

Trabajo de grado en modalidad de aplicación

Diseño de una metodología de localización para centros de alquiler de bicicletas por un corredor representativo de la ciudad de Bogotá.

Óscar David López Guzmán^{a,c}, Juan Camilo Otavo Pajarito^{a,c}, Andrés Felipe Rolón Amaya^{a,c}, Juan Sebastian Suarez Sandoval^{a,c}

Danilo Abril^{b,c}

^a Estudiante de Ingeniería Industrial

^b Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^c Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen de diseño en Ingeniería

The following degree project presents a methodology for the location of bicycle renting centers. The main objective of this methodology is to facilitate the development of non-motorized transportation in the big cities, through efficient bicycle renting systems, by selecting the best potential areas and relating demand, bicycle user habits and infrastructure concerns. The selection of the best spots for bicycle renting centers is made with mathematical modeling of the problem, by which a financial analysis is carried out and the implications both social and ecological are evaluated, encouraging likewise, a culture of healthy living and friendly with the environment. This project is applied through a representative sector of the city of Bogotá, but the developed methodology is intended to be useful in other big cities around the globe that are developing the bicycle as an alternative mode of transport.

1. Justificación y planteamiento del problema

El reto de las ciudades y zonas metropolitanas cada día es más grande en temáticas de movilidad y desarrollo urbano. En Bogotá, esto representa una problemática que impacta no sólo su productividad y desarrollo económico, sino también impacta a nivel social y ambiental.

En primer lugar, el tiempo promedio de desplazamiento de las personas en Bogotá es de 56,09 minutos, siendo de 64 minutos cuando se dirigen a un lugar de trabajo y de 61 minutos para volver a casa; motivos de viaje predominantes en la encuesta de movilidad de 2015. Suponiendo que un bogotano en 2019 asiste todos los días laborables a su trabajo, estaría dedicando 21 días al año en desplazarse para ir a trabajar y teniendo en cuenta que, “la función básica de un sistema de transporte es la creación de utilidad en el tiempo mientras ocurre la transferencia de bienes o personas” (Ball, 2001), se está afectando gravemente la productividad y calidad de vida en la ciudad.

La congestión vial es el factor principal al que se atribuyen estos largos tiempos de desplazamiento. Desde 2007 a diciembre de 2017, la cantidad de vehículos registrados en Bogotá se duplicó, mientras que la infraestructura vial no ha presentado un crecimiento significativo. Actualmente, se generan velocidades promedio muy bajas en horas pico en vías principales, como es el caso de la Avenida Boyacá, de 18 Km/h, o en corredores este-oeste de 12 Km/h, como sucede en la Calle 127 (Movilidad S. D., 2017).

Mencionado lo anterior, el problema no radica solo en la movilidad, sino en el crecimiento del parque automotor que impacta la sostenibilidad del transporte en la ciudad. Para finales del año 2016, se realizó un estudio de calidad de aire en la ciudad de Bogotá para el PM10, un agente contaminante. En este estudio se identificó una cifra promedio de 45 ug/m³, 25 ug/m³ más arriba del nivel recomendado establecido por la Organización Mundial de la Salud (Bogotá A. d., 2017). Otra cifra preocupante se encuentra en el PM2.5, un contaminante invisible a la vista, para el año 2016 en Bogotá el valor duplica al límite establecido por la OMS. (Bogotá A. d., 2017)

Las ventajas que tiene la bicicleta como medio de transporte respecto a medios motorizados en materia de sostenibilidad y salud pública, han sido destacadas mundial y, específicamente, en Bogotá, esto se suma a los ahorros de tiempo. En 2015, los tiempos de viaje promedio en medios de transporte activos, entre ellos la bicicleta y el peatón, fueron menores en comparación con los demás medios de transporte, con una diferencia de 46 y 43 minutos cada uno (Movilidad S. D., 2017). Por esto, estimular el transporte en bicicleta debe ser una de las principales estrategias para la planeación de la movilidad en la ciudad.

La participación de viajes en bicicleta es cada vez mayor con el pasar del tiempo, así se evidencia en los 784.502 viajes diarios estimados en bicicleta en la encuesta de movilidad 2015. Esto representa un incremento del 24% respecto a los registros del 2011. El incremento podría ser mayor, teniendo un proyecto que fomente y

transforme la bicicleta en un medio de transporte relevante, como un sistema de alquiler de bicicletas, tomando en consideración que la razón principal del no uso de la bicicleta en los resultados de la encuesta de movilidad del 2015, es no contar con dicho medio de transporte.

Con este proyecto se pretende definir una metodología que, con herramientas de ingeniería, permita identificar los mejores puntos para localizar centros de alquiler de bicicletas sobre las zonas de alta generación de viajes en la ciudad, identificando las variables y restricciones relevantes del problema y así, crear redes que maximicen la demanda cubierta.

Debido a esto, es posible plantear la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles deben ser las fases de una metodología que permita definir la ubicación de los mejores puntos para un sistema de alquiler de bicicletas, y así fomentar el uso masivo de este medio de transporte?

2. Antecedentes

Los sistemas de bicicletas públicas, como sistemas de alquiler y préstamo, son una tendencia que cada vez cobra más relevancia en las grandes ciudades. Generalmente son impulsados por la administración pública, para el uso en trayectos cortos o intermedios entre dos o más puntos, o como un complemento de viajes intermodales, con diferentes propósitos.

La primera gran iniciativa de la bicicleta como servicio público de transporte se da en Ámsterdam (Países Bajos) en 1968, donde fueron puestas al servicio de la población, bicicletas pintadas de blanco para su uso sin ningún tipo de contrato ni supervisión por parte de la administración, lo que se derivó en problemas como el hurto y la falta de eficiencia. En los años siguientes, las características de estos sistemas fueron evolucionando, hasta el punto en que la literatura especializada distingue cuatro generaciones en los sistemas de bicicletas públicas. Las de primera generación, sin mayores regulaciones, con base en una libre disponibilidad de bicicletas para el uso de los iniciados; la segunda generación, donde se definen estaciones fijas que posibilitan el control primario de las bicicletas; las de tercera generación, que implementan tecnologías de información para el registro del usuario y seguimiento de la bicicleta con micro chips o GPS hasta llegar a la cuarta generación, que liga los sistemas de bicicletas públicas a un sistema intermodal de transporte incorporado a la vida cotidiana. (Pinzón, 2011)

Bicing en París, Bixi en Montreal y Ecobici en Ciudad de México, son algunos de los sistemas de bicicletas que triunfan en grandes ciudades y muestran un crecimiento anual de bici usuarios por encima del 2.5%.



Ilustración 1. Bike sharing world map- Fuente: (maps, 2019)

A nivel nacional, Medellín es la ciudad que más se acerca a tener un modelo similar a los que se han venido implementando en países europeos. El sistema de bicicletas públicas EnCicla, integra las bicicletas dentro del sistema integrado de transporte del Valle de Aburrá (SITVA), su uso es gratuito y requiere de una inscripción previa.

Como precedente a nivel local, se encuentran estudios orientados al transporte sostenible en Bogotá por Pedro Andres Hernández Puerto (2016), ex director de vías, transporte y servicio público de la Secretaría Distrital de Planeación, plantea una hipótesis de la relación entre la localización de los usos de suelo y los patrones de movilidad cotidiana de los habitantes de la ciudad. Para identificar este factor, fue pertinente conocer la mayor densidad de habitantes en el área de Bogotá. En dicho estudio, se mostró que las partes con mayor densidad de habitantes en la ciudad se localiza en el extremo noroccidental y suroccidental del área urbana de

Bogotá. Sin embargo, se muestra que las áreas donde se encuentra mayor actividad económica y de industria en la ciudad, es en el centro oriente y centro occidente. Por esta razón, se muestra que la hipótesis planteada se rechaza ya que no coincide el lugar de residencia de los ciudadanos con los lugares de mayor empleo. Con base en esto, se concluyó que existen aproximadamente 13 km en promedio, en línea recta, desde el punto de origen de vivienda de un ciudadano hasta el destino del trabajo, por lo que las personas necesitan medios de transporte diariamente para cumplir con sus responsabilidades laborales.

En el año 2011 se realizó la primera prueba piloto en la ciudad de Bogotá conocida como “Bicibog”. Este estudio fue realizado por la Secretaría Distrital de Movilidad, con el propósito de tener un primer acercamiento a las zonas potenciales donde fuera posible implementar un sistema de bicicletas públicas, analizar la percepción por parte de la ciudad de este sistema y finalmente, un primer análisis del perfil de los usuarios potenciales. Este proyecto se ejecutó mediante dos herramientas principales: Una georreferenciación para obtener las zonas potenciales y un estudio de mercado para obtener los datos de los usuarios (Pinzón, 2011).

Además, la Secretaría Distrital de Bogotá promueve el uso de la bicicleta como medio de transporte en el llamado “Programa de ciclo parqueaderos”. Dicho programa inició el 8 de marzo del 2017 con el funcionamiento de Bici Móvil, un mobiliario urbano que optimiza el espacio público para dar prioridad al estacionamiento de bicicletas (Movilidad S. , 2017).

El programa Bici Móvil tiene dos formas, por una parte, tiene la estructura de un automóvil que está fabricado de metal. La otra forma, cuenta con una estructura basada en cinco tubos de metal donde se ubicará la bicicleta que se desea parquear. Esta nueva estructura de Bici Móvil está construida con la tipología “U invertida” lo cual le permite al usuario amarrar el marco y las dos ruedas de la bicicleta a la estructura para una mayor comodidad y seguridad. La estructura implementada es de uso gratuito, público y tiene espacio para 10 bicicletas. Este programa cuenta con 11.000 parqueaderos en centros comerciales y parqueaderos privados, 3,758 en estaciones y portales de Transmilenio, 1200 en parques y aceras y 402 en pies. (Movilidad S. , 2017)

Estimación de la demanda

Uno de los principales retos de los planificadores de transporte urbano y para lo que conlleva un sistema de préstamo de bicicletas, es proporcionar la respuesta adecuada a las necesidades del usuario, estimando la demanda de transporte y su variación (Ribeiro, 2014).

La planificación y evaluación de la demanda, requiere de modelos que ayuden tanto a pronosticar como a examinar las diferentes variables que pueden tener variación durante el análisis de este proceso. El modelo tradicional y por el cual se han basado distintos modelos de transporte, es el modelo de las cuatro etapas, modelo que inicia con la recopilación de datos y características socioeconómicas para generación y atracción de viajes, hasta el modelo de la red y la asignación de los viajes. (Willumsen, 2011)

Este modelo se basa en una secuencia de cuatro sub-modelos: generación de viajes, distribución, modo de transporte y finalmente asignación. (Willumsen, 2011)

Para iniciar, el modelo debe contar con una zonificación y recolección de datos donde se incluyan: Datos demográficos, actividad económica, zonas recreacionales y educativas. Con esta información de entrada se puede realizar la primera etapa que se basa en conocer el número total de viajes generados y atraídos en la zona de estudio. La siguiente etapa, es denominada distribución, en la cual se busca caracterizar los viajes e identificar el origen y destino de estos. En la tercera etapa se implica modelar el modo de transporte que implica distribuir los viajes en una matriz de origen – destino, a diferentes modos que se dividen en transporte público y transporte privado. Finalmente, la última etapa es la asignación de viajes, es decir, la cantidad de viajes de cada modo de transporte que se realizarán dentro de la red creada.

Otros autores como Landis (1996), proponen el modelo “The latent demand score”, puntuación de demanda latente. Modelo utilizado para estimar viajes de demanda basado en generadores y atractores de viajes como centros comerciales, parques públicos, colegios, entre otros. García-Palomares, Gutierrez y Latorre (2012) proponen un sistema de información geográfica basado en una metodología para calcular la distribución de la demanda potencial por viajes, con el fin de caracterizar la demanda en cada estación.

Una herramienta muy eficaz a la hora de elaborar un análisis de carácter espacial, son los Sistemas de Información Geográfica. Concretamente, permiten elaborar modelos de origen-destino, Martha Latorre en un trabajo desarrollado para la localización óptima de puntos de renting de bicicletas en Madrid, utiliza ArcGIS Desktop 10, sumado a extensiones de análisis espacial (Spatial Analyst) y el análisis de redes (Network Analyst).

Modelos Matemáticos

Para la localización óptima de las estaciones se debe tener en cuenta los traslados desde el punto de origen, a la estación de destino y posteriormente, la distancia entre estaciones. “Para que el sistema tenga aceptación entre la población usuaria, estas no deben estar a más de una determinada distancia del origen y el destino final del viaje, y de una determinada distancia entre ellas, siendo trescientos metros la distancia idónea entre bases, y

quinientos metros la distancia máxima aceptable, aunque una sobre -cobertura puede ser perjudicial para el éxito del sistema” (Sánchez, 2012). A pesar de esto, el usuario suele transportarse en distancias superiores a las que existen entre estación y estación, “se han estipulado entre 5.5 y 7 kilómetros (Jensen et Al., 2010) lo que equivaldría entre 15 a 35 minutos en bicicleta. Este artículo muestra que, debido a la larga duración de tiempo de viajes en los sistemas de transporte no motorizados, la población se abstiene de utilizar estos y opta por tomar un transporte motorizado, lo cual, hace que exista una alta oferta en estos sistemas de transportes y ocasiona un colapso en estos mismos (Puerto P. A., 2015).

El diseño óptimo de una red de transporte público en bicicleta requiere una visión integral del usuario, los costos asociados a los puntos de renting y el nivel de servicio, que es evaluado por la cobertura de la red en cuanto al origen-destino y la tasa de disponibilidad de bicicletas en las estaciones. Esta visión holística del problema se puede estudiar a través del modelamiento matemático, “creando una pequeña red que ilustre el modelo propuesto, para luego ser sometido a un análisis de sensibilidad que pruebe la existencia de parámetros críticos, que afectan el diseño de la red y el ruteo” (Lin y Yang, 2011).

El nivel de servicio está estrechamente relacionado con las distancias entre una estación y otra, por lo que los estudios en problemas de máxima cobertura, y los de enrutamiento de vehículos han sido herramientas en artículos del tema. “La demanda se satisface si la instalación se localiza a una distancia menor o igual a ‘S’, siendo S la distancia máxima entre instalaciones. Los problemas de máxima cobertura identifican ‘P’ ubicaciones que maximizan la cantidad de demanda dentro de una distancia ‘S’” (Lin y Yang, 2011).

