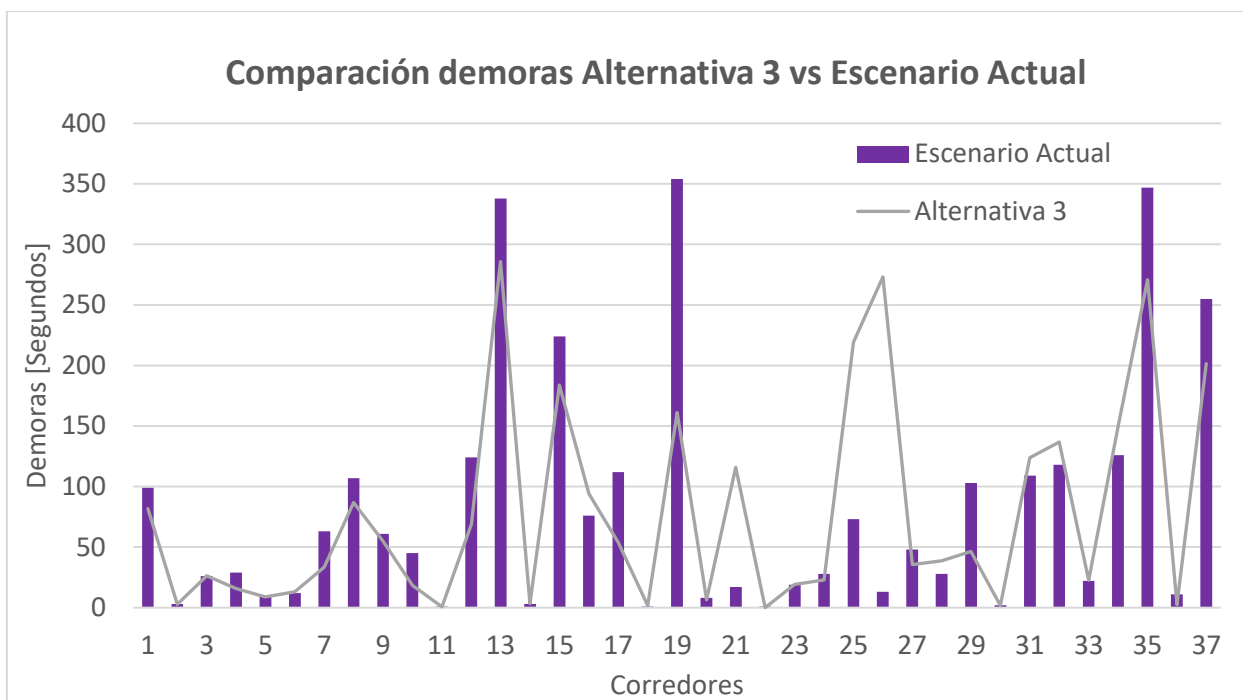


Figura 37. Demoras de la alternativa 3 vs escenario actual

10.2 Proyeccion de Escenarios Futuros

Como resultado de las proyecciones realizadas a los escenarios, se evidenció que la alternativa 3 es la que mejor desempeño posee. Por tal razón, a continuación, se presentan los resultados más significativos arrojados por el estudio.

La alternativa 3 se modeló con una proyección vehicular a 5 años (ver Apéndice R), sin embargo, se evidenció un deterioro crítico en la movilidad general de la zona de estudio como se puede evidenciar en la tabla 24, razón por la cual se modeló dicha alternativa en un menor tiempo, con el objetivo de indagar la viabilidad en el tiempo de la alternativa seleccionada.

Tabla 24.

Alternativa 3 proyectada al año 2023 vs situación actual

Análisis general	Tiempo total de parada (seg)	No. Total de paradas	Tiempo total de demoras (seg)	Tiempo total de viaje (seg)
Situación actual	2.696	10.513	3.675	259.292
Proyección Alternativa 5	26.162	16.994	27.548	464.111

Para el caso de la presente investigación, la solución propuesta solo mitiga el problema en su primer año de implementación. A continuación, se muestra la proyección realizada para el primer y quinto año y la evaluación del desempeño de la propuesta con un año de proyección.

