



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA TARIFICACIÓN ÓPTIMA DE LOS SISTEMAS
DE BICICLETAS COMPARTIDAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

ANDRÉ LATOURNERIE LAMBERTINI

PROFESOR GUÍA:
SERGIO JARA DÍAZ
PROFESOR CO-GUÍA:
ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

COMISIÓN:
ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por proyecto Fondecyt 1160410

SANTIAGO DE CHILE
2019

METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA TARIFICACIÓN ÓPTIMA DE LOS SISTEMAS DE BICICLETAS COMPARTIDAS

Los Sistemas de Bicicletas Compartidas (SBC) han crecido enormemente en la última década. Buena parte de ellos es financiada por agencias de transporte público o mediante recursos públicos, provistos directamente o indirectamente a través de alianzas público-privadas basadas en la cesión de derechos de publicidad (Midgley, 2009). Estos tipos de subsidios apuntan a la necesidad de generar un transporte urbano sustentable. El objetivo de este trabajo de título es describir y modelar los SBC para identificar los elementos que contribuyen al cálculo de tarifas (y potencialmente subsidios) óptimas.

El diseño de los SBC comprende la localización y número de estaciones, el número de sitios y el número de bicicletas. Estos elementos encierran un compromiso entre los costos del operador (inversión y operación) y el de los usuarios (tiempos de acceso, espera y desplazamientos), ya que una mayor cantidad de estaciones, sitios y/o bicicletas significan menores tiempos de acceso-egreso y menores tiempos de espera, los que también disminuyen con las actividades de reposicionamiento, considerada como uno de los mayores costos operacionales en los SBC (Schuijbroek, Hampshire y Van Hoeve, 2017). La relación entre diseño (óptimo) y tarifas no ha sido estudiada en la literatura; los modelos matemáticos existentes apuntan a optimizar en detalle la operación de los SBC a partir de las matrices de viajes en bicicletas y las características de la red urbana considerando variados objetivos: max ganancias, min costo social o min costo de reposición (Sayarshad, Tavassoli y Zhao, 2012; Lin y Yang, 2011; García-Palomares, Gutiérrez y Latorre, 2012; Raviv, Tzur y Forma, 2013). El enfoque que aquí usamos replica el utilizado en Transporte Público al optimizar las variables de diseño minimizando la suma de los costos de operadores y usuarios, obteniendo la función de costos sociales para calcular a partir de ella tarifas y subsidios óptimos.

La descripción de los SBC utiliza información de diversas fuentes que muestran la evolución de los viajes y de las características de los sistemas de nueve ciudades. Se muestra que el número de estaciones, bicicletas, sitios y bicicletas reposicionadas aumentan linealmente con el número de viajes; mientras que la densidad de las estaciones y el número de bicicletas y sitios por estación se mantienen constantes.

Se proponen y desarrollan dos modelos que describen un SBC de una ciudad plana con demanda uniforme. El primero considera únicamente el compromiso entre el tiempo de acceso-egreso y el número de estaciones, imponiendo un *steady-state* equilibrado (disponibilidad de vehículos y sitios), con tiempos de espera nulos y sin necesidad de reposicionar bicicletas, las que son constantemente utilizadas. El número óptimo de estaciones y el espaciamiento óptimo entre estaciones se comportan de manera similar a los valores empíricos de los SBC estudiados. A partir del diseño óptimo se obtienen también las tarifas y subsidios óptimos. El segundo modelo introduce reposicionamiento y tiempos de espera de los usuarios en las estaciones. Se obtienen resultados numéricos de las variables de diseño del segundo modelo junto a precios y subsidios.

*Voor de fietsers
en de wielrenners.*

*Quiero agradecer a mi familia,
quien me apoyó y contuvo con amor,
preocupación, espacio y tiempo.*

*Agradezco profundamente a mis compañeros del quinto piso,
quienes desinteresadamente me ayudaron a resolver mis dudas,
desde la más insignificante, hasta la que cuestionaba todo el trabajo.
Sin duda fueron un gran apoyo.*

*A Lake Sagaris,
quien por casualidades de la vida tuvo de profesora y me logró
encantar con los temas de ciclo-inclusión y los procesos de participación ciudadana.
Mi interés en los temas relacionados con el ciclismo urbano nacieron gracias a su motivación.
Mis más profundos agradecimientos.*

*A mis profesores guía y co-guía.
Agradezco la paciencia, la tolerancia y la motivación
que me otorgaron aún en los días más difíciles.*

*A todos ellos.
Un millón de gracias.*

Tabla de contenido

1. Introducción	1
2. Antecedentes sobre los SBC: descripción, modelación y manejo de datos	7
2.1. Descripción	7
2.1.1. Funcionamiento de los SBC	7
2.1.2. Modelo de negocios y proveedores de los SBC	7
2.1.3. El problema del reposicionamiento de las bicicletas	8
2.1.4. Características de los SBC	9
2.2. Experiencias de modelación	11
2.2.1. Localización y tamaño óptimos de las estaciones	11
2.2.2. Localización de las estaciones con modelo de partición modal auto-bici	11
2.2.3. Localización de estaciones y número de bicicletas con demanda estocástica	12
2.2.4. Modelación del reposicionamiento	12
2.3. Manejo de datos de los SBC	13
3. Descripción del Crecimiento de los SBC	15
3.1. Recopilación de datos	15
3.1.1. Datos referentes al uso	15
3.1.2. Datos referentes al estado instantáneo	16
3.1.3. Otros datos	16
3.2. Metodología, limpieza y orden de los datos	17
3.2.1. Número de viajes, estaciones, bicicletas, sitios y bicicletas reposicionadas	17
3.2.2. Características espaciales de los SBC	17
3.3. Resultados	19
3.3.1. Número de viajes, estaciones, bicicletas, sitios y bicicletas reposicionadas	19
3.3.2. Características espaciales de los SBC	21
3.3.3. Evolución de los SBC	25
4. Formulación de los modelos	28
4.1. Entendiendo el problema: costo de los usuarios y del operador	29
4.2. M1: modelo estructural sin reposicionamiento	29
4.3. M2: modelo estructural con reposicionamiento	34
4.3.1. Formas funcionales de los tiempos de espera	36
4.4. Síntesis de la formulación	37

5. Aplicación de los modelos	39
5.1. Parámetros	39
5.1.1. Cálculo de los parámetros del tiempo de espera	40
5.2. Variables de diseño óptimas	41
5.2.1. Espaciamiento y número de estaciones óptimos (M1 y M2)	41
5.2.2. Número de sitios, bicicletas y bicicletas reposicionadas óptimos (M2)	42
5.3. Subsidios y tarifas óptimas	43
5.4. Sensibilidad bicicletas reposicionadas versus costo de las bicicletas	44
6. Discusión y extensión de los modelos	47
6.1. Los SBC de cuarta generación	48
6.2. Bicicletas asistidas eléctricamente	49
7. Conclusiones	51
Bibliografía	53

1. Introducción

El rápido crecimiento de los Sistemas de Bicicletas Compartidas (SBC, también conocidos como Programas de Bicicletas Compartidas) se puede explicar por la confluencia de la necesidad de reenfocar las políticas de transporte urbano hacia un transporte sustentable, junto con una mayor disponibilidad y asequibilidad de la tecnología que utilizan estos sistemas (Fishman, 2016). Existen dos tipos de configuraciones de sistemas de bicicletas públicas que se han masificado en los últimos años: el modelo basado en estaciones donde las bicicletas son arrendadas de un sitio (o *rack*) en una determinada estación y son devueltas en la misma o en otra estación; y el modelo sin estaciones (*dockless* o *stationless*) donde las bicicletas se obtienen de la vía pública, donde hayan sido dejadas por los anteriores usuarios (O'Brien, Cheshire y Batty, 2014).

En la literatura se identifican cuatro generaciones de SBC (Shaheen, Guzman y Zhang, 2010; Fishman, Washington y Haworth, 2013; Fishman, 2016). La primera data de 1965 cuando en Ámsterdam, Países Bajos, se inició el Plan de Bicicletas Blancas, el cual consistía en dejar bicicletas reconocibles, pero no aseguradas, a libre disposición en las calles para los usuarios. Estas fueron rápidamente vandalizadas o robadas. Sistemas similares fueron replicados en La Rochelle, Francia, en 1974 y en Cambridge, Inglaterra, en 1993. El primero resultó exitoso debido al fuerte apoyo de la comunidad, mientras que el segundo resultó en el robo de las 300 bicicletas comprendidas en el programa (Shaheen et al., 2010). En 1994, en Portland Oregon, se lanzó el primer programa de bicicletas compartidas en Estados Unidos, seguido al año siguiente por Boulder Colorado. El primero operado por una fundación sin fines de lucro (*United Community Action Network*) mientras que el segundo por el Departamento de Gestión de Transporte de la ciudad.