“El flujo de material dentro de un sistema público de bicicletas está dictado por el azar patrones de viaje de los pasajeros.” Raviv y Kolka (2013) proponen un modelo de inventario para estudiar la gestión de estaciones de bicicletas compartidas. Su estudio se basa en una sola estación, que puede informar la toma de decisiones sobre la capacidad de atracción y la redistribución de bicicletas.

En el proyecto “Algoritmo cultural para el problema de la localización de clúster en estaciones de servicio de bicicletas,” (BUSTOS, 2018) se establece como un modelo matemático basado en un algoritmo cultural con el objetivo de seleccionar un grupo de puntos claves a partir de unos clústeres ya establecidos en un anterior documento. Los ingenieros diseñan una función objetivo que permite minimizar las distancias entre el centro del clúster y sus puntos abiertos, además de las siguientes restricciones principales:

- Toda estación debe ser abierta exactamente una vez.
- Para abrir un punto del clúster, se debe tener la capacidad para satisfacer una proporción determinada de su demanda total.
- El desbalance en los requerimientos de cada punto debe ser inferior a un valor fijo determinado.
- Se debe tener un plan de reabastecimiento para los puntos que se encuentran en desbalance con respecto a su demanda (BUSTOS, 2018).

Frade y Ribeiro (2015) proponen un modelo de optimización aplicado en Coímbra, Portugal, el cual tiene como función objetivo maximizar la demanda teniendo en cuenta el presupuesto como una restricción grande del problema. El modelo determina la ubicación de las estaciones, el número de bicicletas en cada estación y equilibra los costos e ingresos, suponiendo un posible presupuesto para cubrir cualquier pérdida que resulte de la implementación.

3. Objetivos

Objetivo general

Diseñar una metodología de localización para centros de alquiler de bicicletas por un sector representativo de la ciudad de Bogotá.

Objetivos específicos

- a. Analizar la demanda, el tráfico y el flujo vial de bicicletas por el sector a trabajar.
- b. Determinar los trayectos frecuentes de los usuarios de bicicletas por el corredor a estudiar.
- c. Identificar los puntos de mayor flujo de transeúntes del corredor y los estándares físicos requeridos para la implementación de los puntos de alquiler de bicicletas.
- d. Diseñar e implementar un modelo de programación matemática que localice centros de alquiler de bicicletas dentro del sector a trabajar.
- e. Estimar el impacto que abarca la implementación del sistema en términos financieros, sociales y ecológicos.

4. Metodología

Colombia está en la búsqueda de una movilidad más sostenible en las grandes ciudades, esto se evidencia en los proyectos de ley radicados en los últimos años, que buscan fomentar la bicicleta como medio de transporte y aumentar la cantidad de viajes realizados en este medio, como, por ejemplo, la Ley 1811 de 2016.

Se encontró en los antecedentes que en Bogotá se ha intentado implementar este tipo de sistemas, pero no han tenido éxito. Este trabajo busca el diseño de una metodología para un sistema de alquiler de bicicletas que parta de la eficiencia en la localización de los centros de alquiler. Con base en la revisión bibliográfica, se extrajeron los siguientes conceptos para la definición de la metodología.

Autor	Temática	Justificación Metodológica	Referencia
Miguel Alejandro Parras & Mirta Liliana Ramírez	Proponen el uso de sistemas de información geográfica (SIG) como información de entrada, para analizar los diferentes comportamientos de demanda que se tiene en el área establecida	Se debe considerar el uso de SIG, para este caso el software de QGIS, con el fin de ilustrar en un mapa la densidad de viajes que se generan en la ciudad de Bogotá y a partir de esta información poder el sector para realizar el trabajo de estudio. Complementario a lo mencionado anteriormente, se deben establecer ciertos criterios para dicha selección de área con el fin de delimitar el sector a trabajar.	Ramírez, M. A. (2016). Propuesta metodológica para el modelado de la demanda potencial del transporte público mediante el empleo de sistemas de información geográfica.
Colemer Fernandiz, J Ruiz Sancez, T	Modelo Clásico de las 4 etapas en transporte: " La primera etapa consiste en el establecimiento de la generación y atracción de viajes; la segunda etapa, a partir de la anterior, establece la distribución de viajes entre zonas; mientras que la tercera etapa establece el reparto modal; en tanto que la cuarta etapa define la asignación de viajes."	Para el caso puntual de la estimación de la demanda es importante tener en cuenta el modelo clásico de 4 etapas de transporte. Inicialmente se debe hacer una recolección de información primaria, encuestas, con el fin de tener datos actualizados, sin dejar a un lado las fuentes secundarias como bases de datos para a la vez tener una referencia mucho más sólida.	T, C. F. (2010). Modelo de las cuatro etapas
Juan de Dios Ortúzar & Luis G. Willumsen	El modelo de las cuatro etapas, modelo que inicia con la recopilación de datos y características socioeconómicas para generación y atracción de viajes, hasta el modelo de la red y la asignación de los viajes.	Utilizando la información recolectada es posible establecer una matriz de origen destino por la cual se da la posibilidad de identificar los puntos atractores y generadores de demanda. Continuando el proceso, es importante considerar el hecho de delimitar la información lo más detallado posible, existen diferentes criterios tales como la franja horaria o tipo de transporte.	Willumsen, J. d. (2011). Modelling Transport, 4th Edition.
Henry Rodríguez Sosa & Douglas González Pinzón	Se realiza un primer acercamiento a las zonas potenciales y los perfiles de los usuarios a partir del uso de encuestas y entrevistas.		Pinzón, H. R. (2011, Diciembre). Sistema de Bicicletas públicas de Bogotá: Bicibog.
Inés Frade & Anabela Ribeiro	Proponen un modelo matemático que permite identificar las mejores estaciones para cubrir una demanda y establecer el presupuesto del sistema de bicicletas a un periodo de 5 años. Este proyecto fue aplicado en Portugal.	Para complementar la georreferenciación y estimación de la demanda es posible realizar un modelo matemático, el cual puede tener diferentes tipos de funciones objetivo dependiendo del enfoque del trabajo, no obstante el enfoque principal se debe inclinar a la satisfacción de la mayor proporción de demanda en el sector elegido, teniendo en cuenta, los costos de apertura de una estación, numero máximo de bicicletas por estación, numero de bicicletas	Ribeiro, I. F. (2014). Bicycle Sharing Systems Demand

Benjamín Edgardo Appel González & Conie Alexandra Utreras Bustos	Establecen un modelo matemático con el objetivo de seleccionar un grupo de puntos claves a partir de unos clústeres ya establecidos, con una función objetivo que permite minimizar las distancias entre el centro del clúster y sus puntos abiertos	relocalizadas de una estación a otra. Esta función objetivo debe ir ligada a ciertas restricciones principales tales como: El balance del sistema, ya que pueden existir ciertos puntos donde la demanda sea más alta que en otros puntos, para esto la oferta debe encontrar un balance dentro del sistema para cada punto. Máxima distancia, los puntos dentro del sistema deben estar a cierta distancia entre uno y otro para un mejor funcionamiento del sistema. Relocalización, una restricción que puede ir ligada al balanceo ya que se debe encontrar un límite en el inventario en el cual se nivele las bicicletas de un punto a otro. A partir de la literatura obtenida es posible determinar las restricciones presentadas anteriormente pero a medida que se desarrolle el modelo se pueden encontrar otras más que complementen el modelo.	Bustos, b. E. (2018). Algoritmo cultural para el problema de localización de Clusters de estaciones de servicio de bicicletas.
Danilo Abril, Andres Felipe Rolón, Juan Sebastián Suarez, Juan Camilo Otavo & Oscar López	Estimación del impacto del sistema.	Para la fase final de la metodología, se desea estimar el impacto del sistema a partir de una modelación de la red y el comportamiento potencial del usuario. Adicionalmente, evaluar los riesgos del sistema, su viabilidad financiera y los beneficios sociales y ambientales.	N/A

Tabla 1: Estudios afines para la definición de la metodología - Fuente: Elaboración propia

La metodología definida comprende el problema de localización de centros de alquiler de bicicletas desde la selección del sector, hasta la medición del impacto de los puntos seleccionados, razón por la cual se ha dividido 4 fases para facilitar su comprensión e implementación.

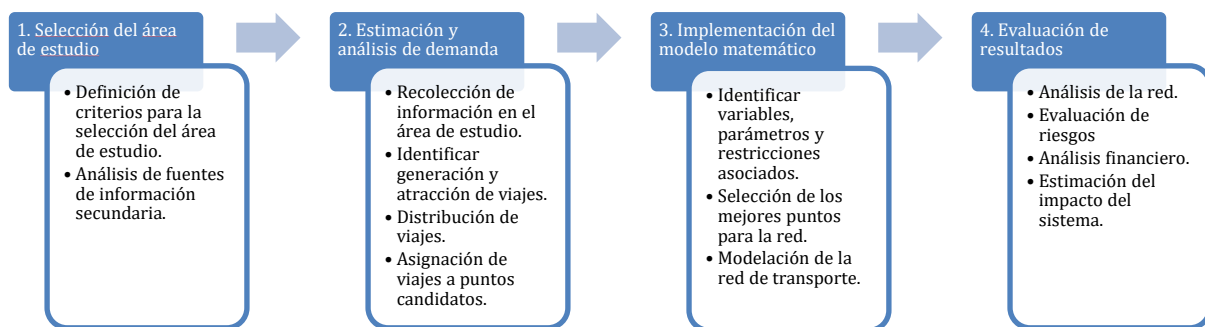


Ilustración 2. Fases de la metodología- Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen las actividades llevadas a cabo en cada una de las fases planteadas para la realización del proyecto.

Fase I: Selección del área de estudio y puntos candidatos.

La primera fase de la metodología corresponde a la definición y al análisis de los criterios para la selección del área de estudio y los puntos candidatos para abrir centros de alquiler de bicicletas. Se utilizó la Encuesta de Movilidad de 2015 y la Encuesta Multipropósito de 2017, ambas desarrolladas por entidades distritales como fuentes de información secundaria. La fase I está compuesta por dos grandes actividades.

Definición de los criterios para la selección del área de estudio.

Para la selección del área de estudio se deben identificar variables que influyan en la utilización de la bicicleta como medio de transporte.

Estudios muestran que la demanda de los sistemas de alquiler de bicicletas se ve afectada principalmente por las condiciones climáticas y por los hábitos de viaje de las personas. Estos sistemas atraen principalmente a usuarios para viajes cortos, en condiciones de clima agradable y en áreas que gozan de una buena calidad de aire

(Campbell et al., 2016). Al factor sociodemográfico no se le atribuye un impacto significativo, ya que estos sistemas son utilizados por personas dentro de todo el espectro social.

Por otro lado, en los resultados de la Encuesta de Movilidad de 2015, las razones destacadas por las que no se usa la bicicleta son: El desplazamiento en largos trayectos, la seguridad y el miedo a sufrir un accidente de tránsito. Debido a lo anterior, es importante que el sector seleccionado tenga una infraestructura que facilite la circulación de bicicletas.

Los sistemas de alquiler de bicicletas también son identificados como una solución de primera y última milla para conectarse al transporte público (DeMaio, 2009). Por lo que la proximidad de las estaciones a medios de transporte masivos como Transmilenio y SITP es fundamental para crear un sistema de transporte intermodal.

Criterios para la selección del área de estudio

- Generación de viajes cortos
 - Infraestructura vial
 - Seguridad
 - Cercanía a sistemas de transporte masivo
 - Densidad Poblacional
-

Tabla 2: Criterios para la selección del área de estudio - Fuente: Elaboración propia

Selección de puntos candidatos para la apertura de estaciones de alquiler de bicicletas.

Para la selección de los puntos se debe recopilar información de monitoreo, aforos de volumen, y matrices origen destino, ya sea de fuentes secundarias o primarias. Esto con el fin de identificar zonas de alta generación y atracción de viajes, intersecciones y corredores de alto flujo de bicicletas dentro del área de estudio. Dada la importancia de los viajes cortos, los puntos candidatos para abrir los centros de alquiler deben estar en zonas de alta densidad y diversidad de puntos atractores (Campbell et al., 2016). En Bogotá, se pueden encontrar puntos con estas características en sectores empresariales, centros comerciales, zonas residenciales, instituciones académicas, estaciones de medios de transporte masivos, entre otras. Dentro del conjunto de puntos potenciales deben existir puntos atractores y generadores demanda.

Fase II: Estimación y análisis de la demanda

Para la estimación de la demanda se realiza una encuesta de preferencias reveladas para tener información actualizada y específica del área de estudio.

Con el fin de realizar la encuesta, se calcula el tamaño de muestra basada en la población del área de estudio con la siguiente ecuación.

$$n = \frac{Z^2 * (\alpha^2 * 0,5^2)}{1 + (e^2 * (N - 1))}$$

Ecuación 1. Cálculo tamaño de muestra

Siendo:

- N: Tamaño de la población
- e: Error
- Z: Nivel de confianza

Sobre los resultados de la encuesta se aplica el esquema clásico de modelación de transporte, el cual se divide en cuatro etapas:

Generación y atracción de viajes

Se utilizaron fuentes de información secundarias, como la Encuesta de Movilidad, para identificar el número de viajes generados y atraídos en las ZAT del área de estudio. En este punto es necesario identificar el origen y destino de los registros de la encuesta, para luego ajustarlos con su respectivo factor de expansión, teniendo en cuenta que “de acuerdo con la teoría de muestreo, el factor de expansión es la capacidad que tiene cada individuo seleccionado en una muestra probabilística para representar el universo en el cual está contenido” (Departamento Administrativo nacional de estadística, 2008).

Este es calculado con la población de la ZAT y la cantidad de encuestas realizadas por tipo, origen y destino, para así, estimar la cantidad de viajes generados y atraídos a la zona.

$$FE = \frac{P}{E}$$

Ecuación 2: Cálculo factor de expansión

Siendo:

- P: Población de la ZAT
- E: Total encuestados en la ZAT.

Distribución de los viajes

En esta etapa se deben definir las características de los viajes potenciales o la demanda del sistema según los criterios que se quieran satisfacer. Por ejemplo, para este estudio sólo se consideraron viajes menores a 35 minutos.

Con base en la información primaria recolectada en la encuesta de preferencias reveladas, la demanda es calculada teniendo en cuenta la disposición de uso del sistema. Adicionalmente, se distribuyen los viajes por 5 franjas horarias, para distinguir los picos de demanda durante el día.