10.2.1 Proyección de volúmenes vehiculares. La estimación de los volúmenes vehiculares futuros de la zona fue determinada por medio del método de crecimiento de viajes (Girardotti, 2001), el cual relaciona los viajes actuales con una tasa de crecimiento, como se muestra en la ecuación (2).

$$T_i = F_i * t_i \quad (2)$$

$$T_i = \text{Viajes futuros de la zona } i$$

$$t_i = \text{Viajes actuales de la zona } i$$

$$F_i = \text{Factor de crecimiento}$$

El factor de crecimiento se define como la relación de población y parque automotor actual y futuro, como se observa en la ecuación (3)

$$F_i = \frac{P_i^N * M_i^n}{P_i^0 * M_i^0} \quad (3)$$

Donde P es la población y M es el número de motorizados, El súper índice 0 corresponde al año base y el súper índice n al año futuro (Girardotti, 2001).

Los datos de la población del municipio fueron tomados de las proyecciones de población proporcionadas por el DANE, y la motorización se tomó del histórico del Parque Automotor de este municipio obtenido de la Dirección de Transito de Bucaramanga (Dirección de Transito de Bucaramanga, 2017).

Las proyecciones vehiculares arrojan como resultado, un factor de crecimiento de 1.072 para el primer año y 1.3596 para el quinto, lo que significa que la matriz vehicular incrementará en un 7.2% para el primer año y 35.96% para el quinto. Las matrices vehiculares para la proyección a 1 año se incrementaron a razón del factor calculado y se procedió a generar la simulación de la alternativa 3 con esta proyección.

10.2.2 Resultados de la simulación de la alternativa 3 con proyección vehicular al año 2019. Una vez realizada la simulación de la alternativa 3 con una proyección vehicular a 1 año se extraen los resultados y se presentan en la tabla 25.

Tabla 25.
Alternativa 3 proyectada al año 2019 vs situación actual.

Análisis general	Tiempo total de parada (seg)	No. Total de paradas	Tiempo total de demoras (seg)	Tiempo total de viaje (seg)
Situación actual	2.696	10.513	3.675	259.292
Proyección Alternativa 3	11.569	17.111	13.073	468.265

Debido al crecimiento vehicular, el procedimiento de simulación muestra que de implementarse la alternativa 3 para el año 2019, esta no tendría viabilidad alguna pues se generarían conflictos de movilidad graves relacionados con el incremento en las demoras de un 256 %. Adicionalmente el tiempo de viaje del sistema incrementaría en un 81% y el tiempo total de paradas en 329%.

11 Recomendaciones

Considerando que la correcta implementación de los perfiles y la disposición de señales de tránsito claras, hacen parte de los factores que mejoran el funcionamiento general de la malla vial, se recomienda en la medida de lo posible adaptar los perfiles actuales para que se dé cumplimiento a las respectivas normas que aplican.

Una vez determinada la inviabilidad de la alternativa debido a que la glorieta se acerca a la pérdida total de su capacidad, se recomienda evaluar alternativas diferentes a la semaforización para dar solución a la problemática expuesta. Algunas soluciones pertinentes están relacionadas con la construcción de intercambiadores a desnivel, que permitan descongestionar algunos flujos en la intersección.

Se recomienda, además, el mejoramiento de la infraestructura vial tanto física como de señalización, sobre todo en la calzada de la glorieta de San Francisco; A demás, es necesario implementar mejores controles de cumplimiento de las normas de tránsito dentro de la glorieta ya que parquear vehículos en la glorieta, se ve reducido el número de carriles de la misma y esto a su vez disminuye el rendimiento de su capacidad.

Y finalmente, se propone buscar alternativas de educación vial ya que, quedó claro que los conductores de la ciudad de Bucaramanga no saben cómo ingresar, transitar y salir de una glorieta, comportamiento que pone en peligro la integridad física de los peatones, ciclistas y demás medio de transporte y al mismo tiempo reduce la capacidad de la glorieta debido a las maniobras de cruce mal desarrolladas.

12 Conclusiones

Este estudio permitió comprobar la necesidad de generar una propuesta para el mejoramiento de la movilidad en el sector de la glorieta de San Francisco. Se logró establecer que la glorieta ha perdido su capacidad operacional en varios tramos de la misma, por causa de los altos volúmenes vehiculares que transitan en el sector y que exceden la capacidad de diseño de la glorieta.

En cuanto a la señalización vial del sector, se concluye que se debe realizar un mantenimiento correctivo a las señales horizontales, dado que el 62% de las señales encontradas presentan deterioro.

Se identificó que aproximadamente el 92% de los perfiles viales levantados en campo, no cumplen con las dimensiones normativas que se presentan en el POT de la ciudad de Bucaramanga 2014-2027.