La segunda generación de los sistemas de bicicletas compartidas, basado en el depósito de una moneda para retirar una bicicleta, nació en 1995 en Copenhage, Dinamarca. Este programa consistía en 1100 bicicletas especialmente diseñadas para ser liberadas de estaciones desplegadas en la ciudad con el depósito de una moneda de 20 coronas danesas. Este tipo de programa fue replicado en ciudades como Sandnes, Noruega (1996); Minneapolis y St. Paul, Estados Unidos (1996); Helsinki, Finlandia (2000); Arhus, Dinamarca (2005); entre otras. Estos sistemas se caracterizan por tener bicicletas distinguibles de un color o diseño especial, estaciones designadas en las cuales las bicicletas deben ser guardadas, prestadas y devueltas; y depósitos pequeños de una moneda para liberarlas. El principal problema de este tipo de programas resulta ser que no tiene un límite de tiempo en el uso, por lo que las bicicletas son usadas por largos periodos o simplemente no son devueltas. Por estos motivos, la mayoría de estos programas fueron cancelados o actualizados a la generación siguiente.

La tercera generación de estos sistemas se caracteriza por usar tecnología para identificar a los usuarios y de esta manera disuadir el robo e incentivar el retorno de las bicicletas a las estaciones. El primer programa data de 1998, operado por la empresa de publicidad Clear Channel en Rennes, Francia. *Vélo à la Carte* permitía a los usuarios acceder a una bicicleta de manera gratuita por hasta 3 horas mediante el uso de una tarjeta inteligente. En mayo de 2009 este sistema fue reemplazado por *LE vélo STAR*, el cual opera actualmente 900 bicicletas y 83 estaciones¹. El programa que popularizó y permitió la masificación de los sistemas de bicicletas compartidas fue *Vélo'v* en Lyon, Francia, operado por otra empresa de publicidad, JCDecaux (Shaheen et al., 2010). Inició en 2005 con 1500 bicicletas y actualmente opera 4000 bicicletas en 348 estaciones².

¹ *Présentation des stations*. LE vélo STAR. <https://www.levelostar.fr/fr/stations/presentation.html>. Último acceso 30 enero, 2018.

² *Mode d'emploi*. Vélo'v. <https://velov.grandlyon.com/fr/mode-demploi.html>. Último acceso 30 enero, 2018.

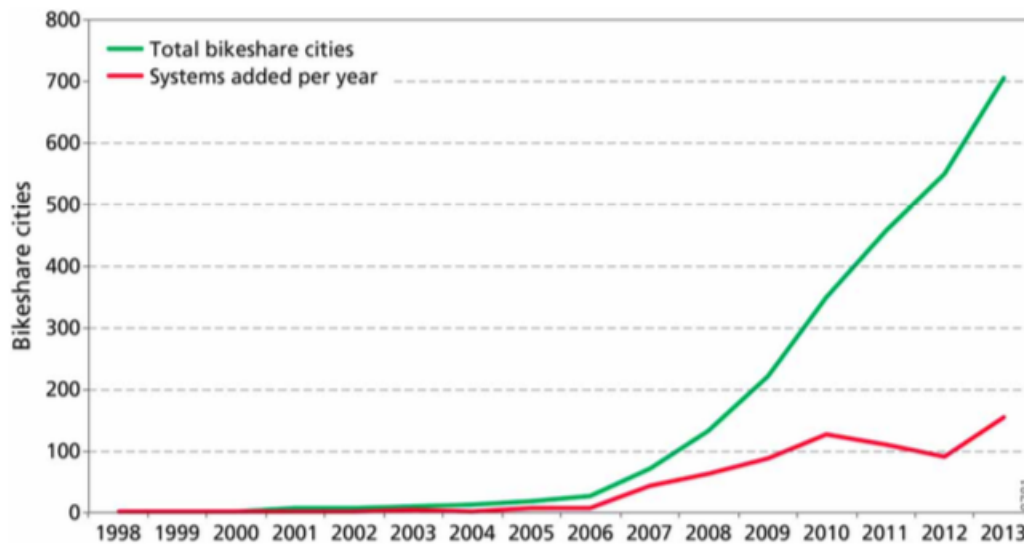


Figura 1: Crecimiento de las ciudades con programas de bicicletas compartidas (1998-2013).

Fuente: Fishman (2016).

A partir de la mitad de la década pasada, los sistemas de bicicletas compartidas se popularizaron y replicaron exponencialmente, principalmente en Europa, Asia y Estados Unidos, y en menor medida en Sudamérica y Oceanía, como muestran las Figuras (1) y (2). Actualmente a nivel mundial existen 1950 programas en operación y 383 ciudades planificando o construyendo nuevos sistemas³. En Chile, el primer sistema de bicicletas compartidas nació en 2008 en la comuna de Providencia, con 150 bicicletas y 15 estaciones, el cual era operado manualmente por personas en cada estación quienes entregaban y recibían las bicicletas de los usuarios inscritos.

El problema de la capacidad limitada de las estaciones motivó el surgimiento de los sistemas de cuarta generación, los llamados sistemas sin estaciones. En estos, cada bicicleta cuenta con su propio sistema de anclaje, lo que dificulta su robo; y GPS, lo que permite que mediante el uso de aplicaciones móviles los usuarios las encuentren y desbloqueen. Incluso algunos sistemas permiten la reserva de bicicletas por un periodo corto de tiempo lo que facilita encontrarlas (Gu, Kim y Currie, 2019). Estos sistemas son altamente flexibles y de rápido crecimiento, pues no necesitan la instalación de estaciones. En China, lugar donde nacieron, el número de bicicletas sin estaciones creció desde los 2 millones en 2016 hasta los 23 millones en 2017; superando el tamaño de flota de los sistemas de tercera generación, los cuales llevaban más de 10 años siendo desarrollados en el país (Gu et al., 2019).

Algunos autores vaticinan que el desarrollo de los SBC sin estaciones permitirá incorporar bicicletas con asistencia eléctrica e integrarlas mediante el pago con tarjetas de transporte público (Fishman, 2016). El SBC de tercera generación de la ciudad de *La Rochelle* integró exitosamente como medio de pago la tarjeta inteligente del transporte público (Midgley, 2009).

En marzo de 2018, fue lanzado *Mobike* (SBC de cuarta generación) en las comunas de La Reina y Las Condes en la ciudad de Santiago de Chile. Su plan, inicialmente contemplaba más de 2000

³ *In Operation*. The Bike Sharing World Map. www.bikesharingmap.com. Último acceso 1 marzo, 2019.
This map shows self-service automated, advanced automated and mixed automated/manned public use bike-sharing services offering A to B transportation.

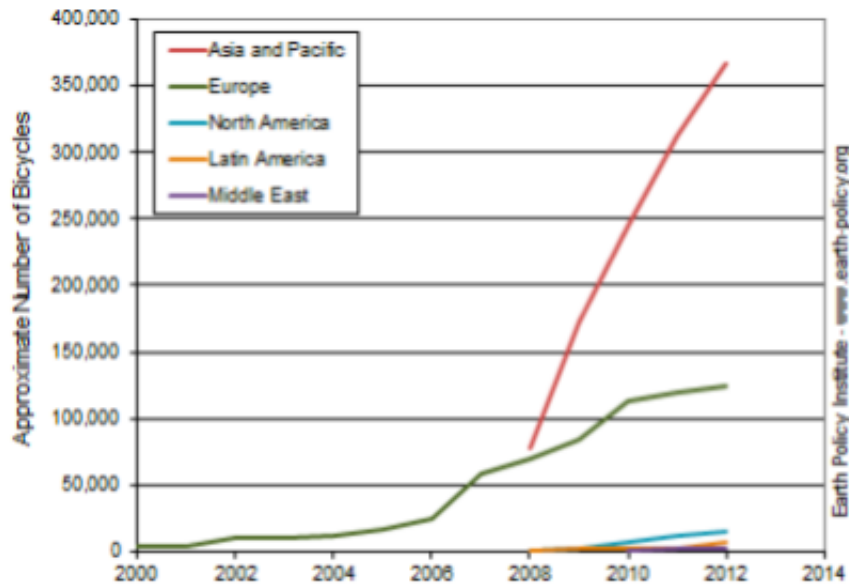


Figura 2: Número de bicicletas compartidas por región (2000-2012).