Selección del modo

Para la estimación de la demanda se desestimó la etapa de selección del modo. La metodología está orientada únicamente a la demanda del sistema de alquiler de bicicletas, con base en criterios definidos en el apartado anterior de la metodología.

Asignación de los viajes a los puntos candidatos

En esta etapa se asignan los viajes de cada ZAT a los puntos candidatos que estén ubicados dentro de esta. Se realizó tomando como referencia la distancia entre la estación y el centroide del ZAT. “*El centroide representa el punto en que se suponen concentrados todos los viajes generados y atraídos por la zona*” (Planteamiento del transporte, Girardotti, 2002). Entre más cerca se encuentre la estación del centroide, se le asignará una mayor cantidad de viajes.

Finalmente, se asignan los viajes entre estaciones, tomando como referencia la proporción del total de viajes realizados por modo de transporte en cada ZAT. Por ejemplo, se enviará la proporción de viajes realizados en Transmilenio de un punto candidato, a su par más cercano que se encuentre próximo a una estación de este sistema de transporte masivo.

Como resultado, se obtiene la cantidad de viajes entre cada par de puntos candidatos de la red, en una matriz origen destino.

Fase III: Implementación del modelo matemático

Para seleccionar los mejores puntos para localizar centros de alquiler de bicicletas se genera un modelo matemático, que contemple las variables y restricciones asociadas al problema en el área de estudio. El modelo propuesto en la metodología busca maximizar la demanda cubierta, teniendo en cuenta restricciones como, capacidad de las estaciones, basándose en el espacio disponible para cada estación y la distancia máxima entre cada par de nodos, que idealmente debe estar aproximadamente a 7 kilómetros entre ellas (Jensen et Al., 2010).

Con el fin de ajustar los resultados del modelo a las preferencias de las personas que se transportan en bicicleta (estas, obtenidas de la encuesta de preferencias reveladas), se creó una matriz de ponderación para darle un valor adicional a los puntos candidatos según su proximidad a: Centros de estudios, centros empresariales, establecimientos comerciales, centros recreativos, zonas residenciales y troncales de transporte masivo. Esta ponderación de factores se realizó en una escala de 1 a 10, siendo 10 el puntaje de mayor peso.

Para seleccionar la mejor solución, es recomendable evaluar los resultados del modelo en distintos escenarios, variando la capacidad máxima de bicicletas en las estaciones, o la ponderación mínima para abrir una estación.

La cantidad de viajes que puede hacer una bicicleta entre cada par de estaciones durante una franja de tiempo fue determinada a partir de la siguiente fórmula:

$$v = \frac{d}{t}$$

Ecuación 3: Cálculo de velocidad

Donde:

- d: Distancia
- t: Tiempo

Conociendo que la velocidad promedio de un ciclista en Bogotá es de 15km/h (Sanchez, 2018), se obtuvo el tiempo de viaje entre cada par de nodos y la cantidad máxima de viajes que puede hacer una bicicleta en una franja de tiempo. (Anexo 1)

El modelo matemático propuesto para la selección de los mejores puntos para localizar centros de alquiler de bicicletas es el siguiente:

Conjuntos

$N \rightarrow$ Nodos candidatos

$T \rightarrow$ Franjas de Tiempo

Parámetros

$Ponderacion_i$: Ponderación del nodo $i \in N$

$Demanda_{ijt}$: Demanda del nodo $i \in N$ al nodo $j \in N$ en la franja de tiempo $t \in T$

$Distancia_{ij}$: Distancia del nodo $i \in N$ al nodo $j \in N$

Cap : Capacidad máxima de bicicletas para las estaciones

$DMax$: Distancia máxima entre estaciones

$CostoApertura_i$: Costo de apertura del nodo $i \in N$

$CostoBicicleta$: Costo unitario de adquisición de bicicletas

$PondMin$: Ponderación mínima de apertura

$NumViajes_{ij}$: Número de viajes que puede hacer una bicicleta del nodo $i \in N$ al nodo $j \in N$

M : Número muy grande

Variables

X_{ijt} : Proporción de demanda atendida del nodo i al nodo j en la franja del tiempo t

B_{ijt} : Número de bicicletas enviadas del nodo i al nodo j en la franja de tiempo t

Y_i : 1: Si se abre una estación en el nodo i , 0: De lo contrario

V_{it} : Inventario de la estación i en la franja de tiempo t

R_{ijt} : Número de bicicletas reubicadas del nodo i al nodo j en la franja de tiempo t

$Presupuesto$: Presupuesto necesario para la implementación

$TamFlota$: Cantidad total de bicicletas en el sistema

Función Objetivo

$$MAX : \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{t \in T} Demanda_{ijt} * X_{ijt}$$

S.A

$$1) V_{i,t} = V_{i,t-1} - \sum_{j \in N} R_{i,j,t-1} + \sum_{j \in N} R_{j,i,t-1} - \sum_{j \in N} X_{i,j,t-1} * DEMANDA_{i,j,t-1} + \sum_{j \in N} X_{j,i,t-1} * Demanda_{j,i,t-1} \quad \forall i \in N, t \in T | t > 1$$

$$2) B_{i,j,t} * NumViajes_{i,j} \geq X_{i,j,t} * Demanda_{i,j,t} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T$$

$$3) \sum_{j \in N} R_{i,j,t} \leq V_{it} \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$4) V_{i,1} = V_{i,|t|} \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$5) \sum_{j \in N} X_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$6) X_{i,j,t} \leq Y_i \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T$$

$$7) X_{i,j,t} \leq Y_j \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T$$

$$8) V_{i,t} \leq Cap * Y_i \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$9) X_{i,j,t} \leq MatBinDis_{i,j} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T$$

$$10) Y_i * Ponderacion_i \geq PondMin * Y_i \quad \forall i \in N$$

$$11) Presupuesto = \sum_{i \in N} Y_i * CostoApertura_i + TamFlota * CostoBicicleta \quad \forall i \in N, \forall j \in N$$

$$12) TamFlota = \sum_{i \in N} V_{i,t} \quad \forall t \in T$$

$$13) V_{i,t} \geq \sum_{j \in N} B_{i,j,t} \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$14) B_{i,j,t} \leq Y_i * M \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T$$

$$15) B_{i,j,t} \leq Y_j * M \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T$$

La función objetivo en este modelo matemático es maximizar la proporción de la demanda cubierta en el sector elegido, dado que debido al volumen de viajes y la capacidad máxima de las estaciones, no es posible satisfacer la totalidad de la demanda.

El objetivo de las restricciones definidas es: La restricción (1) define el inventario del número de bicicletas disponibles en cada nodo y en la franja de tiempo. La restricción (2) restringe que el número de bicicletas enviadas de un nodo a otro logre satisfacer la proporción de la demanda cubierta de este. La restricción (3) restringe que el número de bicicletas reubicadas de un nodo al resto de los nodos seleccionados sea menor o igual al inventario del nodo en su respectiva franja de tiempo. La restricción (4) indica que al final del día el inventario final debe ser igual al inventario con el que se inició para cada nodo. La proporción de la demanda cubierta debe ser menor o igual al 100%, Restricción (5)

Las restricciones (6) y (7) restringen que los nodos abiertos puedan enviar bicicletas para cubrir la demanda. La restricción (8) tiene en cuenta que el inventario necesario para cada nodo abierto no sea mayor a la capacidad máxima de bicicletas en el nodo. La restricción (9) restringe que la máxima distancia entre par de nodos abiertos no sea mayor a 7 km. Para realizar esto, se creó un parámetro binario "MatBinDis" el cual toma el valor de 1 si la distancia de un nodo a otro es menor a 7 km, 0 de lo contrario. La restricción (10) tiene en cuenta la ponderación mínima que debe tener un nodo para poder abrirse. El presupuesto está definido por el costo de apertura de una estación, más el costo unitario de una bicicleta por el tamaño de la flota (Número total de bicicletas en el sistema), Restricción (11). El tamaño de la flota está definido por la sumatoria del inventario en cada franja de tiempo, Restricción (12). La Restricción (13) determina la relación entre el inventario y el número de bicicletas enviadas de un nodo a otro en la respectiva franja de tiempo.

Las restricciones (14) y (15) restringen que solo se pueda enviar bicicletas desde par de nodos que estén abiertos.

Fase IV: Evaluación de resultados

La fase final de la metodología, evaluación de resultados, pretende ilustrar las características del sistema definido en las fases anteriores y estimar el impacto de su implementación.

Para esto se propone realizar inicialmente el análisis de la red definida después de la implementación del modelo matemático y así identificar los corredores de mayor flujo de usuarios en el sistema.

Previo al análisis financiero se realiza una evaluación de los riesgos del proyecto. La efectiva gestión del riesgo permite aumentar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos, y disminuir la probabilidad y el impacto de los eventos negativos en el proyecto (Project Management Institute, 2013).

Para este tipo de proyecto, donde los riesgos son variados, es recomendable realizar una estructura de desglose de riesgos (EDR), que facilita la evaluación de riesgos según su origen o tipo (Project Management Institute, 2013)

Posterior a la identificación de los riesgos que pueden afectar el proyecto, se debe realizar un análisis cualitativo, donde se priorice la planeación de estrategias de respuesta a estos, con base en la probabilidad de que ocurran y su impacto potencial. (Project Management Institute, 2013)

Para el análisis financiero, se consideró la información mostrada en el Anexo 2. En el cual, se evaluó la rentabilidad y viabilidad del proyecto en caso de una implementación real.

El análisis se proyectó en un periodo de 10 años, tomando en cuenta las variaciones económicas que puede presentarse año tras año. En la siguiente tabla, se muestra los supuestos utilizados para realizar el análisis financiero:

<i>Supuestos</i>	<i>Valor</i>
Inflación	4%
Aumento Salario Mínimo	6%
Valor Mantenimiento	\$20,000
Cantidad de viajes para Mantenimiento	500
Costo de Mantenimiento por viaje	\$40
Días en el año	360
Salario Operario	\$1,300,000
Salario Administrativo	\$2,500,000
Gastos de Oficina Mensual	\$1,000,000
Impuesto de Renta	33%
Incremento de pasajes vendidos cada año	1.50%

Tabla 3. Supuestos financieros-Fuente: elaboración propia

Los costos asociados a la inversión inicial que se tienen en cuenta para la implementación del modelo se muestran en la siguiente tabla:

<i>Inversión inicial</i>	<i>Valor Unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Valor total</i>
Bicicletas	\$293,000	336	\$98,448,000
Cascos	\$44,990	336	\$15,116,640
Chalecos	\$9,990	336	\$3,356,640
Candado clave espiral	\$17,990	336	\$6,044,640
Transporte Cuota inicial	\$125,000,000	1	\$125,000,000
Computador para control (Lector NFC)	\$293,000	17	\$4,981,000
Ciclo-parqueadero	\$270,000	17	\$4,590,000
Instalación	\$200,000	17	\$3,400,000.00
Arrendamiento de las zonas	\$17,992,800	1	\$17,992,800
Gastos de Oficina Mensual	\$1,000,000	1	\$1,000,000
Salario Operario	\$1,300,000	14	\$18,200,000
Salario Administrativo	\$2,500,000	1	\$2,500,000

Tabla 4. Costos iniciales-Fuentes: Elaboración propia

Inversión inicial: \$300,886,920 COP

Los costos del proyecto se fijaron tomando en cuenta: La cantidad de ciclo-parqueaderos necesarios para ubicar 30 bicicletas en una estación. El total de los costos de arriendo del espacio requerido, el cual corresponde a 18 metros cuadrados y los elementos de protección personal que requiere una persona para movilizarse en bicicleta en Bogotá.

Adicionalmente, se consideró la suma de la depreciación, la cual se calculó sobre la inversión inicial con una tasa en línea recta del 10% por su uso.

<i>Costo Bicicleta</i>	
Bicicleta	\$ 293.000
Cascos	\$ 44.990
Chalecos	\$ 9.990
Candado clave espiral	\$ 17.990
Número de Bicicletas	336
Costo Total Flota Bicicletas	\$ 122.965.920
Depreciación Anual	\$ 55.334.664

Costo Ciclo parqueadero

	Unitario	Cantidad	Total
Computador para control (Lector NFC)	\$ 293.000	1	\$ 293.000
Ciclo-parqueadero	\$ 270.000	6	\$ 1.620.000
Instalación	\$ 200.000	6	\$ 1.200.000
Inversión Total			\$ 52.921.000
Depreciación Anual			\$ 9.525.780
<hr/>			
Camión	\$ 125.000.000		
Depreciación Anual	\$ 22.500.000		

Tabla 5. Depreciación activos fijos

La pérdida de valor de los activos del camión y ciclo-parqueadero se proyectó en un periodo de 5 años, mientras que, la bicicleta, los cascos, los chalecos y los candados en espiral se deprecia en un lapso de dos años. Por otro lado, del balance general se obtiene una depreciación acumulada de \$436,800COP que se estabiliza desde el año 2024.

Por último, se determinó financiar únicamente el activo del transporte, el cual se menciona en la tabla como “Transporte cuota inicial”. Para dicho financiamiento, se desea pedir un préstamo a una entidad bancaria a una tasa de interés del 0.8%.

Con el fin de realizar el estado de pérdidas y ganancias, se tomó como gastos operacionales los salarios de personal de logística, arrendamiento del espacio para las estaciones y, por último, la depreciación de los activos fijos. Entre los gastos administrativos se tuvo en cuenta el salario del personal administrativo y los gastos relacionados a la oficina donde se controlará el funcionamiento del sistema. Finalmente, en costo de ventas solo se consideró el costo de mantenimiento de las bicicletas.

Para los ingresos, se tomó en cuenta las ventas, medidas por la cantidad de viajes. Considerando una tarifa por viaje de \$1,000 COP, valor promedio de un pasaje en un sistema de transporte no motorizado en la zona de estudio. Cabe resaltar que, en el precio de venta se tuvo en cuenta un 16% extra al costo del pasaje por imprevistos como la pérdida y/o hurto de alguna de las bicicletas, lo cual, resulta un costo total del pasaje de \$1,200 COP.

La demanda total, es de 1701 viajes durante un día y 612,360 viajes al año, teniendo en cuenta un aumento de esta en 1.5% anual y manteniendo constante la cantidad de bicicletas y estaciones año tras año.