A pesar de que el 58% de la infraestructura peatonal se encuentra en condiciones físicas buenas, es necesario el mejoramiento oportuno del 42% restante con el fin de garantizarle al peatón el flujo seguro por el sector, puesto que, en varias ocasiones los peatones deben transitar por la calzada debido al regular o mal estado del andén.

Un factor de importancia identificado en la caracterización de la zona de influencia fue el deterioro de la malla vial. Se evidenció que el desgaste superficial junto con descascaramientos, baches y parches, son las fallas más comunes en el sector. Adicionalmente, el 74% de las fallas presentes, tienen un grado de severidad de daño alto, lo cual permite entender que la oferta en infraestructura vial no es óptima, por lo que pueden generarse alteraciones en el flujo libre de los vehículos e incidir en el deterioro progresivo de los mismos.

Por otro lado, se evidenció la ausencia total de la demarcación de carriles dentro de la calzada anular de la glorieta. Lo anterior sumado a la obstrucción de vehículos que parquean en el carril

exterior, genera conflictos de ingreso, entrecruzamiento y salida de la misma, lo que a su vez disminuye el rendimiento de la capacidad de la glorieta.

El principal modo de transporte que transita en la glorieta es la motocicleta; con un porcentaje de participación del 55% del volumen total del tráfico. Seguido de este modo, se encuentra el vehículo particular con 28%. Estas cifras comparadas con el 1% de bicicletas que transitan en el sector, evidencian la clara dependencia del vehículo privado cuyo aumento cada día es mayor, siendo una de las principales razones por la cual la glorieta ha excedido su capacidad.

En cuanto a las simulaciones realizadas, se logró evaluar el impacto en términos de movilidad de tres diferentes propuestas cuyo principal objetivo fue la semaforización parcial, directa e indirecta de la glorieta de San Francisco. Lo anterior como resultado de la revisión de literatura previa que planteó posibilidades esperanzadoras para la implementación de esta propuesta en miras del mejoramiento de la situación actual del sector.

Es necesario resaltar que en busca de obtener bajos impactos negativos en cuanto a movilidad vehicular se refiere, se determinó, que no es viable semaforizar los tramos viales de la glorieta de San Francisco. Lo anterior, debido a que el impacto en la movilidad del sector se ve seriamente afectado con la implementación de esta solución, evidenciándose demoras excesivas y congestionamientos tras su puesta en funcionamiento.

La alternativa 3 genera un alivio en un plazo inmediato, en cuanto a demoras, paradas, tiempos de paradas y tiempos de viaje en más del 60% de los corredores viales analizados. Esta alternativa se evaluó a año 2018 (año en que se realizó el estudio). Sin embargo, al evaluar esta alternativa con una proyección vial de 5 años, se evidenció un intenso deterioro en la movilidad del sector. Por tal razón y en busca de establecer un tiempo de viabilidad de implementación de la propuesta, se optó por proyectar el tráfico a solo 1 año, lo que permitió obtener como resultado la inviabilidad

definitiva de esta alternativa. Es decir, que la implementación de la misma no garantiza mejoras en términos de movilidad, debido a que no es una solución que se mantenga en un periodo oportuno de tiempo.

Por último, es necesario resaltar que los controles semafóricos son una buena opción como alternativas de mitigación a los problemas de movilidad de una glorieta, solo cuando esta no ha excedido su capacidad, como es el caso de la glorieta estudiada. Este estudio comprobó que la alternativa # 3, bajo las condiciones actuales de volúmenes vehiculares, genera un impacto positivo sobre los flujos de la intersección del Boulevard Santander con Carrera 20, ya que mejora la movilidad general de la glorieta y sus corredores aledaños al reducir demoras, tiempos de viaje y número de paradas.

Sin embargo, la inversión que debe realizarse para la implementación de la alternativa # 3, no puede justificarse ya que su funcionalidad no se mantiene en el tiempo, lo que implicaría nuevas intervenciones en el corto plazo, generando más costos al no ser una solución definitiva tras su implementación.

A lo largo del desarrollo de esta investigación, se observaron los comportamientos de los conductores que transitan diariamente por el sector. A consideración del autor la falta de cultura vial es un factor de suma importancia a tener en cuenta cuando se quiera abordar una problemática de movilidad ya que, producto de la actividad comercial y de ocio propia del sector, se ven atraídos diferentes tipos de conductores que en varias ocasiones optan por parquear dentro de la glorieta obstruyendo así el flujo y reduciendo la capacidad de la glorieta.