Fuente: Larsen (2013).

bicicletas. En la ciudad de Santiago, actualmente coexisten tres sistemas de bicicletas compartidas. *BikeSantiago* y *Bici Las Condes* corresponden a sistemas de tercera generación, mientras que *Mobike*, a la cuarta. La Tabla (1) muestra las características de dichos sistemas.

Tabla 1: Características de los Sistemas de Bicicletas Compartidas de Santiago.

Características	<i>BikeSantiago</i>	<i>Bici Las Condes</i>	<i>Mobike</i>
Generación del sistema	3era	3era	4ta
Comunas servidas	14	1	7
Número de estaciones	350	99	-
Número de bicicletas	3500	990	+2000

Fuente: Mobike (2019), BiciLasCondes (2019) y BikeSantiago (2019).

En los últimos años la bicicleta ha adquirido mayor popularidad en Chile, ha dejado de ser vista como un medio de transporte para personas de escasos recursos o como un vehículo netamente deportivo o recreativo. Esto se ve reflejado en el fuerte incremento en el uso que ha tenido en las ciudades junto al mayor interés en este modo por parte de las autoridades. Cada vez son más las personas que la utilizan como medio de transporte diario. En Santiago, el uso de la bicicleta tuvo una tasa de crecimiento anual del 6,8% entre los años 2001 y 2012, alcanzando los 747 mil viajes diarios, los que representan un 4% de los viajes totales realizados en un día laboral normal (MTT, 2019).

El ciclismo ofrece ciertas ventajas sobre otros modos de transporte: requiere menos instalaciones, puede llegar a destinos con bajo nivel de acceso y una bicicleta es relativamente barata de comprar y mantener (Zhang, Zhang, Duan y Bryde, 2015). Fishman et al. (2013) resumen los beneficios de los sistemas de bicicletas compartidas en seis: aumento de la flexibilidad en relación a la movilidad;

reducción de emisiones; beneficios a la salud producto de la actividad física; reducción de la congestión y del uso de gasolina; ahorros individuales; y mayor conexión multimodal.

Los beneficios del ciclismo a la salud han sido ampliamente estudiados. Oja et al. (2011) resumen los hallazgos de 16 estudios, de los cuales catorce muestran beneficios en la salud individual de los ciclistas. Existe una relación inversa entre el uso de la bicicleta como medio de transporte diario y la mortalidad producto de cáncer, obesidad y enfermedades coronarias. Los autores concluyen que la evidencia existente sugiere reforzar los esfuerzos para promover el ciclismo como un importante contribuyente al mejoramiento de la salud de la población. Los beneficios a la salud producto de los SBC han sido menos estudiados. Woodcock, Tainio, Cheshire, O'Brien y Goodman (2014) indican que los beneficios producto de la actividad física de los viajes de los usuarios del SBC de Londres son sustancialmente mayores que los riesgos producto a la exposición a la contaminación y a los accidentes. Otero, Nieuwenhuijsen y Rojas-Rueda (2018) concluyen de la misma manera para los doce SBC más grandes de Europa, los cuales difieren en el nivel de sustitución auto-bici, contaminación y accidentabilidad. Este estudio incorpora el uso de bicicletas eléctricas en los SBC, las cuales aportan menos beneficios a la salud que las regulares.

Son todos estos beneficios, junto con el mayor interés de las agencias de transporte y la disponibilidad tecnológica, los que han provocado un explosivo aumento del número de SBC a nivel mundial. En Santiago, el parque de bicicletas públicas se habría duplicado en 2018.⁴

En noviembre de 2016 *BikeSantiago*, empresa operadora del sistema de bicicletas compartidas de la capital, solicitó un subsidio al Gobierno Regional Metropolitano (GORE) para ampliar su red a 500 estaciones, 7.500 vehículos y pasar de servir 14 comunas a 24. Este proyecto contemplaba realizar una alianza público-privada, en que el estado aportaba un 50 % del monto (US\$25 millones) y el resto el *sponsor*.⁵

De acuerdo a Midgley (2009), la mayoría de los esquemas de bicicletas públicas necesitan ser respaldados financieramente por agencias de transporte público o mediante recursos públicos, ya sea con financiamiento directo o indirectamente a través de alianzas público-privadas. Los Sistemas de Bicicletas Compartidas en China han sido fuertemente subsidiados por los gobiernos municipales de manera de fomentar el transporte no motorizado y ofrecer opciones de movilidad flexibles, convenientes y de bajo costo (Lohry y Yiu, 2015). En otros casos, se establece una alianza entre una compañía de publicidad y un gobierno local. La compañía recibe el derecho a usar el espacio público para publicitar a cambio de la implementación y operación del sistema de bicicletas compartidas, tal como en el caso de los sistemas operados por *Clear Channel* y *JCDecaux*. El sistema de la ciudad de Barcelona en cambio, se financia en parte con ingresos de los estacionamientos públicos de automóviles (Midgley, 2009).

Las alianzas público-privadas se han formado o los subsidios indirectos han sido otorgados debido a la necesidad de reenfocar las políticas de transporte urbano hacia un transporte sustentable (Fishman, 2016). Hasta la fecha no existen artículos que analicen la necesidad de subsidiar los SBC. En transporte público, al minimizar la suma del costo de los operadores (inversión y operación) y de los usuarios (tiempos de acceso, espera y desplazamientos), se obtiene que la operación debe ser subsidiada como primer mejor (Basso y Jara-Díaz, 2010). Este resultado se debe principalmente al

⁴ *Parque de bicicletas públicas se duplicará durante 2018*. La Tercera. <http://www.latercera.com/tendencias/noticia/parque-bicicletas-publicas-se-duplicara-2018/75879/>. Último acceso 23 abril, 2018.

⁵ <http://www.latercera.com/noticia/rm-alta-demanda-bicicletas-publicas-obliga-congelar-inscripcion-socios/>. Último acceso 23 abril, 2018.

efecto *Mohring*: la existencia de economías de escala en los costos del tiempo de los usuarios. Jara-Díaz y Gschwender (2009) explican que, al considerar el costo social, la tarifa óptima se obtiene de la resta entre el costo marginal total y lo que los usuarios ya gastan con su tiempo. Como el costo promedio de los operadores es mayor que la tarifa resultante, entonces se justifica un subsidio óptimo que permita cubrir los gastos del operador.

La razón económica detrás de analizar la tarificación óptima de los SBC son los múltiples compromisos existentes entre los costos del operador, como son el número de estaciones, el número de bicicletas, el número de sitios y el número de bicicletas reposicionadas; y los costos de los usuarios, provenientes del tiempo que invierten en cada etapa de su viaje (tiempo de acceso a las estaciones de origen, tiempo de espera por una bicicleta en el origen, tiempo de desplazamiento en el vehículo, tiempo de espera por un sitio libre en la estación de destino y tiempo de egreso desde ella).

Dada un área con cierta matriz de viajes en bicicleta conocida, se debe decidir el número de estaciones del SBC y su localización. Esto determina el tiempo de acceso/egreso de los usuarios; más estaciones significa menores tiempos de caminata en los orígenes y destinos. El número de bicicletas del sistema influye en los tiempos de espera de los usuarios en las estaciones de origen; más bicicletas se traduce en una mayor facilidad para encontrar vehículos libres. Por otro lado, debido a que las bicicletas deben anclarse en sitios, una mayor cantidad de estos últimos se traduce en menores tiempos de espera en las estaciones de destino, pues es menos probable que se encuentren utilizados por otra bicicleta. Finalmente, el número de bicicletas que el operador mueve inteligentemente desde las estaciones más cargadas a las que necesitan, influye en los tiempos de espera de los usuarios; mientras más bicicletas se reposicionen, menores tiempos de espera en las estaciones de origen (ya que el operador agrega bicicletas) y menores tiempos de espera en las estaciones de destino (pues el operador libera sitios).

De esta manera, el objetivo principal de este trabajo de memoria de título es **modelar los Sistemas de Bicicletas Compartidas para identificar los elementos que contribuyen al cálculo de tarifas óptimas**. Para ello es necesario formular un modelo matemático que replique de manera adecuada el costo social del transporte de usuarios en los SBC de tercera generación, utilizando el enfoque usado en los modelos de diseño y tarificación óptima de buses de transporte público (Jansson, 1980; Jara-Díaz y Gschwender, 2003). Este trabajo no busca estimar la tarificación óptima de un sistema en particular.