Para el caso puntual de la ciudad de Bogotá, se incurre en un trámite adicional estipulado en las normas de prestaciones de espacios públicos. Inicialmente, para poder establecer una edificación pública con estudios de movilidad se debe tener conocimiento del decreto 596 de 2007. El artículo 187 del Plan de Ordenamiento Territorial “dispone que todo proyecto de equipamiento y de comercio de escala metropolitana y urbana, deberá estar sustentado en un estudio de tránsito” (legis, 2018). Adicionalmente, para poder liquidar el pago de zonas en parques y/u estacionamientos, se debe seguir los decretos distritales 323 y 327 de 2004 y los siguientes prerequisites:

- Certificación dictada por la curaduría urbana de Bogotá en la cual se tenga claridad total del proyecto que se va a licenciar.
- De acuerdo con el Distrital 562 de 2014, dependiendo de la naturaleza del proyecto se podrá realizar la certificación.
- Se debe diligenciar el formato de solicitud de pago de cargas urbanísticas.

La Secretaria Distrital de Movilidad será la encargada en determinar la aprobación del estudio y se le comunicará al involucrado los términos de liquidación, al igual que el año de vigencia. Es importante remarcar, que los proyectos tienen un seguimiento riguroso por parte de esta entidad, ya que en dado caso en que el proyecto no sea efectivo o afecte de manera negativa los espacios públicos, esta tiene la potestad de clausurar el plan de movilidad.

5. Resultados

Fase I: Selección del área de estudio

Para la selección del área de estudio se utilizó la división geográfica de la ciudad por zonas de análisis de transporte (ZAT). Política y geográficamente la ciudad está compuesta por 20 localidades, estas a su vez están divididas en 1020 ZAT. (Galeano, 2014)

Tomando como referencia los datos de la EDM del 2015, se identificaron los ZAT de mayor generación de viajes menores a 35 minutos y se ingresaron en el SIG QGIS para generar un mapa de calor.

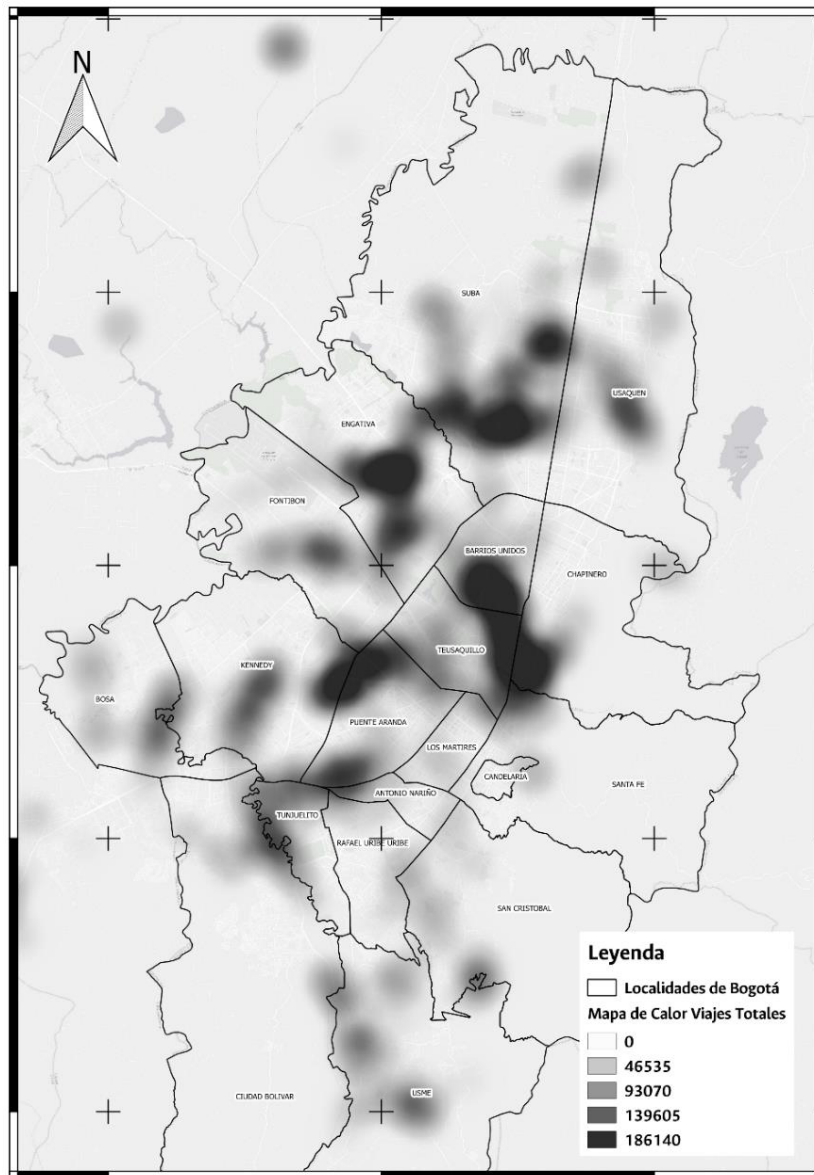


Ilustración 3: Mapa de calor generación de viajes menores a 35 minutos – Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la EDM 2015

A partir de los criterios establecidos, se seleccionó la localidad de Suba como una zona potencial para la implementación del sistema de alquiler de bicicletas. En el mapa de calor se aprecia una concentración importante de viajes en la zona, adicionalmente, la localidad cuenta con el mayor terreno de ciclorruta construido y se encuentra entre las cinco localidades con menor percepción de inseguridad (52,5%), según la Encuesta Multipropósito de Bogotá en 2017.

Para la integración del sistema con medios de transporte masivos, Transmilenio y SITP, se delimitó el área de estudio entre la Troncal Autopista Norte y la Troncal Avenida Suba. Entre estas opera el SITP y se encuentran otros corredores importantes como la Avenida Boyacá, la Calle 127, Calle 134, Calle 152 y Calle 170.

Finalmente, el área de estudio seleccionada está comprendida por las siguientes ZAT:

ZAT de estudio				
46	47	48	49	50
64	65	66	67	68
89	90	91	92	93
94	95	138	139	140
141	142	143	838	853

Tabla 6: ZAT de estudio – Fuente: Elaboración propia

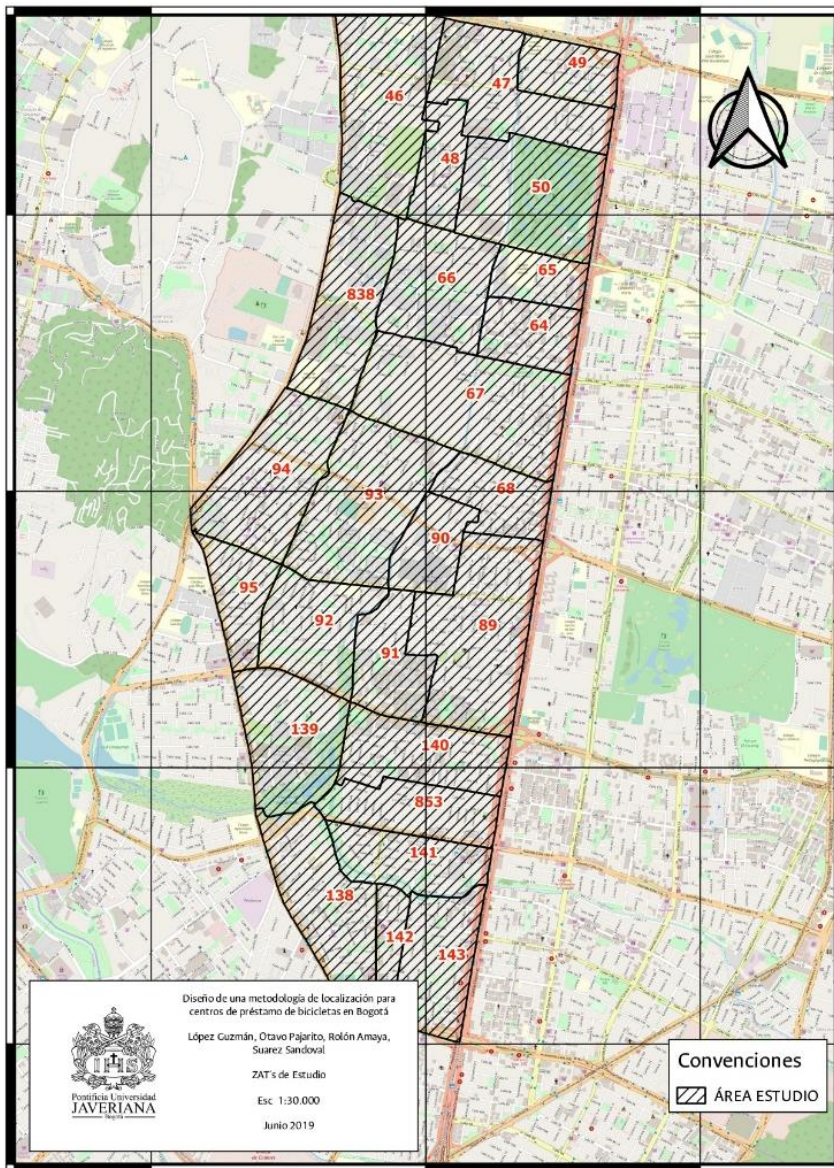


Ilustración 4: Área de estudio – Fuente: Elaboración propia

Para la selección de los puntos se tomó la información de aforos de volumen desarrollado por la Secretaría Distrital de Movilidad, de donde se obtuvo la cantidad diaria de bicicletas que circulan por la vía o ciclorruta. Dentro de esta se identificaron 4 puntos destacados dentro del área de estudio:

CÓDIGO INTERSECCIÓN	DIRECCIÓN	DIRECCIÓN	LUGAR DE AFORO	VOLUMEN DIARIO
3493	AUTONORTE	AC 170	CICLORUTA	420
9047	AV BOYACA	AC 138	CICLORUTA	1735

14816	AC 127	AUTONORTE	VIA	2236
14816	AC 127	AUTONORTE	CICLORUTA	2084

Tabla 7: Resumen aforos de volumen de bicicletas en el área de estudio - Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad

Con base en los resultados de los aforos y la presencia de estaciones de Transmilenio, se localizaron puntos a lo largo del tramo de la Autopista Norte que está dentro del área de estudio. En la Avenida Boyacá, se localizaron puntos al norte, en donde además de un alto flujo de bicicletas, se tiene puntos atractores como el centro comercial Parque la Colina.

Para los puntos candidatos generadores de viajes, se localizaron en zonas residenciales del área de estudio.

Finalmente, estableció un total de 41 puntos candidatos, diferenciados según el tipo, atractores, generadores o mixtos. Los puntos generadores se establecieron principalmente en zonas residenciales, mientras que los atractores en zonas comerciales, empresariales y estaciones de medios transporte masivos.

ID	Tipo	Nombre
1	Atractor	TM Mazuren
2	Mixto	Calle 166 55 - Zona Residencial
3	Atractor	167 - 58 - Zona Comercial
4	Generador	165 con Boyaca - Zona Residencial
5	Generador	163 - 54 - Carmel Club
6	Generador	162 - 54 - Zona Residencial
7	Mixto	162 62 - Zona Residencial
8	Atractor	167 - Boyaca
9	Atractor	Calle 163 Boyaca - Paradero SITP
10	Generador	160 - 55 - Paradero SITP
11	Atractor	TM Toberin
12	Atractor	TM 146
13	Atractor	TM 142
14	Atractor	TM Alcalá 138
15	Atractor	TM Alcalá 133
16	Atractor	TM Prado
17	Atractor	TM 127
18	Atractor	TM Pepe Sierra
19	Atractor	TM 106
20	Atractor	153 Boyacá
21	Atractor	CC Parque La Colina
22	Generador	Cordoba 120
23	Generador	123 Alambra
24	Generador	127 - 56
25	Atractor	Bulevar Niza
26	Atractor	Centro Empresarial 127
27	Generador	129 - 58 Las Villas
28	Mixto	Calle 134 - 57 Stark
29	Mixto	Portoalegre
30	Generador	Cale 138 - 58 Zona Residencial
31	Generador	Calle 138 -55 Zona Residencial
32	Generador	115 - 53 Zona Residencial
33	Generador	150 - 54 Zona Residencial
34	Atractor	Centro Comercial 129

35	Generador	Colsubsidio Mazuren
36	Generador	Calle 152 - 56 Zona Residencial
37	Generador	Calle 145 - 51 Zona Residencial
38	Generador	Calle 167 -58 Zona Residencial
39	Generador	Calle 128 -58
40	Generador	Calle 152 -57
41	Generador	Calle 136 - 50 Zona Residencial

Tabla 8: Puntos candidatos - Fuente: Elaboración propia

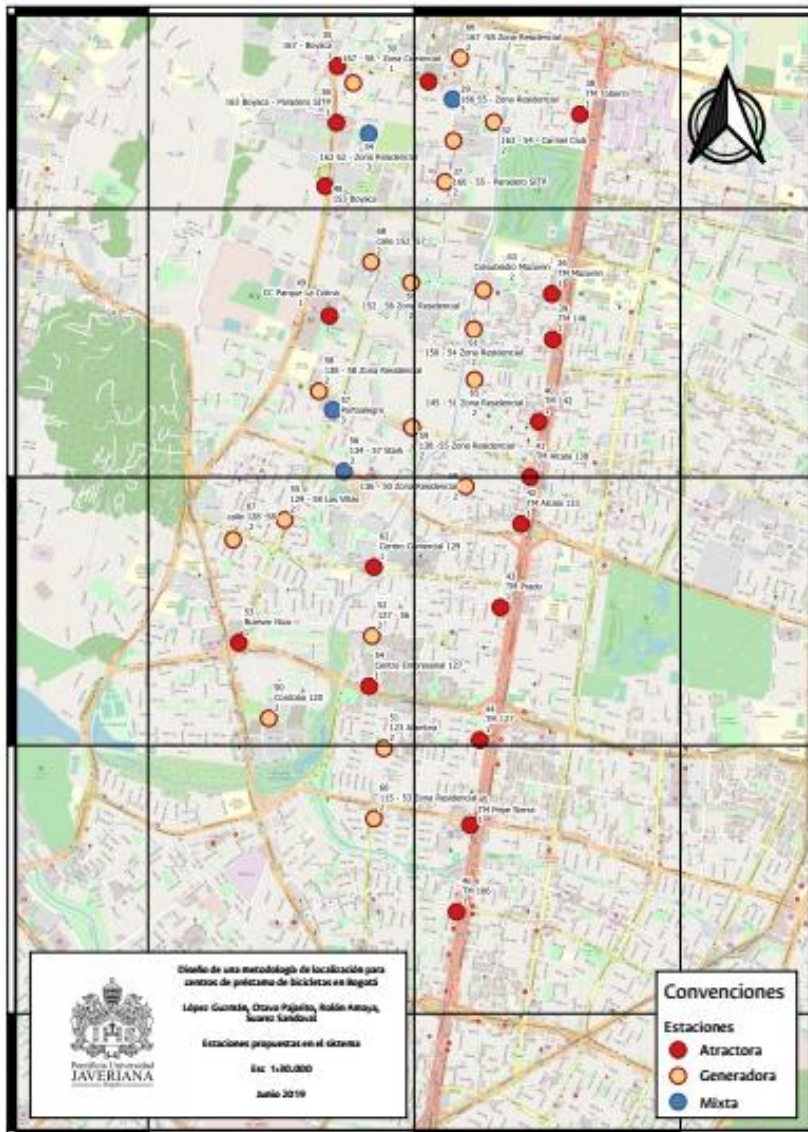
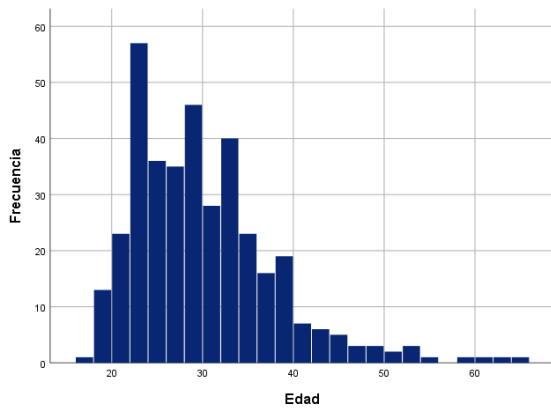