Referencias Bibliográficas

- Akçelik, R. (2011). Roundabout Metering Signals: Capacity, Performance and Timing. *Procedia Social and Behavioral Sciences*(16), 686-696. doi:10.1016/j.sbspro.2011.04.488
- Angel, A. M. (20 de Enero de 2011). *Elmundo.com*. Obtenido de <https://www.elmundo.com/portal/pagina.general.impresion.php?idx=169921>
- Azhar, A.-M., & Svante, B. (2011). Signal Control of Roundabouts. *Procedia Social and Behavioral Sciences*(16), 729-738.
- Bie, Y., Mao, C., & Yang, M. (2016). Development of Vehicle Delay and Queue Length Models for. *Development of Vehicle Delay and Queue Length Models for*(137), 141-150.
- Bu, S., Zhang, T., & Du, L. (2010). Approximations and simulation of the optimal change interval for roundabout. *Second International Workshop on Database Technology and Applications*, (págs. 1-3). China. doi:10.1109/DBTA.2010.5659054
- Cal y Mayor y Asociados, Alcaldía Mayor de Bogotá. (2005). *Manual de Planeación y Diseño para la administración del Tránsito y el Transporte*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- CONSEJO DE BUCARAMANGA. (2014). Acuerdo 011 de 2014. COLOMBIA.
- Darder Gallardo, V. (2005). *Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización*. Barcelona, España: Universidad Politècnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3375>
- Dirección de Transito de Bucaramanga. (Diembre de 2017). *DIRECCION DE TRANSITO DE BUCARAMANGA*. Recuperado el 2018, de <http://www.transitobucaramanga.gov.co/parque-automotor.php>

- Gasulla, M. M., Garcia, A., Moreno, A. T., & Llorca, C. (2016). Capacity and operational improvements of metering roundabouts in Spain. *Transportation Research Procedia*, 15, 295-307. doi:10.1016/j.trpro.2016.06.025
- Girardotti, L. (2001). *Demanda de Transporte dirigida a redes*. Guía de estudio, Facultad de ingeniería UBA. Recuperado el Marzo de 2018, de <http://materias.fi.uba.ar/6808/contenidos/DemandaRedes.pdf>
- Ma, W., Liu, Y., Head, L., & Yang, X. (2013). Integrated optimization of lane markings and timings for. *transportatio Tesearch Part C*(36), 307-323.
- Mejía Angel, A. M. (20 de Enero de 2011). *Elmundo.com*. Obtenido de <https://www.elmundo.com/portal/pagina.general.impresion.php?idx=169921>
- Ministerio de Transporte. (2015). *Manual de señalización vial. Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia*.
- Natalizio, E. (2005). Roundabouts with Metering Signals. Melbourne.
- Nikitin, N., Patskan, V., & Savina, I. (2017). Efficiency Analysis of Roundabout with Traffic Signals. *Transportation Research Procedia*, 20, 443-449. doi:10.1016/j.trpro.2017.01.072
- Opoku-Agyekum, K. (2016). Evaluation of the Effects of Signalisation on Roundabout Capacity Using VISSIM: A Case Study of the Suame Roundabout in Kumasi, Ghana. Kumasi, Ghana.
- Reyes Spíndola, R. C., & Cárdenas Grisales, J. (1994). *Ingeniería de Transito Fundamentos y Aplicaciones* (7a ed.). Mexico: Alfaomega,S. A. de C. V. doi:970-12-1003-4
- Sun, X., Ma, W., & Huang, W. (2016). Comparative study on the capacity of a signalised roundabout. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(3), 175-185. doi:10.1049/iet-its.2014.0310

- Tollazzi, T. (2015). Recent Alternative Types of Roundabouts. En *Alternative Types* (Vol. 6, págs. 129-132). Eslovenia: Springer International Publishing.
- Tracz, M., & Chodur, J. (2012). Performance and Safety of Roundabouts with Traffic Signals. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*(53), 789-800.
- Transconsult, Secretaria de comunicaicones y transportes, Steer davies Gleave. (2006). *Manual de Modelacion de demanda para carreteras de cuota*. Mexico.
- Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Vias. (2006). *Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Bogotá.
- Vélez, G. A. (2000). *Calculo y Diseño de Glorietas*. (ACeditores, Ed.) Cali. doi:958-94685-7-6
- Xia, Q., & Shi, L. (2013). An Optimized Design Scheme for Roundabout Traffic Management. *Applied Mechanics and Materials*, 253-255, 1884-1889. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.253-255.1884
- Yang, X., Li, X., & Xue, K. (2004). A New Traffic-Signal Control for Modern. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, 5(4), 282-287. doi:10.1109/TITS.2004.838181