La sección (2) es una revisión de los antecedentes encontrados en la literatura, que considera artículos que describen, modelan y utilizan datos sobre los SBC. Para modelar estos sistemas es necesario entender su crecimiento a medida que aumenta la demanda de usuarios. Usando el *software* de Sistemas de Información Geográfica *Q-GIS*; reportes operacionales; y datos, recopilados de diversas fuentes, acerca de las características y los viajes históricos de nueve SBC de tercera generación (Nueva York, Chicago, Minneapolis, Denver, Boston, Montreal, Washington DC, Londres y Ciudad de México); en la sección (3) se describe la evolución de los sistemas junto al crecimiento en densidad y extensión espacial en función de la demanda de usuarios. La sección (4) consta de la formulación de dos modelos: uno sin reposicionamiento en el cual todas las bicicletas son usadas permanentemente, y otro que incorpora el reposicionamiento de manera agregada; los que permiten describir un SBC bajo supuestos de homogeneidad de la demanda. La búsqueda de parámetros que alimenten el modelo es una tarea fundamental. Algunos se encuentran en la literatura de SBC, pero otros no han sido descritos. Se explican los supuestos utilizados para formar parámetros verosímiles en la sección (5), junto a la evaluación de los resultados del diseño y tarificación óptimos obtenidos de la formulación de los modelos de SBC de tercera generación. En la sección (6) se discuten los resultados junto con

indicar algunas modificaciones que deben incorporarse en la formulación para modelar los sistemas sin estaciones y se dan algunas razones que permiten creer que los sistemas de cuarta generación no van a superar por completo a los sistemas con estaciones. En la sección (7) se concluye.

2. Antecedentes sobre los SBC: descripción, modelación y manejo de datos

2.1. Descripción

2.1.1. Funcionamiento de los SBC

Los Sistemas de Bicicletas Compartidas de tercera generación constan de estaciones distribuidas en el área operacional del sistema. Cada estación cuenta con sitios de anclaje donde se liberan las bicicletas mediante el uso de una tarjeta inteligente. Existen sistemas como el de Nueva York y el de Londres, que permiten el uso de sus bicicletas a usuarios que realizan viajes espontáneos que no se encuentran suscritos al sistema, a través de estaciones inteligentes que permiten el pago de un único viaje mediante tarjeta de crédito. De esta manera la tecnología de las estaciones difiere entre sistemas. Algunas cuentan con tótems con pantallas y terminales bancarios, mientras otras, más simples, solo cuentan con el lector de las tarjetas de los usuarios miembros que liberan las bicicletas. Típicamente los SBC cuentan con aplicaciones móviles que permiten ver cuántas bicicletas y sitios existen en cada estación, de manera que los usuarios puedan planificar a qué estación ir a buscar una bicicleta y en cuál estación dejarla.

Las bicicletas de los sistemas de cuarta generación en cambio, poseen el sistema de anclaje integrado en el vehículo, lo que permite una distribución más uniforme en el área operacional. De esta manera, los usuarios pueden dejar la bicicleta en el mismo destino. Al iniciar el viaje, la cercanía entre el origen y una de estas bicicletas, depende de la distribución de los destinos de los viajes realizados anteriormente. La búsqueda de estas bicicletas se ve ayudado por la aplicación móvil del sistema que muestra la ubicación de cada bicicleta ya que cada vehículo cuenta con GPS. Los usuarios desbloquean estas bicicletas mediante la misma aplicación en sus teléfonos inteligentes y es responsabilidad de ellos trabar manualmente las bicicletas una vez en el destino para cerrar el viaje y evitar que sean usadas sin la identificación del siguiente usuario.

Existen diversas tarifas por el uso de los SBC. La mayoría de los sistemas de tercera generación funcionan con una suscripción mensual, semestral o anual que permite viajes ilimitados que tengan una duración menor a cierto tiempo límite (típicamente 30 minutos). En Chile *Mobike* cobra 399 pesos por viaje menor a 20 minutos a los usuarios no suscritos a un plan. La suscripción a planes mensuales, semestrales o anuales tienen distintos valores pero permiten viajes ilimitados de hasta 120 minutos.

Los SBC típicamente piden un depósito inicial o una tarjeta de crédito de manera de evitar el mal uso de las bicicletas y asegurar los vehículos. Algunos sistemas de cuarta generación no tan solo excluyen a los usuarios no bancarizados, sino también a quienes no utilizan teléfonos móviles, ya que mediante ellos se desbloquean las bicicletas.

2.1.2. Modelo de negocios y proveedores de los SBC

El éxito de la tercera generación de los sistemas de bicicletas compartidas ha aumentado el número de proveedores, vendedores, modelos de servicio y tecnologías. Los proveedores de estos servicios van desde gobiernos locales, agencias de transporte, compañías de publicidad, hasta organizaciones con y sin fines de lucro. Por otro lado, las fuentes de ingreso de estos sistemas típicamente son la pu-

blicidad, auto-financiamiento, tarifas de los usuarios, aportes municipales y alianzas público-privadas. La Tabla 2 caracteriza los tipos de proveedores de acuerdo a los tipos de modelos de negocios de bicicletas compartidas de tercera generación.

Tabla 2: Proveedores de Bicicletas Compartidas de tercera generación y Modelos de Negocios (Shaheen, Guzman y Zhang, 2010).

Proveedor	Modelo de Operación	Fuentes de Ingreso	Ejemplo
Compañías de publicidad	Proveer servicios de bicicletas compartidas a cambio de derechos publicitarios en mobiliario público y afiches.	- Anuncios en mobiliario público, afiches, bicicletas y estaciones. - Cobro a usuarios miembros y no miembros.	SmartBike (EEUU) Cyclocity (Francia)
Agencias públicas de transporte	Proveer servicios de bicicletas compartidas bajo la guía de autoridades públicas para mejorar el sistema de transporte público.	- Subsidios gubernamentales. - Cobro a usuarios miembros y no miembros. - Anuncios en bicicletas y en estaciones.	Hangzhou Public Bicycle (China) Call a Bike (Alemania)
Gobiernos locales y autoridades públicas	Diseñar y operar un programa de bicicletas compartidas o comprar el servicio que proveen privados.	- Fondos municipales. - Cobro a usuarios miembros y no miembros. - Anuncios en bicicletas y en estaciones.	City Bikes (Dinamarca) OV-fiets (Países Bajos) Nubija (Corea del Sur) YouBike (Taiwán) Shanghai Public Bicycle (China)
Con fines de lucro	Proveer servicios de bicicletas compartidas rentables con mínimo de inferencia del gobierno.	- Cobro a usuarios miembros y no miembros. - Anuncios en bicicletas y en estaciones.	Nextbike (Alemania)
Sin fines de lucro	Proveer servicios de bicicletas compartidas bajo el soporte de agencias públicas o consejos.	- Fondos de alianzas público-privadas. - Cobro a usuarios miembros y no miembros. - Préstamos bancarios. - Fondos locales.	BIXI (Canadá) Hourbike (UK) Bicincittà (Italia) Wuhan Public Bicycle (China)

En Chile, los tres sistemas existentes corresponden a compañías con fines de lucro. *Bici Las Condes*, provisto por la compañía de publicidad *Clear Channel*, obtiene sus ingresos a partir de la publicidad en estaciones y a la membresía de los usuarios. *BikeSantiago* obtiene sus ingresos de un único *sponsor* junto a la membresía de los usuarios inscritos. Mientras que los ingresos de *Mobike* proviene exclusivamente de las membresías de los usuarios inscritos y de las tarifas de los usuarios esporádicos.

2.1.3. El problema del reposicionamiento de las bicicletas

Con una gran cantidad de usuarios de bicicletas compartidas, las bicicletas inevitablemente se concentran en algunas áreas de la ciudad, mientras en otras, se vuelven difíciles de encontrar. El reposicionamiento involucra a que el operador mueva bicicletas dentro de la red y resulta clave en el éxito de los sistemas de bicicletas compartidas (Fishman et al., 2013).