Ilustración 5: Puntos candidatos – Fuente: Elaboración propia

Fase II: Estimación y análisis de la demanda

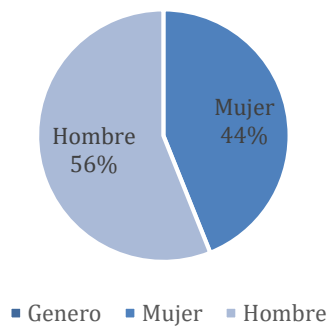
Para el desarrollo de la encuesta de preferencias reveladas se calculó una muestra con un nivel de confianza del 95%, teniendo una población de 671.536 (utilizando la población de los ZAT del área de estudio), se obtiene una muestra de 374 encuestas. Con esta se buscó conocer la disposición de uso y pago del sistema de las personas en el sector, junto con otros aspectos relacionados a preferencias para transportarse en bicicleta. Los resultados se muestran a continuación:

Edad



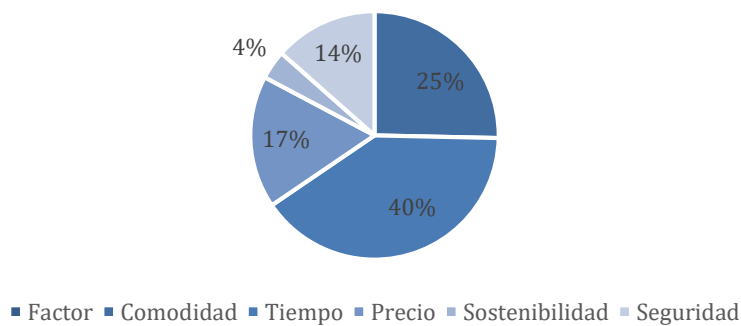
Gráfica 3. Edad-Fuente: Elaboración propia

Género



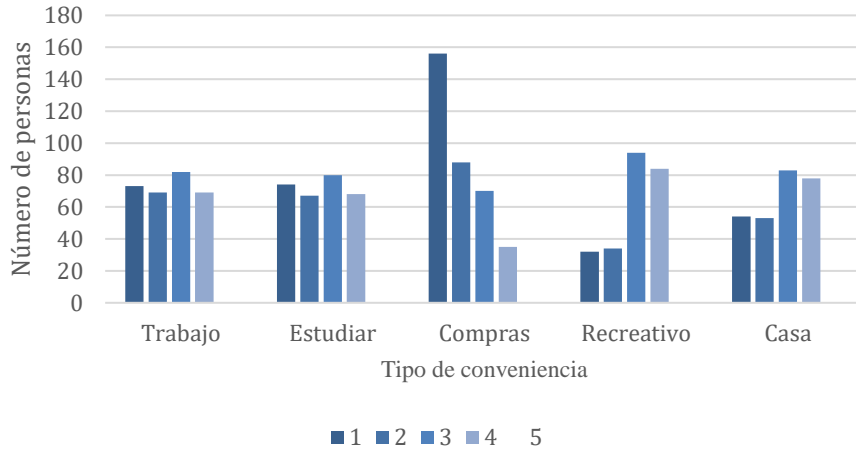
Gráfica 4. Genero-Fuente: Elaboración propia

¿Cuál es el factor más influyente en el momento de elegir el medio para transportarse?



Gráfica 5. Factor de influencia-Fuente: Elaboración propia

De 1 a 5, califique, ¿Qué tan conveniente considera transportarse en bicicleta para los siguientes motivos de viaje? (Siendo 1 la menor calificación y 5 la mayor)



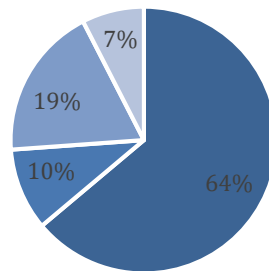
Gráfica 6. Conveniencia de uso-Fuente: Elaboración propia

Puntaje	Trabajo	Estudiar	Compras	Recreativo	Casa
1	19,7%	19,9%	42,0%	8,6%	14,6%
2	18,6%	18,1%	23,7%	9,2%	14,3%
3	22,1%	21,6%	18,9%	25,3%	22,4%
4	18,6%	18,3%	9,4%	22,6%	21,0%
5	21,0%	22,1%	5,9%	34,2%	27,8%

Tabla 9. Porcentaje conveniencia de uso- Fuente: Elaboración propia

Escenario de uso:

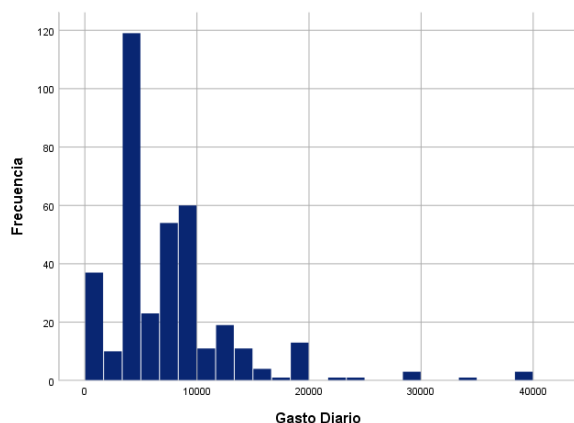
Teniendo en cuenta la hora habitual en la que se transporta, conteste la siguiente pregunta: ¿Si existiera un sistema de alquiler de bicicletas cerca a su casa, que se conecte con su destino o con estaciones de medios de transporte masivos, y al tomarlo esto le genere un ahorro en el tiempo del trayecto usted?



- No tomaría el servicio
- Tomaría el servicio, mientras su precio sea competitivo respecto a los medios de transporte que utiliza
- Tomaría el servicio, si el costo es inferior al medio de transporte que utiliza
- Tomaría el servicio, sin importar el costo

Gráfica 7. Escenarios de uso-Fuente: Elaboración propia

¿Cuánto dinero gasta al día en transporte?



Gráfica 8. Gasto diario en transporte-Fuente: Elaboración propia

Generación y atracción de viajes

Con base en los resultados de la Encuesta de Movilidad del 2015, se hallaron los viajes generados y atraídos por ZAT en el área de estudio:

ID ZAT	Poblacion ZAT	Encuestados Origen	Encuestados Destino	Factor de ajuste	Total Viajes
89	26506	32	41	828,31	60467
94	28709	64	59	448,57	55175
67	25577	43	49	594,81	54723
47	26975	33	33	817,42	53950
46	22821	67	66	340,61	45301
93	13922	15	22	928,13	34341
64	17449	20	18	872,45	33153
66	13364	11	14	1214,90	30373
141	9503	2	4	4751,50	28509
91	12613	10	12	1261,30	27749
138	11061	23	33	480,91	26931
838	12417	12	13	1034,75	25869
140	12045	19	19	633,94	24090
68	10197	13	17	784,38	23532
92	9326	18	22	518,11	20724
49	11333	10	8	1133,30	20399
90	9586	37	34	259,08	18395
139	7011	16	19	438,18	15337
853	8258	20	17	412,90	15277
143	5472	43	51	127,25	11962
48	7949	12	6	662,41	11924
65	4807	3	3	1602,33	9614
142	4340	4	4	1085	8680
95	3739	13	13	287,61	7478
50	950	8	9	118,75	2019

Tabla 10: Total viajes por ZAT

Distribución de los viajes

De los viajes generados y atraídos al área de estudio menores a 35 minutos, se seleccionaron los que se realizan en los siguientes medios de transporte: Transmilenio, TPC (SITP), auto particular, taxi, ilegal

(plataformas digitales), peatonal y bicicleta. Así mismo, se dividieron en tres grupos según la etapa en la que impacta el sistema de alquiler de bicicletas dentro de la totalidad del viaje y los motivos de viaje que se pretende satisfacer.

- Grupo 1: Los viajes realizados en Transmilenio y TPC (SITP), en los que se puede introducir la bicicleta en la etapa inicial o final del viaje para cubrir distancias de última milla.
- Grupo 2: Viajes generados en auto particular, taxi e ilegal (plataformas digitales). Según lo observado en la encuesta realizada, existe disposición de sustituir medios motorizados por el sistema de alquiler de bicicletas, siempre y cuando esto permita reducir el tiempo de viaje, fijando un precio competitivo. Se relacionarán estos viajes a recreación y trámites.
- Grupo 3: Peatonal y no motorizados. Las bicicletas del sistema pueden sustituir el medio de transporte predominante en la totalidad del viaje.

Sobre la demanda total, se asume una proporción para el sistema con base en la distribución modal de la zona y la disposición del usuario a utilizar el sistema.

Grupo	Total viajes	Proporción asumida	Demanda Asumida
Grupo 1	86935	6%	5274
Grupo 2	51554	2%	1072
Grupo 3	49406	10%	5684

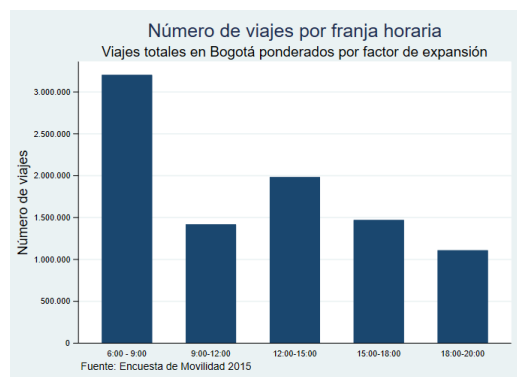
Tabla 11. Demanda asumida para el sistema-Fuente: Elaboración propia

La demanda total que se asume para el sistema de alquiler de bicicletas en el área de estudio es de 12.029 viajes. Está dividida en cada una de las ZAT del área de estudio, de manera proporcional a la generación de viajes en cada una de ellas. La demanda asumida por ZAT se pueden consultar en el Anexo 3.

Tomando los viajes, se dividió la demanda resultante en 5 franjas de tiempo:

- Franja 1: 6:00AM – 9:00AM
- Franja 2: 9:00AM – 12:00AM
- Franja 3: 12:00AM – 3:00PM
- Franja 4: 3:00PM – 6:00PM
- Franja 5: 6:00PM – 8:00PM

A cada una se le asignó la proporción del total de viajes que se generan durante la franja de tiempo por medio de transporte.



Gráfica 7.: Número de viajes por franja horaria-Fuente: Elaboración propia

Franja Horaria	Demanda
1	4916
2	1892
3	1774
4	2377
5	1063

Tabla 12. Demanda por franja horaria-Fuente: Elaboración propia

Asignación de los viajes a los puntos candidatos

Se asignó la demanda de cada ZAT a las estaciones candidatas dentro de ella, con base en la distancia hasta el centroide. La matriz de distancias y el cálculo de la demanda se puede consultar en el Anexo 4.

ID	Nombre	Demanda
1	TM Mazuren	157
2	Calle 166 55 - Zona Residencial	157
3	167 - 58 - Zona Comercial	565
4	165 con Boyaca - Zona Residencial	492
5	163 - 54 - Carmel Club	682
6	162 - 54 - Zona Residencial	250
7	162 62 - Zona Residencial	441
8	167 - Boyaca	407
9	Calle 163 Boyaca - Paradero SITP	412
10	160 - 55 - Paradero SITP	270
11	TM Toberin	490
12	TM 146	251
13	TM 142	148
14	TM Alcalá 138	94
15	TM Alcalá 133	240
16	TM Prado	712
17	TM 127	112
18	TM Pepe Sierra	108
19	TM 106	226
20	153 Boyacá	124
21	CC Parque La Colina	276
22	Cordoba 120	152
23	123 Alambra	260
24	127 - 56	248
25	Bulevar Niza	42
26	Centro Empresarial 127	60
27	129 - 58 Las Villas	485
28	Calle 134 - 57 Stark	211
29	Portoalegre	410
30	Cale 138 - 58 Zona Residencial	400
31	Calle 138 -55 Zona Residencial	130
32	115 - 53 Zona Residencial	258
33	150 - 54 Zona Residencial	248
34	Centro Comercial 129	133
35	Colsubsidio Mazuren	235
36	Calle 152 - 56 Zona Residencial	390
37	Calle 145 - 51 Zona Residencial	561
38	Calle 167 -58 Zona Residencial	632
39	Calle 128 -58	66
40	Calle 152 -57	235
41	Calle 136 - 50 Zona Residencial	259

Tabla 13: Demanda por estación

Finalmente se genera la matriz OD entre estaciones. A cada nodo (estación) se le creó tres arcos con las estaciones más cercanas, uno para cada tipo de viaje (grupos definidos en la etapa dos, distribución de los viajes). Se tomó en cuenta que las características de la estación destino estén relacionadas con el tipo de viaje y se le asigna la proporción de la demanda correspondiente.