Vogel y Mattfeld (2010) describen dos tipos de desbalance de la oferta: los continuos y los discretos. Los primeros se deben a un desequilibrio temporal-espacial recurrente en la demanda, debido a las diferencias en distribución de los viajes que están cargados en periodos del día o a viajes cargados en una sola dirección producto de condiciones geográficas dominantes como estaciones sobre un cerro, las cuales siempre tendrán más orígenes de viaje en bicicleta que destinos. Los desbalances discretos se producen por cambios repentinos y no recurrentes en la demanda, debido a una falla en otro modo de transporte, conciertos, partidos de fútbol o a cambios en las condiciones climáticas

como que empiece a llover. El monitoreo y la distribución de las bicicletas es importante a la hora de asegurar la calidad del servicio. De esta manera, el artículo distingue dos medidas de corto y mediano plazo para superar los problemas del balance de las bicicletas: distribución directa (activa) en mano de los operadores a través de actividades de reposicionamiento; y distribución indirecta (pasiva) en mano de los usuarios a través de precios o incentivos.

Tanto en los desbalances continuos como en los discretos, el operador debe realizar reposición directa y/o entregar incentivos económicos a los usuarios para que dejen las bicicletas en aquellas estaciones menos utilizadas.

El costo del reposicionamiento activo de cada bicicleta es de 3 dólares (Vogel y Mattfeld, 2010). Los incentivos dirigidos a los usuarios, en cambio, se enfocan en otorgar tiempo adicional para que dejen su bicicleta en ciertas estaciones poco utilizadas o cuando encuentran una estación llena (Vogel y Mattfeld, 2010).

El impacto de los incentivos dirigidos a los usuarios debe considerarse menor que la reposición activa, debido a que la acción de los consumidores no puede ser controlada en su totalidad. Tang, Pan y Shen (2011) sugieren ofrecer incentivos económicos a aquellos usuarios que anden en contra del flujo principal, de manera de que ayuden a distribuir bicicletas de mejor manera. Esta estrategia se emplea en el sistema de Washington D.C. a pesar de que su efectividad es limitada (Tech, 2012).

La redistribución directa es esencial para muchos de los sistemas, particularmente para aquellos que están dominados por flujos asimétricos a ciertas horas del día junto con otros usuarios requiriendo bicicletas en otros horarios, o para aquellos sistemas que son muy pequeños y demasiado populares para satisfacer la demanda (O'Brien et al., 2014).

De acuerdo a Schuijbroek et al. (2017), la actividad de reposicionamiento es considerada como un costo operacional mayor. Reconocer la causa que genera la necesidad de reposicionar las bicicletas es una tarea fundamental del operador, ya que le permite mejorar el diseño de las estaciones, optimizar la operación de su flota de camiones de reposición y anticiparse a cambios en la demanda. A medida que los sistemas de bicicletas compartidas crecen en popularidad, junto con el avance de la tecnología, sistemas responsivos a la demanda serán cada vez más requeridos (Fishman et al., 2013).

2.1.4. Características de los SBC

De acuerdo al estudio realizado por Zhao, Deng y Song (2014), las principales características de popularidad que describen los Sistemas de Bicicletas Compartidas son los viajes totales y la tasa de uso diaria de cada bicicleta. Los autores analizaron mediante regresiones de 69 sistemas chinos como dichas características se ven influenciadas en función de las características urbanas y características del sistema. El uso diario aumenta significativamente con la población urbana (31 usuarios por cada 10mil personas) y el número de estaciones (121 usuarios por cada estación). Por otro lado, el número de viajes diarios por cada bicicleta aumenta con el número de usuarios inscritos en los sistemas y con el número de estaciones.

Las bicicletas de los sistemas de Australia tienen una tasa de uso muy baja en comparación a la de otros países (0,3 y 0,4 viajes por día por bicicleta en Melbourne y Brisbane en comparación a 4 viajes por día por bicicleta en París). Esto se debe principalmente a los problemas de accesibilidad y espontaneidad de los viajes debido a la obligación de usar casco, el cierre nocturno del sistema y a la obligatoriedad de pagar con tarjetas de crédito en los SBC de Australia (Fishman et al., 2013). De acuerdo a Lohry y Yiu (2015), los SBC operados por gobiernos locales son más efectivos que los

operados a través de alianzas público-privadas; en términos de viajes totales, tasa de uso diario de las bicicletas y población servida.

En el sistema de Brisbane, Australia, la mayor barrera para el uso del SBC es el temor a los accidentes. Esto a pesar de que los motoristas son más cuidadosos con los ciclistas que utilizan bicicletas públicas que con quienes manejan bicicletas privadas y con que los sistemas con más de mil bicicletas tienen en promedio apenas 4,3 accidentes por año (Fishman et al., 2013).

De acuerdo a Heymes y Levinson (2018), los SBC de cuarta generación no están exentos a los problemas de vandalismo, robo y mal uso que tuvieron las primeras dos generaciones de bicicletas compartidas. Estos factores junto al poco uso de las bicicletas, la obligatoriedad del uso de casco y las altas multas a las infracciones de los ciclistas explican la salida de *Ofo* y *Reddy Go* de Sídney y la salida de *OBike* de Melbourne.

El tamaño de los sistemas pueden expresarse de acuerdo al número de estaciones, el número de puntos de anclaje o al número de bicicletas disponibles para usar en el sistema. De acuerdo al estudio realizado por O'Brien et al. (2014), los sistemas asiáticos analizados tienen un tamaño de estaciones mayor que el promedio. Esto les permite responder de mejor manera a flujos asimétricos y concentrados en ciertas áreas. De acuerdo a Zhang et al. (2015), en las grandes ciudades chinas como Beijing, Shanghai y Guangzhou, el tiempo promedio de viaje en bicicleta de los SBC es de 42 minutos, el más largo en el mundo. En ciudades medias como Zhuzhou el viaje típico dura aproximadamente media hora.

Otra característica agregada analizada por O'Brien et al. (2014) es la proporción de sitios de anclaje que se encuentran con bicicletas en el momento de mayor disponibilidad de bicicletas. Esta medida se conoce como el factor de carga máximo (NAB, por sus siglas en inglés), el cuál varía entre el 30 y el 65 % en los SBC analizados por (O'Brien et al., 2014). Almannaa, Elhenawy y Rakha (2019) imponen que el factor de carga máximo esté entre el 25 y el 75 % para encontrar las condiciones iniciales de una estación que maximiza la probabilidad de que esta no se quede sin bicicletas o que por el contrario, se llene. Las tarifas a los usuarios por uso de tiempo significan que el encontrar una estación llena al querer dejar una bicicleta al final de un viaje es una situación peor que no encontrar una bicicleta al principio del viaje. Es por esta razón que los operadores deben especificar el factor de carga máximo con cuidado.

La última característica agregada analizada por O'Brien et al. (2014) es el máximo uso simultáneo diario. Esta es una medida de popularidad del sistema que se calcula viendo el máximo cambio diario del número de bicicletas disponibles. Los sistemas menos populares pueden usar un factor de carga máximo mayor, de manera de que las bicicletas se encuentren disponibles para el uso inmediato en la mayoría de las estaciones y para atraer a nuevos usuarios. Los programas más populares en cambio disminuyen su factor de carga máximo para que funcionen de manera más eficiente en períodos de mayor uso simultáneo, en particular en sistemas con un gran número de viajes unidireccionales. Sistemas populares con una gran proporción de usuarios turistas, pueden trabajar eficientemente con un factor de carga máximo mayor debido a la menor proporción de viajes unidireccionales y a la naturaleza aleatoria del movimiento de las bicicletas.

Dentro de las características espaciales analizadas en el artículo de O'Brien et al. (2014) se encuentran el área de influencia de los sistemas, la distancia promedio entre estaciones, el *compactness ratio* (que describe que tan parecido a un círculo es cada sistema) y el *Z-score* (que indica la distribución de las estaciones en el área de cobertura). El área de los 38 sistemas analizados varían considerablemente desde 20 km² (Dublín) hasta los 200 km² (París), con un importante grupo al-

rededor de los 50 km². Por otro lado, el 50 % de los sistemas tienen una distancia promedio entre estaciones entre 300–400 m. Los programas asiáticos, en general, cubren comunidades distantes bajo un mismo sistema, mientras que en las ciudades europeas los sistemas se concentran en el núcleo de la ciudad. Los programas de Europa y Medio Oriente tienen un espaciamiento de las estaciones más regular que los programas asiáticos.

Mediante el cálculo del factor de carga (número total de bicicletas disponibles dividido el número total de puntos de anclajes, para cada instante) O'Brien et al. (2014) caracterizaron a los sistemas de acuerdo al patrón dominante de su uso. La mayoría presenta dos períodos diarios de mayor uso los días de semana y un *peak* de uso intensivo después del mediodía durante los fines de semana.

Fishman et al. (2013) realizaron una síntesis de la literatura sobre los SBC. Los autores indican que los sistemas aumentan entre un 1 y 1.5 % la participación del modo bicicleta en aquellas ciudades con un bajo porcentaje de ciclistas. Por otro lado, la mayor cantidad de usuarios de este sistema vienen de modos de transporte sustentables como la caminata (66 % en Dublín) y el transporte público (50 % en Lyon), y muy pocos del automóvil particular (1 % en Londres). A pesar de esto último, la posesión de automóvil no reduce el uso de las bicicletas compartidas, los usuarios de los SBC tienen una mayor tasa de motorización que la población general. Desde el punto de vista demográfico, los usuarios de estos sistemas tienden a ser hombres jóvenes, con altos niveles de educación y mayores tasas de empleo. Fishman et al. (2013) explican que esto se debe en parte a que las estaciones se localizan en los sectores de mayores ingresos.

En relación a la intermodalidad, en Dublín el 55 % de los usuarios del sistema de bicicletas compartidas integra el viaje con otro modo donde la caminata de más de 500m representa el 42 % de estos. En Beijing y Shanghái, el 58 y el 55 % de los usuarios combina su viaje con el metro, mientras que en Londres, el 35 % de los usuarios de los SBC sustituyeron al tren subterráneo. Fishman et al. (2013) señalan que esto se debe a las ineficiencias producto de los múltiples transbordos. Otros estudios muestran que usuarios de bicicletas privadas se cambian a estos sistemas debido a los problemas que significa encontrar un estacionamiento seguro.

2.2. Experiencias de modelación

2.2.1. Localización y tamaño óptimos de las estaciones

En la literatura es común encontrar recomendaciones generales para localizar las estaciones de las bicicletas, como maximizar la cobertura de la red, localizándolas en áreas de alta densidad, cerca del CBD y de las estaciones de los trenes de cercanía o del metro. El artículo de García-Palomares et al. (2012) utiliza un enfoque detallado basado en Sistemas de Información Geográfica, que contiene los datos de la red de transporte de Madrid (incluyendo las pendientes y las velocidades de las bicicletas por arco), la población y el número de trabajos por edificio, la demanda de viajes y las estaciones y paradas del transporte público. Con ello, proponen un método para localizar óptimamente las estaciones y determinar la capacidad de estas.

2.2.2. Localización de las estaciones con modelo de partición modal auto-bici

Romero, Ibeas, Moura, Benavente y Alonso (2012) presentan una metodología para modelar simultáneamente el uso del automóvil particular y las bicicletas públicas, a través de un modelo de

partición modal y el cálculo de la asignación de los viajes de cada modo en la red de transporte. Con ello los autores optimizan la localización de las estaciones del SBC de manera de lograr un sistema de transporte tan eficiente y sostenible como sea económica y socialmente posible.

2.2.3. Localización de estaciones y número de bicicletas con demanda estocástica

Lin y Yang (2011) diseñan un modelo estratégico de un SBC considerando el costo social. Esta es una formulación detallada en la que se conoce la demanda estocástica de viajes, los cuales son en un único sentido. De esta manera, las estaciones se ubican en el espacio minimizando el tiempo de caminata de los usuarios en el origen y en el destino, como también el tiempo de viaje en bicicleta, el cual depende de la ubicación de las estaciones. Además del costo de las estaciones, el modelo incluye la construcción de ciclovías entre estaciones. Se considera que cada estación de origen debe tener las suficientes bicicletas para aumentar la posibilidad de que los usuarios puedan realizar su viaje. De esta manera se considera un costo de penalización por demanda no satisfecha que puede deberse a un número insuficiente de bicicletas o a una distancia muy grande entre los orígenes/destinos y las estaciones.

2.2.4. Modelación del reposicionamiento

En relación a la modelación del problema de reposicionamiento de las bicicletas de los SBC, la literatura se ha centrado principalmente en minimizar este costo mediante la optimización del número de bicicletas a mover, solucionar el problema del enrutamiento de la flota de camiones encargado de moverlas o determinar el número de bicicletas que deben tener las estaciones al comienzo de la operación.

El modelo matemático planteado por Sayarshad et al. (2012) se basa en una formulación de optimización multi-periódica detallada orientada a maximizar el beneficio de la empresa operadora de un SBC con estaciones fijas y matriz de viaje conocida. Los usuarios llegan a una estación, utilizan la bicicleta por cierto tiempo y la devuelven a la misma o a otra estación. El sistema cobra a los usuarios por la duración del tiempo de uso. Debido a la distribución desigual de la demanda, hay bicicletas no usadas en ciertas estaciones y escasez en otras. El modelo determina las bicicletas que debe tener cada estación previo al horario de operación, junto a las bicicletas que debe reposicionar entre estaciones en ciertos periodos particulares, de manera de minimizar los costos de penalización de los usuarios por demanda no satisfecha.

Raviv et al. (2013) desarrollan dos modelos estáticos (alternativos) que generalizan los modelos de enrutamiento de los camiones a cargo de la reposición de las bicicletas existentes en la literatura. Consisten en la introducción de una función objetivo que busca minimizar la suma de los costos de penalización de las estaciones (que representa el nivel de satisfacción de los usuarios en el sistema) y los costos operacionales totales de los vehículos encargados de la reposición (proporcional a la distancia total viajada). El propósito del ejercicio de reposicionamiento es mejorar las condiciones de inicio del sistema en el siguiente día laboral, de manera que obtienen la ruta que debe realizar cada camión junto con el número de bicicletas que debe cargar o descargar en cada estación.

El artículo de O'Mahony y Shmoys (2015) busca solucionar el problema de mantener el balance de bicicletas del sistema de Nueva York durante las horas de mayor uso como también solucionar el rebalanceo nocturno que determina las condiciones iniciales óptimas para el siguiente día. Los

autores utilizan los patrones de demanda del sistema y calculan la demanda subyacente producto de viajes que no se realizan debido a estaciones vacías o llenas.

En el artículo de Schuijbroek et al. (2017), los autores plantean un modelo matemático que combina dos aspectos que han sido tratados de manera independiente en la literatura: determinar el nivel de servicio requerido en cada estación y el diseño óptimo del enrutamiento de los vehículos a cargo de la reposición. Se modela la demanda viendo el número de bicicletas en cada estación como un sistema de colas de capacidad finita (M/M/1/K). El nivel de servicio requerido puede ser alcanzado cuando las bicicletas en la estación se encuentren entre un límite inferior y uno superior. De similar manera, Almanna et al. (2019) encuentran las condiciones iniciales que deben tener las estaciones para que las estaciones no se encuentren vacías o llenas en el transcurso del día. Kaltenbrunner, Meza, Grivolla, Codina y Banchs (2010) desarrollan un modelo predictivo (modelo autoregresivo de media móvil) de la disponibilidad de bicicletas o sitios, que permiten a los usuarios y a los operadores responder de manera adecuada al problema del reposicionamiento.

Tanto en los artículos de Raviv et al. (2013) como en el de Schuijbroek et al. (2017), los autores deben conocer las matrices origen-destino de los viajes en bicicleta, lo que complejiza la solución de los problemas. Los autores utilizan técnicas heurísticas para resolverlos, ya que el uso de programas de solución es poco práctico, incluso para sistemas de bicicletas de tamaño moderado.

Vogel y Mattfeld (2010), propone una función que describe la probabilidad del arriendo de una bicicleta que depende del tamaño de flota, la demanda y la actividad de reposicionamiento que incurre el operador. Para esto los autores no utilizan un modelo espacial complejo con tasas de llegadas de los usuarios y devolución de las bicicletas como los artículos anteriores. Vogel y Mattfeld (2010) son los primeros en utilizar un enfoque agregado para la descripción del reposicionamiento en los SBC. Los autores no consideran la probabilidad de dejar una bicicleta en una estación al finalizar su viaje.

2.3. Manejo de datos de los SBC

Los operadores de los Sistemas de Bicicletas Compartidas tienden a reportar algunas características operacionales de sus programas como el número de estaciones, bicicletas, viajes, número de usuarios inscritos, largo total de viajes en los sistemas y número de bicicletas reposicionadas. Adicionalmente, existen dos tipos de datos que liberan algunos SBC: los datos del estado instantáneo del sistema y los datos referentes al uso. Los primeros contienen el estado instantáneo de las estaciones (bicicletas disponibles y número de sitios de anclaje libres en cada momento) y son liberados para el uso principalmente de desarrolladores de aplicaciones móviles. Mientras que los segundos corresponden a los datos históricos (no procesados) de todos los viajes de los usuarios del sistema.