La matriz OD del sistema se puede consultar en el Anexo 3.

Fase III: Implementación del modelo matemático

Para la obtención de la solución del modelo matemático, se utilizó el software GUSEK. Como se mencionó en la metodología, se realizaron diferentes escenarios con el fin de poder determinar la mejor solución. Para cada uno de los siguientes escenarios, el modelo halló un valor máximo de demanda cubierta.

Como se muestra en la siguiente tabla, se realizaron 9 escenarios, variando los parámetros de: Número máximo de bicicletas por estación y ponderación mínima de la estación. La ponderación de factores por estación se puede consultar en el Anexo 5.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Escenario 7	Escenario 8	Escenario 9
Número de bicicletas Máximo por estación	30	30	30	40	40	40	50	50	50
Ponderación Mínima	5	5.5	6	5	5.5	6	5	5.5	6
Número de estaciones Abiertas	17	12	10	17	12	10	17	12	10
Presupuesto (COP)	\$112,239,354	\$88,004,138	\$71,798,865	\$116,371,707	\$95,126,631	\$75,441,558	\$125,660,860	\$101,436,668	\$81,596,199
Total Bicicletas del sistema	336	281	201	399	334	213	497	346	273
Demanda Cubierta	1701	1344	859	1754	1405	911	1788	1440	938

Tabla 14. Escenarios-Fuente: Elaboración propia

Se seleccionó el escenario 1 como la mejor solución obtenida. A pesar de que el escenario 7 alcanza el mayor cubrimiento de la demanda, el escenario 1 encuentra un mejor balance entre el presupuesto necesario para implementar el sistema y la demanda cubierta. En el escenario 7 se tiene un incremento en el presupuesto necesario del 6% sin obtener cambios significativos en el cubrimiento de la demanda.

A continuación, se ilustra en la Tabla 13, las 17 estaciones elegidas con sus respectivos viajes, para las cuales se cubre una demanda total de 1701 viajes y un promedio de 80 viajes por estación.

Estaciones abiertas	Estaciones	Demanda atendida	Bicicletas asignadas
1	134 - 57 Stark	114	29
2	153 Boyaca	23	30
3	163 - 54 - Carmel Club	282	2
4	163 Boyaca - Paradero SITP	63	30
5	165 con Boyaca - Zona Residencial	7	30
6	167 -58 Zona Residencial	7	7
7	Bulevar Niza	36	1
8	CC Parque La Colina	210	30
9	Centro Empresarial 127	16	4
10	Portoalegre	140	30
11	TM 106	13	22
12	TM 146	170	27
13	TM Alcalá 133	120	30
14	TM Alcalá 138	164	4
15	TM Mazuren	74	30
16	TM Pepe Sierra	49	0
17	TM Toberin	213	30

Tabla 15. Estaciones elegidas-Fuente: Elaboración propia

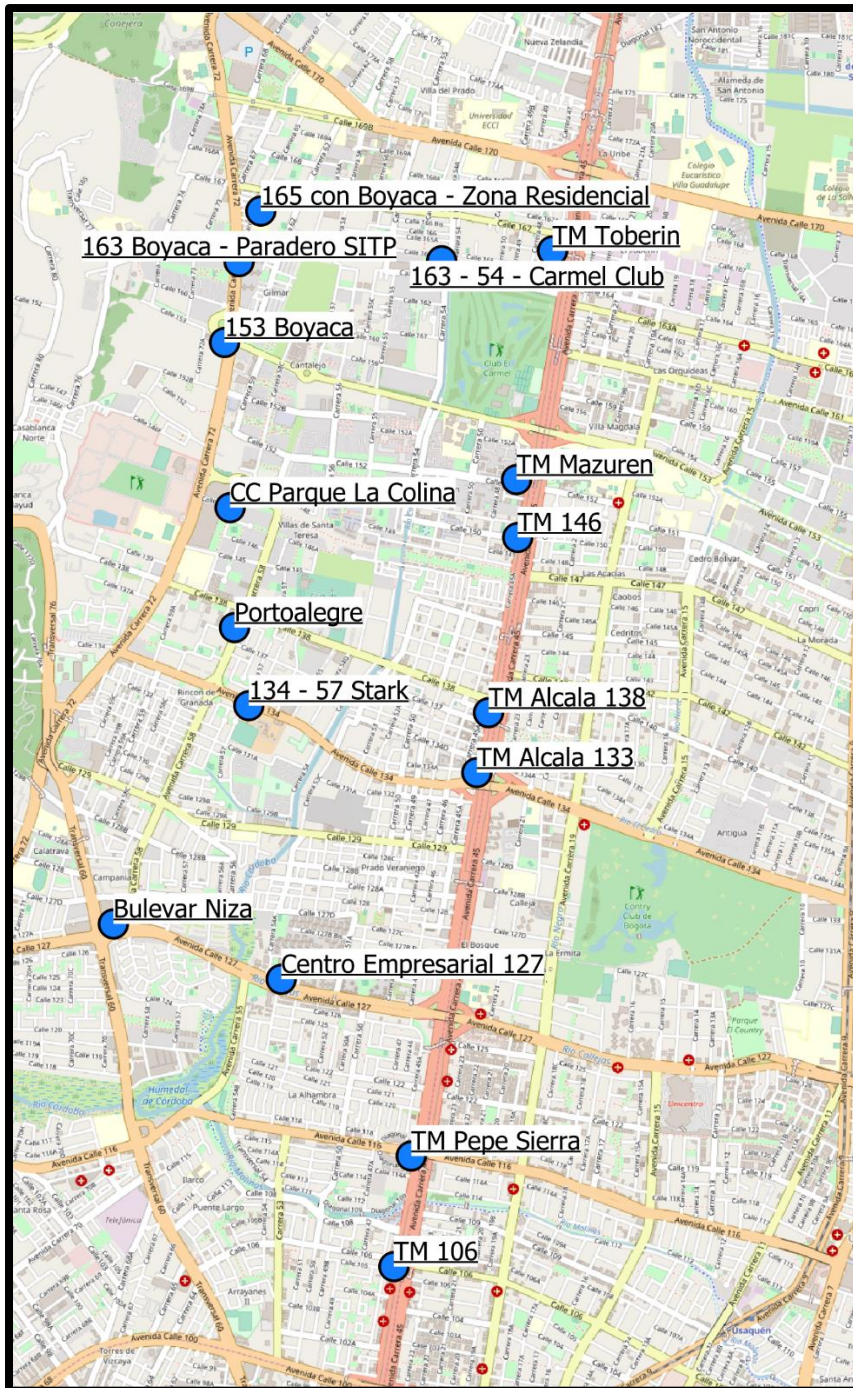


Ilustración 6: Mapa Estaciones abiertas - Fuente: Elaboración propia

En el escenario que se seleccionó, no se ocupa el 100% del espacio de los ciclo-parqueaderos en todas las estaciones, esto se debe a que en algunas estaciones que no son generadoras de viajes, tienen los espacios disponibles para recibir las bicicletas que provienen de otras estaciones, obteniendo un 34% de espacios libres en todo el sistema para ubicar bicicletas y así evitar que un usuario llegue a una determinada estación y no tenga espacio para aparcar su bicicleta.

Fase IV: Evaluación de resultados

Análisis de la red

Con base en los resultados obtenidos por el modelo matemático, se realizó un modelamiento mediante el programa PTV Visum, software que permite realizar un análisis del tránsito con el fin de planificar y gestionar los Sistemas de Información Geográfica. “Los expertos en transporte utilizan PTV Visum para modelar redes de transporte y demanda de viajes, analizar los cambios del tránsito previstos, planificar servicios de transporte público y desarrollar avanzadas estrategias y soluciones de transporte.” (group, 2019). Una vez definida la red del sistema de bicicletas, se realizó la modelación con el fin de determinar los corredores por donde transitarían los usuarios del sistema, al igual que el flujo, es decir, la cantidad y la orientación de las bicicletas por los corredores dentro del área de estudio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

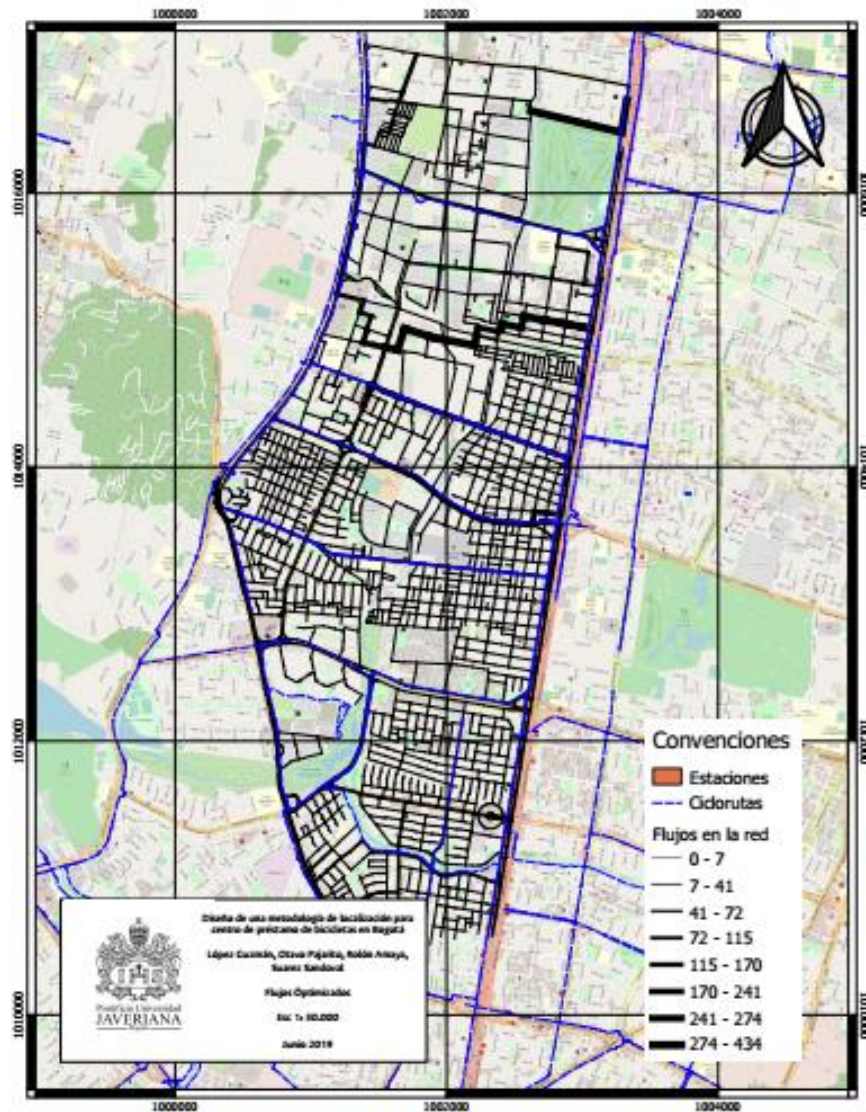


Ilustración 7: Modelación-Fuente: Elaboración propia

En los resultados obtenidos, se identifican los corredores con mayor flujo de usuarios del sistema por día.

Corredor	Número de viajes	Ciclo ruta
Calle 134	234	Sí
Calle 138	115	
Calle 163	419	No
Avenida Boyacá	140	Sí
Calle 153	96	Sí

Tabla 16: Corredores con mayor flujo de usuarios

Adicional a los corredores presentados en la tabla 14, se presenta un alto flujo de bicicletas en el sector comprendido entre la Autopista Norte y la Avenida Boyacá entre la calle 150 y la calle 145, debido a la demanda atendida por la estación CC Parque la Colina y TM 146. En este tramo de la red no existe ciclo ruta.

Por otro lado, en los resultados obtenidos por franja horaria, la mayor cantidad de viajes se generan en la franja 1 (6:00AM – 9:00AM) donde el mayor flujo de usuarios transita por el corredor de la Calle 163 y la Calle 134 con un volumen de 228 y 84 viajes respectivamente (Anexo 8).

En la franja 2 (Anexo 9), 3 (Anexo 10) y 4 (Anexo 11), que representan horas valle, se observa un comportamiento similar, donde el mayor flujo de usuarios se encuentra en el sector comprendido en el sector comprendido entre la Autopista Norte y la Avenida Boyacá entre la calle 150 y la calle 145, con un flujo entre 46 y 85 viajes.

En la franja 5 (6:00PM – 8:00PM), que representa la hora pico de la tarde, el sector de mayor flujo se encuentra entre las Calles 150 y 145, con un flujo de 51 viajes (Anexo 12). Cabe resaltar la disminución del 77% en el volumen de usuarios en esta franja con respecto a la hora pico de la mañana. Esto se debe a que, en la Encuesta de Movilidad utilizada distribuir la demanda por franjas horarias, se realizó una menor cantidad de encuestas en horario nocturno, y este comportamiento no refleja la realidad del tráfico en la ciudad.

Evaluación de riesgos

En los estudios relacionados, se hace énfasis en el riesgo de accidente y lesiones de los usuarios. Este riesgo incrementa según factores externos como el clima y la iluminación (Boufous, de Rome, Senserrick, & Ivers, 2012) y factores propios del usuario, como no usar el casco y chaleco reflectivo, o la habilidad montando bicicleta (Chen & Shen, 2016). En Bogotá, de un total de 537 siniestros viales con muertes en 2017, el 11% de las víctimas fueron ciclistas. Adicional a estos se tuvo 1473 accidentes reportados que involucraban ciclistas en el Anuario de Siniestralidad Vial de Bogotá de 2017.

Adicional a esto, se encuentra los riesgos relacionados a la seguridad y el hurto. En 2017, “según cifras de la Secretaría Distrital de Seguridad fueron hurtadas en Bogotá 3.133 bicicletas” (Colombia, 2018).

A estas dos categorías de riesgo se le añaden los relacionados con la legislación e ineficiencias propias que se puedan generar durante la implementación del sistema.

Para la estructura de desglose de riesgos se definieron tres categorías: técnico, externo y dirección y ejecución del proyecto.

Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Sistema de alquiler de bicicletas	Técnico	Dependencias del sistema	Incumplimiento legislativo
		Desempeño y fiabilidad	Baja calidad de las bicicletas
			Precio excesivo contra la disposición de pago
			Dificultad para crear transporte intermodal
			Información desactualizada
		Demanda	Sesgos
			Ineficiencias en la relocalización de bicicletas
			Baja utilización del sistema
			Presupuesto insuficiente para la implementación del sistema
			Flujo de caja menor al esperado
	Externo	Lesiones y accidentes	Inexperiencia del usuario
			No usar elementos de seguridad
			Conducción temeraria
		Seguridad	Hurto de las bicicletas
			Hurto de otros activos en las estaciones
		Clima	Lluvias y bajas temperaturas
		Malla vial e infraestructura	Baja iluminación
			Corredores del sistema sin cicloruta

Dirección y ejecución del proyecto		Reducción de espacios para el tránsito de bicicletas.
	Uso excesivo de recursos	Presupuesto insuficiente para la implementación del sistema
	Tiempo	Retraso en la implementación del sistema
	Tiempo Comunicación	Cambios en la legislación y viabilidad del proyecto
		Poca promoción y marketing del sistema
Planeación a futuro	Cambios en la oferta y demanda	

Tabla 17. Estructura de desglose de riesgos (EDR)

Los riesgos identificados se sometieron a un análisis cualitativo donde se pondera la probabilidad de ocurrencia y el impacto sobre el proyecto en caso de que ocurra dicho riesgo.

Definición	Probabilidad
Muy improbable	0,1
Poco probable	0,3
Probable	0,5
Muy probable	0,7
Casi certeza	0,9

Tabla 18. Definición de probabilidad de riesgo

Impacto	Bajo (0,1)	Medio (0,5)	Alto (0,9)
Costo	Aumento < 10% del costo	Aumento del 10-20% del costo	Aumento > 20% del costo
Alcance	Disminución en el alcance apenas perceptible	Disminución considerable del alcance del proyecto	El proyecto pierde su viabilidad
Calidad	Degradación en la calidad del servicio apenas perceptible	Reducción considerable en la calidad del servicio	Incumplimiento total del diseño y funcionamiento del sistema

Tabla 19. Condiciones definidas para escala de impacto

Num.	Riesgo	Imp.	Prob.	Score	Trigger	Respuesta
1	No usar elementos de seguridad	0,9	0,7	0,63	Usuarios que no cumplan con las condiciones de uso.	Sanciones a los usuarios que no utilicen los elementos de seguridad.
2	Presupuesto insuficiente para la implementación del sistema	0,9	0,5	0,45	Incremento en los costos del proyecto.	Tener alternativas en los proveedores y cumplir con los tiempos de implementación.
3	Hurto de las bicicletas	0,9	0,5	0,45	Delincuencia.	Bicicletas con GPS y registro del usuario.
4	Corredores del sistema sin ciclorruta	0,5	0,9	0,45	Infraestructura vial.	Promover rutas con ciclorruta para trayectos frecuentes.
5	Cambios en la oferta y demanda	0,9	0,5	0,45	Crecimiento o disminución de la demanda.	Planeación para la ampliación del sistema en función de la demanda.
6	Conducción temeraria	0,5	0,7	0,35	Comportamiento del usuario.	Promover el buen comportamiento y manejo defensivo en el usuario.

7	Lluvias y bajas temperaturas	0,5	0,7	0,35	Condiciones meteorológicas.	Mantener las bicicletas en buenas condiciones mecánicas
8	Retraso en la implementación del sistema	0,5	0,7	0,35	Imprevistos e ineficiencias en la construcción y adquisición.	Gestión eficiente y estudio previos a la implementación del proyecto.
9	Flujo de caja menor al esperado	0,9	0,3	0,27	Baja utilización del sistema	Promoción del sistema.
10	Baja calidad de las bicicletas	0,9	0,3	0,27	Duración menor a la esperada del activo.	Utilizar referencias utilizadas por sistemas de alquiler en otras ciudades.
11	Baja utilización del sistema	0,9	0,3	0,27	Viajes menores a los estimados.	Promoción del sistema.
12	Cambios en la legislación y viabilidad del proyecto	0,9	0,3	0,27	Radicación de leyes que prohíban el sistema.	Realizar estudios previos de factibilidad y proyectos de ley en trámite.
13	Reducción de espacios para el tránsito de bicicletas.	0,9	0,3	0,27	Reducción de la infraestructura de ciclo rutas.	Promover rutas seguras con menor tránsito de vehículos para trayectos frecuentes.
14	Sesgos	0,5	0,5	0,25	Sesgos en la encuesta realizada en el sector.	Realizar prueba piloto.
15	Inexperiencia del usuario	0,5	0,5	0,25	Inexperiencia del usuario montando bicicleta.	Promover rutas seguras con menor tránsito de vehículos para trayectos frecuentes.
16	Baja iluminación	0,5	0,5	0,25	Baja iluminación en la vía que facilite accidentes.	Equipar con luz y chaleco reflectivo.
17	Precio excesivo contra la disposición de pago	0,5	0,5	0,25	Incorrecta definición del precio del servicio.	Ajustar el precio del servicio según la respuesta en la recolección de información.
18	Información desactualizada	0,5	0,3	0,15	Información desactualizada del área de estudio.	Recolección de información actualizada en el área de estudio.
19	Ineficiencias en la relocalización de bicicletas	0,5	0,3	0,15	Cambios en el comportamiento de la demanda.	Ajustar el resultado del modelo al nuevo comportamiento de la demanda.
20	Poca promoción y marketing del sistema	0,5	0,3	0,15	Campañas de promoción ineficientes.	Promoción del sistema enfocada a la población del área de estudio.
21	Incumplimiento legislativo	0,9	0,1	0,09	Radicación de leyes que prohíban el sistema.	Realizar estudios previos de factibilidad y proyectos de ley en trámite.
22	Dificultad para crear transporte intermodal	0,5	0,1	0,05	Estaciones ubicadas lejos de estacione de medios de transporte masivo.	Localización y acuerdos que faciliten la articulación entre modos de transporte masivo.

23	Hurto de otros activos en las estaciones	0,5	0,1	0,05	Delincuencia.	Sistema de seguridad.
----	--	-----	-----	------	---------------	-----------------------

Tabla 20. Clasificación de riesgos y plan de respuesta.

Se identifican los riesgos asociados a la seguridad y los accidentes de los usuarios como los de mayor prioridad, para disminuir su impacto se buscan respuestas de mitigación, que disminuyan el impacto y probabilidad de que se presenten. Por el contrario, los riesgos asociados al cumplimiento del marco legislativo no se tienen dentro de los de mayor relevancia, dado de que no se esperan cambios que perjudiquen la movilidad en bicicleta y la creación de sistemas de este tipo. Esto se puede evidenciar en los proyectos de ley como la Ley 1811 de 2016, que “tiene por objeto incentivar el uso de la bicicleta como medio principal de transporte en todo el territorio nacional; incrementar el número de viajes en bicicleta, avanzar en la mitigación del impacto ambiental que produce el tránsito automotor y mejorar la movilidad urbana.” (JurisCol, 2016). De igual forma el Proyecto de Ley 165 de 2018, que “busca crear medida de protección y seguridad para bici usuarios del país, que permita el tránsito y uso seguro de la bicicleta en el territorio nacional.” (República, 2018).

Análisis financiero

A continuación, se muestra el flujo libre de caja, tomando en consideración los datos descritos en el apartado de metodología financiera:

Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Utilidad Operacional	\$ -	\$ 84.263.556	\$ 102.591.895	\$ 122.290.732	\$ 143.450.323	\$ 166.166.507	\$ 277.901.480	\$ 304.042.369	\$ 332.064.274	\$ 362.088.883	\$ 394.245.334
Depreciacion	\$ -	\$ 87.360.444	\$ 87.360.444	\$ 87.360.444	\$ 87.360.444	\$ 87.360.444	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Utilidad antes de int, imp, depreciacion	\$ -	\$ 171.624.000	\$ 189.952.339	\$ 209.651.176	\$ 230.810.767	\$ 253.526.951	\$ 277.901.480	\$ 304.042.369	\$ 332.064.274	\$ 362.088.883	\$ 394.245.334
Capex	\$ (300.886.920)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Capital de Trabajo	\$ (11.613.080)	\$ (118.699.729)	\$ 5.586.294	\$ 10.059.001	\$ 7.620.322	\$ (9.787.199)	\$ 44.762.271	\$ 16.291.612	\$ 7.516.935	\$ 7.400.447	\$ (4.144.375)
Impuestos Operacionales	\$ -	\$ (27.806.973)	\$ (33.855.325)	\$ (40.355.942)	\$ (47.338.607)	\$ (54.834.947)	\$ (91.707.488)	\$ (100.333.982)	\$ (109.581.210)	\$ (119.489.332)	\$ (130.100.960)
Flujo Libre de Caja	\$ (312.500.000)	\$ 25.117.298	\$ 161.683.308	\$ 179.354.235	\$ 191.092.483	\$ 188.904.805	\$ 230.956.262	\$ 219.999.999	\$ 229.999.999	\$ 249.999.999	\$ 259.999.999

Tabla 21. Flujo libre de caja-Fuente: Elaboración propia

La utilidad operacional se obtiene del estado de pérdidas y ganancias que se encuentra en el Anexo 2. Teniendo el flujo de caja libre durante los 10 años proyectados, se procedió a calcular los indicadores financieros, tasa interna de retorno, que nos muestra la rentabilidad del proyecto y el valor presente neto, el cual, determina la viabilidad del proyecto.

TIR	42,79%
VPN	\$ 545.778.028

Tabla 22. Indicadores financieros-Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los indicadores mostrados en la Tabla 16, se puede concluir que, el sistema es un proyecto viable con una tarifa de \$1,200 por viaje y genera una rentabilidad de 43% por año.

Por último, el único año de flujo de caja negativo es el primero, lo cual, indica que el Payback del proyecto o recuperación de la inversión, se obtendrá en el año siguiente de su implementación.

Impacto ambiental

Para evaluar el impacto ambiental que generara el proyecto es pertinente definir conceptos clave como la huella de carbono, este es un indicador ambiental que cuantifica los gases de efecto invernadero emitidos por un objeto o persona con efecto directo o indirecto a la atmosfera (Ministerio de Cultura, 2017).

Los altos niveles de contaminación en el aire afectan de forma negativa la función pulmonar y desencadenan enfermedades respiratorias agudas y crónicas. Existe un total de 1.3 millones de personas en el mundo que mueren a causa de enfermedades respiratorias causadas por la polución (Organización Mundial de la Salud, 2019), especialmente personas que viven en zonas con un nivel elevado de contaminación. Mediante la disminución de la partícula PM10, agente contaminante, cuya cifra supera los 45 ug/m3 actualmente, es posible mejorar la calidad del aire en la ciudad y disminuir la cantidad de enfermedades derivadas de la contaminación atmosférica.

El transporte motorizado es uno de los grandes generadores de CO2 en las grandes ciudades, según el Observatorio de Movilidad de 2017, en la capital del país hay 2,3 millones de vehículos registrados a diciembre de 2017, con una tasa de crecimiento anual del 5,9%, con otra variable a considerar que es la antigüedad de estos vehículos. En promedio, el parque automotor registrado en Bogotá tiene 12,9 años a 2018, de estos, alrededor del 12% son modelo anterior a 1990. Por su parte, cuando se habla de los vehículos de servicio público, los camiones son los vehículos más antiguos, con 27,9 años en promedio, las camionetas y buses de transporte especial, registran un promedio de 11,4 años de antigüedad. Los vehículos antiguos dejan una huella de carbono mayor, por lo que la normativa que regula los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna cada vez está más regulada. Entre todos los vehículos en Bogotá, se produce alrededor de 68 millones de toneladas de CO2 al año.

Existe la posibilidad de reducir estos valores e indicadores a partir del transporte no motorizado. Utilizando la aplicación móvil recomendada por el ministerio de transporte, Carbon Track, se calcula la huella de carbono generada en el transporte cotidiano. Se obtuvo que en promedio una persona emite alrededor de 60 kilos de CO2 al año en viajes de 15 a 35 minutos en automóvil, si esta persona decide utilizar motocicleta como medio de transporte, su huella se reduce a 10,500 gramos y utilizando el transporte público se llega a una reducción del 60% de las emisiones (a razón de que el transporte público lleva más de una persona). Con el uso de la bicicleta, o cualquier transporte no motorizado, se reduce la huella de carbono generada en transporte de personas en el 90%.

Por un lado, el sector elegido ubicado en la localidad de Suba tiene una tasa de motorización de 208 vehículos por cada 1000 habitantes, y la localidad está compuesta por 1.34 millones habitantes. Con base en lo anterior, se establece un análisis y una proyección de la reducción en la huella de carbono con el uso del sistema de bicicletas para transportarse. Tomando la población del área de estudio de 671.536 habitantes y considerando una tasa de motorización del 20,8%, es decir, 139,679 personas propietarias de vehículos, estas generan aproximadamente 8.380,74 toneladas de CO2 al año transportándose en sus vehículos particulares motorizados. Con los resultados obtenidos en la encuesta realizada en el área de estudio (Anexo 6), donde el 65,7% de las personas mostraron disposición por sustituir medios de transporte motorizados por otras alternativas de menor impacto como la bicicleta, bajo el supuesto en que para todos los viajes se sustituye el vehículo particular por la bicicleta, se genera una disminución de 5.091,32 toneladas de CO2 al año. Aproximadamente 54 toneladas de CO2 por persona.

Es importante remarcar que lo mencionado anteriormente es exclusivamente para los trayectos menores a 35 seleccionados durante el desarrollo del proyecto, pero las disminuciones de CO2 utilizando los sistemas de alquiler de bicicletas para transportarse son mayores entre mayor sea el tiempo del viaje.

Impacto social

A pesar de que se dificulta realizar un análisis cuantitativo del impacto social del sistema, es posible identificar beneficios para la sociedad derivados de los sistemas de transporte no motorizados.

En ciudades como Bogotá, donde los vehículos motorizados son el principal medio de transporte, los beneficios sociales del uso de la bicicleta para transportarse están estrechamente ligados a la reducción de la contaminación ambiental. Actualmente, los jóvenes entre los 18 y 35 años tienen una alta conciencia ambiental y están dispuestos a cambiar sus hábitos con el fin de cuidar el planeta y aportar a la sociedad (Redacción Comercial, 2017). El acceso de la comunidad a sistemas de alquiler de bicicletas contribuye a esta tendencia ambientalista, brindando una alternativa eficiente para sustituir el vehículo particular, u otros medios de transporte motorizados, para transportarse diariamente.