Debido a la velocidad en que se generan los datos de viajes y del estado instantáneo de la red, Romanillos, Zaltz Austwick, Ettema y De Kruijff (2016) los consideran como Big Data. Este término se refiere al procesamiento de grandes números de datos. La generación de estos datos debe cumplir criterios de volumen (tamaño), velocidad (rapidez con que se generan o almacenan) y variedad (amplio rango de fuentes de generación). Este artículo revisa y sintetiza las técnicas, objetivos y recomendaciones de un gran número de estudios que trabajan con datos de bicicletas. Los autores clasifican en tres grupos estos estudios de acuerdo a la naturaleza de su generación:

- (1) datos espacio-temporales generados por GPS;
- (2) datos instantáneos de las estaciones;
- (3) datos de viajes en bicicleta.

En el sentido de la descripción del crecimiento de los SBC, nos interesan los datos instantáneos y los datos de los viajes en bicicleta.

Los datos referentes al estado instantáneo de las estaciones permiten conocer el número de sitios libres junto al número de posiciones con bicicleta en cada estación del sistema en el momento de consulta. Su principal problema es que no son almacenados por lo que no se tiene la historia de cómo han crecido los sistemas. Los datos instantáneos solo registran los cambios netos del movimiento de las bicicletas. Por ejemplo, tres usuarios llegando y dos retirando bicicletas en una misma estación en un corto periodo de tiempo se registran igual que una sola bicicleta siendo arrendada. Otra desventaja es que estos datos se encuentran sucios: la reposición del operador aparece en los datos y no hay forma de conocerla.

Los datos de los viajes en cambio, permiten conocer la demanda de viajes, el número de bicicletas, el número de estaciones, cuando se instala una nueva, pero no permiten inferir si el sistema se densifica (en términos del número de sitios). Una ventaja de estos datos es que se encuentran limpios: los viajes de reposicionamiento no aparecen.

Mediante el almacenamiento de datos instantáneos por un periodo de cinco meses del sistema de Barcelona, Froehlich, Neumann y Oliver (2009) desarrollaron un trabajo en que agruparon las estaciones de acuerdo a patrones espacio-temporales similares. Kaltenbrunner et al. (2010), utilizando los mismos datos anteriores, consideran el problema de los usuarios para encontrar una bicicleta o un sitio disponible para devolverla.

El artículo de Faghieh-Imani y Eluru (2016) es el primero en considerar las interacciones espaciales y temporales de la demanda en las estaciones de los SBC. Los autores almacenaron los datos instantáneos de las estaciones del sistema de Nueva York para con ellos calcular las tasas de llegada y salida de bicicletas. Se basan en la tesis de que dichas tasas están potencialmente interconectada con las de las estaciones vecinas. Los autores además prueban que la tasas de llegada y salida para un período de tiempo están influenciadas por las tasas de periodos anteriores de dicha estación y de las de sus vecinas. En el estudio de O'Brien et al. (2014), los autores almacenaron los datos instantáneos de 80 ciudades distintas por 2 años consecutivos. Esto les permitió caracterizar y clasificar los SBC de acuerdo a patrones dominantes de uso. Los autores también analizaron indicadores espaciales y agregados de los sistemas.

Los datos de viajes provistos por los SBC generalmente identifican las estaciones de origen y de destino, junto al ID de las bicicletas, e incluso a los usuarios. Esto permite generar matrices de origen/destino y calcular la duración de los viajes. Estos datos son históricos, liberados en grandes lotes que abarcan meses o años, lo que limita su uso inmediato o la entrega de información en tiempo real. Estudios que utilizan estos datos se han centrado en desarrollar métodos de visualización de los viajes (Bargar, Gupta, Gupta y Ma, 2014; Wood, Slingsby y Dykes, 2011; Austwick, O'Brien, Strano y Viana, 2013) y a examinar movilidad individual (Borgnat et al., 2011). Otros estudios han comparado los datos de origen-destino entre ciudades, permitiendo analizar la distribución de la distancia viajada y de los tiempos de viajes para distintas ciudades (Austwick et al., 2013).

3. Descripción del Crecimiento de los SBC

3.1. Recopilación de datos

Las principales características de los SBC que permiten describir su crecimiento a medida que aumenta la demanda de usuarios son el número de estaciones, su localización, el número de bicicletas, sitios y bicicletas reposicionadas. Se recopiló desde diversas fuentes de información dichos datos de los sistemas de tercera generación de Nueva York, Chicago, Minneapolis, Denver, Boston, Montreal, Washington DC, Londres y Ciudad de México.

3.1.1. Datos referentes al uso

Se descargaron las bases de datos de los viajes de los sistemas mencionados desde sus páginas de internet. La Tabla (3) resume la información de dichos sistemas como la ciudad de operación, el inicio del sistema, los días de operación al año, la frecuencia con que son liberados los paquetes de datos y la cantidad de entradas que tienen las bases de datos desde el inicio de su operación:

Tabla 3: Bases de datos de viajes históricos recopiladas.

Ciudad	Sistema	Inicio sistema	Días de operación	Datos liberados	N. total de viajes ^A
Nueva York	CityBike ^B	jun-2013	365	Mensualmente	49,0M
Chicago	Divvy Bikes ^C	jun-2013	365	Semestralmente	13,0M
Minneapolis	Nice Ride ^D	jun-2010	365	Anualmente	2,6M
Denver	BCycle ^E	abr-2010	227 - 365 ^F	Anualmente	1,9M
Boston	BlueBikes ^G	sep-2011	365	Mensualmente	6,3M
Montreal	BIXI ^H	ene-2014	243	Mensualmente	15,3M
Washington DC	Capital Bikeshare ^I	sep-2010	365	Trimestralmente	19,1M
Londres	Santander Cycle Hire ^J	jul-2010	365	Depende del tamaño del archivo	67,5M
Ciudad de México	EcoBici ^K	feb-2010	365	Mensualmente	47,5M

^ANúmero total de viajes hasta diciembre de 2017.

^BRecopilado de <https://www.citibikenyc.com/system-data>. Último acceso 5 de junio, 2018. El sistema de bicicletas compartidas de Nueva York disminuye la oferta de bicicletas disponibles hasta un 70% durante los meses de invierno.

^CRecopilado de <https://www.divvybikes.com/system-data>. Último acceso 5 de junio, 2018.

^DRecopilado de <https://www.niceridemn.org/data/>. Último acceso 5 de junio, 2018.

^ERecopilado de <https://www.denverbicycle.com/company>. Último acceso 15 de noviembre, 2018.

^FA partir de enero del 2014 el sistema comienza a funcionar todos los días del año.

^GRecopilado de <https://www.bluebikes.com/system-data>. Último acceso 5 de junio, 2018. A mediados de 2018 el sistema cambió de nombre a Bluebikes, previamente se denominaba Hubway.

^HRecopilado de <https://www.bixi.com/en/open-data>. Último acceso 5 de junio, 2018. El sistema actualmente funciona desde abril hasta noviembre por razones climáticas.

^IRecopilado de <https://www.capitalbikeshare.com/system-data>. Último acceso 5 de junio, 2018.

^JRecopilado de <https://cycling.data.tfl.gov.uk/>. Último acceso 6 de junio, 2018. La base de datos comienza en 2012.

^KRecopilado de <https://www.ecobici.cdmx.gob.mx/es/informacion-del-servicio/open-data>. Último acceso 5 de junio, 2018.

Las bases de datos anteriormente señaladas difieren en su formato, contenido y limpieza. Cada entrada de viaje incluye distinta información de los viajes históricos dependiendo del sistema al cual forma parte. La Tabla (4) sintetiza el contenido de las distintas bases de datos. Estos datos incluyen información de los usuarios que realizaron los viajes, como su edad o género, sólo si son miembros del sistema (algunas ciudades permiten tanto usuarios suscritos como usuarios esporádicos).

El número identificador de la bicicleta usada para cada viaje no es reportado por los sistemas de Montreal y Minneapolis, de manera que es imposible conocer con estos datos el número de bicicletas que tienen dichos sistemas.

Tabla 4: Contenido de las bases de datos.