Los sistemas de transporte sostenibles también tienen impacto en el gasto público. En 2015, los costos de la salud asociados a la degradación del medio ambiente en Colombia ascienden a \$20,7 billones de pesos. En Bogotá, el 10,5% (3.219) del total de las muertes que se presentan en la ciudad, son atribuidas a la contaminación del aire urbano, lo que generó costos estimados en \$4,2 billones de pesos, equivalentes al 2,5% del PIB de la ciudad. (Departamento Nacional de Planeación, 2017). Estos gastos que se podrían reducir con la reducción de los contaminantes del aire urbano, e invertir en proyectos alternativos de impacto social, ya sean de infraestructura, educación, entre otras.

A lo anterior hay que añadir los efectos negativos del sedentarismo, de acuerdo a la revista *The Lancet Health*, en 2018 más de 1.400 millones de adultos en el mundo presentan un mayor riesgo de contraer una enfermedad crónica por no hacer suficiente actividad física. El uso cotidiano de la bicicleta representa un ejercicio cardiovascular que mejorará la condición física de los usuarios.

Por otro lado, existen estudios que asocian diferentes efectos fisiológicos al uso cotidiano de la bicicleta. Se ha identificado que el transporte activo en la bicicleta, genera mayor satisfacción que los viajes en automóvil o medios de transporte masivo, al igual que beneficios en el estado de ánimo y la sensación de bienestar. (Sigal Kaplan, 2019).

El impacto social del uso de la bicicleta se relaciona también al cambio en la cultura de la sociedad que la rodea. “La TAP” (una de las teorías más utilizadas para comprender la elección del medio de transporte) demuestra que las personas toman decisiones que les garanticen un mayor beneficio con un menor costo y que muchas de las decisiones tomadas, se ven influenciadas por las percepciones de cómo actúan otras personas (Caballero, R., Franco, P., Mustaca, A., & Jakovcevic, A. ,2014), por lo que los casos de éxito de sistemas de bicicletas públicas en grandes ciudades del mundo, y el crecimiento de la movilidad en bicicleta (24%) que se ha evidenciado entre la Encuesta de Movilidad del 2011 y 2015, pueden ser un factor para la transformación de la cultura del transporte en Bogotá.

6. Conclusiones y recomendaciones

- La movilidad en bicicleta en Bogotá está en crecimiento, sumado a los proyectos actuales de la alcaldía para extensión de la red de ciclo rutas, en este estudio se encontró que en las personas del área de estudio existe alta la disposición, cerca del 67% de la muestra, de cambiar medios motorizados por una alternativa más sostenible y que presenta otras ventajas como ahorros en los tiempos de viaje, disminución en el gasto diario en transporte, entre otras. Cabe resaltar que el estudio sólo evaluó la población de un área de la ciudad, para conocer el comportamiento y disposición en otros sectores se debe hacer extensivo el estudio a las otras zonas.
- Los sistemas de alquiler de bicicletas pueden ser rentables fijando precios similares a otros medios de transporte, sin embargo, el escenario ideal sería que funcionaran como un complemento al sistema de transporte masivo, sin que el transporte intermodal represente un costo adicional. Para mantener la viabilidad en términos financieros del proyecto, se podrían buscar fuentes de ingresos adicionales que no se tuvieron en cuenta en el análisis de este estudio, como publicidad en las bicicletas y estaciones, o ahorros indirectos en el gasto público en materia de salud y medio ambiente.
- La modelación del sistema de alquiler de bicicletas permite evaluar e identificar las necesidades de infraestructura en materia de ciclo rutas. En los resultados del proyecto destaca el caso del corredor de la Calle 163, donde se encontró el mayor flujo de usuarios del sistema dentro de la red, con 419 viajes, y no se tiene una ciclo ruta disponible. Para mitigar esto, existen alternativas como los carriles preferenciales para bici usuarios, pero a largo plazo, la implementación de un sistema de estas características debe ir de la mano con la ampliación de la red de ciclo rutas.
- Se debe considerar incorporar a los análisis de la metodología la capacidad de la red de ciclo rutas. Para esto se deben realizar estudios detallados sobre la infraestructura de la ciudad, que involucren las particularidades y comportamientos de los ciclistas locales.
- Es importante resaltar limitaciones de la metodología presentada. En primer lugar, se encontró que debido a la diferencia entre la cantidad de encuestas realizadas en la mañana y en la noche en la Encuesta de Movilidad, con la que se ajustó la distribución de la demanda del sistema por franja horaria, se tiene un comportamiento atípico en la cantidad de viajes en la franja de tiempo 5 (hora pico de la noche). Se tiene una disminución del 77% en la cantidad de viajes respecto a la franja 1 (hora pico de la mañana) y esto no se refleja en la realidad. Es importante para futuros estudios tener en cuenta estos factores cuando se utilicen fuentes de información secundaria, Por otro lado, la metodología pretende evaluar y seleccionar los mejores puntos para localizar centros de alquiler de bicicletas dentro de un área o sector. Si se desea utilizar el método para encontrar los mejores puntos a nivel ciudad, o con una cantidad muy alta de puntos candidatos, se necesitan estudios complementarios para la integración de los diferentes puntos seleccionados por sectores, de lo contrario el problema no se podrá solucionar con ciertos procedimientos establecidos, como la selección de los puntos a través de modelamiento matemático.
- El modelo matemático presenta la apertura de 17 estaciones para las cuales se cubre un total de 1701 viajes para el sector elegido, cubriendo así, un 15% de la demanda potencial inicial del problema. Cabe mencionar que el resultado del modelo puede verse afectado al momento de agregar o modificar otras restricciones asociadas al problema.

- En los sistemas de bicicletas compartidas es fundamental identificar y analizar el comportamiento de la demanda, con esto se logra adaptar el sistema a las necesidades de la ciudad y del usuario, ya que en esta variable radica su impacto en la movilidad, medio ambiente, y determina su éxito en términos financieros.
- Considerando los resultados del proyecto, se obtuvo un total 1701 viajes por día, esta cantidad viajes en transporte motorizado produce alrededor de 273,862 gramos de CO₂ al día, con el sistema de alquiler de bicicletas esta cifra puede reducirse a un aproximado de 30,000 gramos, reduciendo en un 89% la huella de carbono de los viajes.
- La construcción de centros de alquiler de bicicletas en puntos estratégicos de la ciudad, que faciliten el transporte de las personas, es un primer paso para la construcción de una cultura de movilidad más saludable sostenible. Por medio de estrategias y campañas informativas y de concientización. que vayan de la mano con el sistema, se puede reducir la cantidad de enfermedades respiratorias generadas por el sedentarismo y la mala calidad del aire.

7. Glosario

- TNM: Transporte no motorizado.
- TM: Transporte motorizado.
- ZAT: Zona de Análisis de Transporte.
- EDM: Encuesta De Movilidad.
- SIG: Sistema de Información Geográfica.
- TPC: Transporte Público Colectivo.
- PM₁₀: Agente contaminante entre 2.5 y 10 µm de diámetro.
- PM_{2.5}: Agente contaminante menor a 2.5 µm de diámetro.
- Macrolocalización: “La selección de la región o zona más adecuada, evaluando las regiones que preliminarmente presenten ciertos atractivos para la industria que se trate” (Ingeniería Industrial, 2017)
- Microlocalización: “La selección específica del sitio o terreno que se encuentra en la región que ha sido evaluada como la más conveniente” (Ingeniería Industrial, 2017)

8. Bibliografía

- Andrew Campbell, C. C. (2018). Factors influencing the choice of shared bicycles and shared electric bikes in Beijing.
- Ball, J. T. (2001). *PE Exam Depth Guide, Transportation Engineering*. United States: McGraw-Hill.
- Banks, J. H. (1998). *Introduction to Transportation Engineering*. San Diego State University: McGraw-Hill.
- Bogotá. (2012). *Régimen legal de Bogotá D.C.* Obtenido de Régimen legal de Bogotá D.C.: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=8634>
- Bogotá, A. d. (Diciembre de 2017). *Observatorio ambiental de bogotá*. Obtenido de <https://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=876&v=1>
- Bogotá, A. M. (Septiembre de 2018). *Catastro*. Obtenido de <https://www.catastrobogota.gov.co/es/node/1744>
- Boufous, S., de Rome, L., Senserrick, T., & Ivers, R. (2012). Risk factors for severe injury in cyclists involved in traffic crashes in Victoria, Australia. *Accident Analysis & Prevention*, 49, 404–409.
- BUSTOS, B. E. (2018). ALGORITMO CULTURAL PARA EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE CLUSTERS DE ESTACIONES DE SERVICIO DE BICICLETAS. 6-12.
- Campbell, A. C. (2016). Factors influencing the choice of shared bicycles and shared electric bikes in Beijing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 399-414.
- Chen, P., & Shen, Q. (2016). Built environment effects on cyclist injury severity in automobile-involved bicycle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 86, 239–246.
- Colombia, C. d. (2018). *Proyecto de Ley 165*. Bogotá: Congreso de Colombia.
- DeMaio, P. (2009). Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future. *Journal of Public Transportation*. 41-56.
- Departamento Nacional de Planeación. (2017). Obtenido de [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- Gándara, C. M. (2014). *Identificación de subcentros de empleo y comercio para la ciudad de Bogotá*.
- Girardotti, L. (2003). *Información para el planeamiento del transporte regional*. Facultad de Ingeniería UBA.
- group, P. (2019). *PTV group*. Obtenido de <http://vision-traffic.ptvgroup.com/es/productos/ptv-visum/>
- Hensher, K. J. (2001). *Handbook of Transport Systems and Traffic Control*. Oxford: Pergamon.

- Idrd.gov.co. (2018). Obtenido de Proyecto de inversión - Pedalea por Bogotá:
<http://idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/Pedalea%20por%20Bogota%CC%81.pdf>
- Ingenieria Industrial. (2017). Obtenido de Métodos de localización de planta:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/dise%C3%B1o-y-distribuci%C3%B3n-en-planta/m%C3%A9todos-de-localizaci%C3%B3n-de-planta/>
- INYPESA, C. e. (2017). Obtenido de ENCUESTAS DE PREFERENCIAS DECLARADAS Y PREFERENCIAS REVELADAS: [ftp://ftp.ani.gov.co/Estudios Cordoba y Sucre/Capítulo_i_Estudio_de Tráfico_y Demanda/Anexo_1.5_ Encuestas_de preferencia declarada/ Encuestas_Modelos.pdf](ftp://ftp.ani.gov.co/Estudios%20Cordoba%20y%20Sucre/Capitulo_i_Estudio_de_Trafico_y_Demanda/Anexo_1.5_Encuestas_de_preferencia_declarada/Encuestas_Modelos.pdf)
- Jia Shu, M. C. (2010). Bicycle- sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution.
- JurisCol. (21 de Octubre de 2016). *Sistema Único de Información Normativa*. Obtenido de <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30027024>
- maps, G. (Mayo de 2019). *Bike sharing world map*. Obtenido de https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?ie=UTF8&hl=en&om=1&msa=0&ll=14.944784841702957%2C-42.890625&spn=143.80149%2C154.6875&z=1&source=embed&mid=1UxYw9YrwT_R3SGsktJU3D-2GpMU
- Ministerio de Cultura. (Diciembre de 2017). Obtenido de http://www.mincultura.gov.co/ministerio/oficinas-y-grupos/oficina%20asesora%20de%20planeacion/Sistema%20de%20gestion%20de%20la%20calidad/SiteAssets/Paginas/2009-08-11_25877/Informe%20huella%20de%20carbono%202017.pdf
- Movilidad, S. (2017). *Secretaria de movilidad*. Obtenido de <https://www.movilidadbogota.gov.co/web/>
- Movilidad, S. D. (2017). Observatorio de movilidad de Bogotá.
- Movilidad, S. D. (2018). *Movilidad Bogotá*. Obtenido de Bogotá estrena Bici Móvil, el nuevo espacio de parqueaderos para bicicletas: <http://www.movilidadbogota.gov.co/web/node/2231>
- Organización Mundial de la Salud. (2019). Obtenido de https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/
- Pinzón, H. R. (Diciembre de 2011). *Sistema de Bicicletas públicas de Bogotá: Bicibog*. Obtenido de Bicibog.
- Ponnuswamy, D. J. (2012). *Urban Transportation: Planning, Operation and Management*. India: McGraw Hill Education.
- Project Management Institute, I. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos*. Newtown Square, Pensilvania: Project Management Institute, Inc.
- Puerto, P. A. (2015). *DESARROLLO ORIENTADO AL TRANSPORTE SOSTENIBLE EN BOGOTÁ La influencia de la localización de los usos del suelo en los patrones de*. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/101380/123BCN_HENDEZPEDRO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Puerto, P. H. (s.f.). *DESARROLLO ORIENTADO AL TRANSPORTE SOSTENIBLE EN BOGOTÁ*. Obtenido de La influencia de la localización de los usos del suelo en los patrones de movilidad como estrategia de adaptación al cambio climático: <https://upcommons.upc.edu>
- República, C. d. (2018). Proyecto de Ley 165 de 2018. Obtenido de <http://leyes.senado.gov.co/proyectos/images/documentos/Textos%20Radicados/proyectos%20de%20ley/2018%20-%202019/PL%20165-18%20Formalizacion%20de%20Tierras.pdf>
- Ribeiro, I. F. (2014). Bicycle sharing systems demand.
- Rojas, J. C. (2013). Obtenido de IMPLEMENTACIÓN DE LA BICICLETA EN BOGOTÁ COMO UN MODELO DE TRANSPORTE EFICAZ, SALUDABLE, SUSTENTABLE E INTEGRAL: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/18089/CortesRojasJulianAndres2013.pdf?sequence=1>
- Sánchez, M. L. (Febrero de 2012). Localización óptima de bases de bicicletas públicas en Madrid mediante los sistemas de información geográfica.
- Sanchez, N. M. (19 de Octubre de 2018). Obtenido de La bicicleta va a buen ritmo, bici-indicadores de Bogotá: <http://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/dinamica-economica-y-distribucion/la-bicicleta-va-buen-ritmo-bici-indicadores-de-bogota>
- Sigal Kaplan, D. W. (2019). Psychosocial benefits and positive mood related to habitual bicycle use. *Elsevier*.
- Willumsen, J. d. (2011). *Modelling Transport*, 4th edition.
- Yang, J.-R. L.-H. (2011). *Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. Transportation research. Part D*.