Ciudad	Duración viaje	Fecha inicio de viaje	Fecha fin de viaje	Estación inicio	Estación fin	Id Bicicleta	Tipo usuario	Edad	Género
Nueva York	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Chicago	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Minneapolis	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
Denver	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Boston	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Montreal	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
Washington DC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Londres		✓	✓	✓	✓	✓			
Ciudad de México		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓

3.1.2. Datos referentes al estado instantáneo

Los sistemas de Londres, Montreal y Washington no indican las coordenadas (latitud y longitud) de las estaciones en los datos de viajes, solo señalan la intersección de las calles de las estaciones de inicio y fin del viaje. Mediante el *software Postman* se accedió a los datos instantáneos de las estaciones de estos tres sistemas, los cuales sí entregan las coordenadas de las estaciones.

Como estos datos son instantáneos, no permiten encontrar la localización de las estaciones que fueron cerradas. Para estos casos, las coordenadas fueron localizadas manualmente mediante *Google Maps*.

3.1.3. Otros datos

Los sistemas de Nueva York y Denver realizan reportes operacionales con diversos niveles de detalle. *CityBike* realiza un reporte mensual que incluye el número de estaciones activas, la cantidad de bicicletas, el porcentaje de fallas en el sistema, el total de bicicletas reposicionadas, la cantidad de viajes realizados junto con la estimación del total de millas viajadas. El sistema *BCycle* en cambio, entrega un resumen operacional anual que reporta el número total de viajes, el número de estaciones, número de bicicletas y una estimación de las millas viajadas.

Los sistemas de bicicletas compartidas de Chicago y Minneapolis publican archivos con la localización de las estaciones junto al número de sitios en cada una de ellas. Chicago además informa el día de puesta en servicio de las estaciones.

3.2. Metodología, limpieza y orden de los datos

3.2.1. Número de viajes, estaciones, bicicletas, sitios y bicicletas reposicionadas

Los datos de los viajes liberados por *CityBike* (Nueva York) no incluyen los viajes que realiza el equipo de mantenimiento al mover las bicicletas, como tampoco los viajes de los usuarios que duran menos de 60 segundos (debido a que reflejan partidas falsas o usuarios que revisan que efectivamente la bicicleta quedó trabada en un *dock*) al terminar un viaje⁶. Este criterio temporal fue utilizado para la limpieza del resto de las bases de datos.

No se tomó un criterio de limpieza para el tiempo máximo de viaje, a pesar de que existían algunos de duraciones mayores a 6 horas. Estas situaciones pueden deberse a un problema del sistema en reconocer cuando una bicicleta fue dejada en una estación, pero efectivamente dan cuenta de al menos un viaje inicial.

Aquellos viajes que no reportaban la estación de destino fueron eliminados, pues pueden dar cuenta de movimientos de bicicletas por parte del operador. Sólo *CityBike* indica en su página web que no incluyen los viajes de las bicicletas de los equipos de mantención y de reposición.⁷

Depuradas las bases de datos, se procedió a calcular el número de estaciones, sitios y bicicletas anuales como el promedio de sus valores mensuales.

El número de bicicletas reposicionadas es reportado únicamente por el sistema de Nueva York. El número de bicicletas reposicionadas anuales se obtiene de la suma de los valores obtenidos de los reportes operacionales mensuales.

3.2.2. Características espaciales de los SBC

Las características espaciales analizadas son la localización de las estaciones, el área de cobertura de los sistemas, el espaciamiento medio entre estaciones y el largo medio de los viajes.

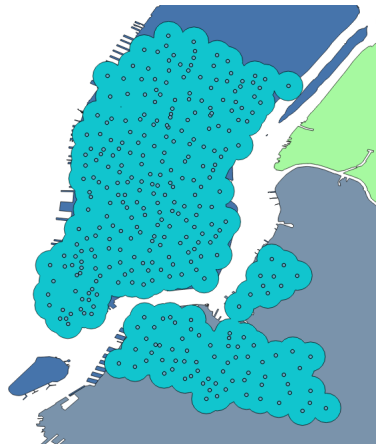


Figura 3: Área de cobertura del sistema de Nueva York en el año 2014.
Fuente: elaboración propia con datos de viajes históricos del SBC de Nueva York.

⁶ <https://www.citibikenyc.com/system-data>. Último acceso 9 de noviembre, 2018.

⁷ <https://www.citibikenyc.com/system-data>. Último acceso 9 de noviembre, 2018.

Mediante el *software* de Sistemas de Información Geográfica *QGis*, podemos geolocalizar las estaciones de los SBC y analizar año a año su área de cobertura. Utilizando la herramienta de geoproceto “buffer de distancia fija” del software, se realizaron áreas alrededor de cada estación de 300 metros de radio. El *software* calcula el área de cobertura total resultante de la unión de dichas áreas. Como el número de estaciones varía mes a mes, para este cálculo se utilizó el mes con mayor número de estaciones. De manera de ejemplificación, la Figura (3) muestra en color cyan el área de cobertura del sistema de Nueva York el año 2014, en donde los puntos representan la localización de las estaciones.

Sean r_L y r_W los espaciamentos horizontal y vertical entre cuatro estaciones de un SBC que definen el área A como muestra la Figura (4). De manera agregada, el valor A viene dado por el área de cobertura total del sistema dividido en el número total de estaciones. Así, utilizamos como medida de espaciamento entre estaciones la media geométrica entre r_L y r_W , lo que es equivalente a la raíz cuadrada de A .

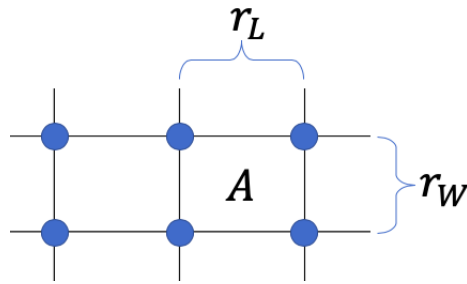


Figura 4: Medida de espaciamento medio entre estaciones.

La última característica espacial analizada es el largo medio de los viajes, la cual es informada en los reportes operacionales de Nueva York, Denver y Boston. Para el resto de los sistemas se calculó el largo de cada uno de los viajes y luego se promediaron los de un mismo año. Se utilizó el criterio del sistema de Nueva York para realizar estos cálculos: para viajes menores a dos horas, el largo del viaje en bicicleta es el tiempo de viaje por 12 km/h ; para viajes de mayor duración, el largo del viaje es de 24 kilómetros.

3.3. Resultados

Las Tablas a continuación listan los resultados de las variables descriptivas de los SBC estudiados. El símbolo – en las tablas indica el año-sistema en que no se tiene información.

3.3.1. Número de viajes, estaciones, bicicletas, sitios y bicicletas reposicionadas

Las Tablas (5) a (8) resumen el crecimiento anual que tuvieron los nueve sistemas analizados en términos del número total de viajes, estaciones, bicicletas y sitios.

Tabla 5: Viajes anuales en SBC (millones).

SBC	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nueva York	–	–	–	8,8	10,1	13,8	16,3
Chicago	–	–	–	2,5	3,2	3,6	3,8
Minneapolis	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5
Denver	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3
Boston	–	0,5	0,9	1,2	1,1	1,2	1,3
Montreal	–	–	–	3,1	3,4	4,0	4,7
Washington DC	1,2	2,1	2,6	3,0	3,2	3,3	3,8
Londres	–	9,0	7,9	9,5	9,8	10,2	10,3
Ciudad de México	2,5	2,7	6,5	8,0	9,2	9,1	9,5

Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos y reportes operacionales de los SBC.

Tabla 6: Número de estaciones de los SBC.

SBC	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nueva York	–	–	–	326	375	516	636
Chicago	–	–	–	300	475	580	585
Minneapolis	116	145	170	170	190	202	202
Denver	52	53	82	84	87	89	89
Boston	–	83	118	135	148	168	185
Montreal	–	–	–	459	460	465	547
Washington DC	140	176	250	329	352	400	473
Londres	–	567	593	744	744	770	780
Ciudad de México	90	262	272	276	447	457	467

Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos y reportes operacionales de los SBC.

Tabla 7: Número de bicicletas de los SBC.

SBC	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nueva York	—	—	—	5212	5449	7615	9150
Chicago	—	—	—	2968	4724	5623	6238
Minneapolis	—	—	—	—	—	—	—
Denver	520	530	709	709	719	737	737
Boston	—	830	1125	1250	1400	1650	1800
Montreal	—	—	—	—	—	—	—
Washington DC	1307	1556	2277	2975	3329	3784	4230
Londres	—	8071	8907	11199	11239	11580	11567
Ciudad de México	1205	3348	3944	3963	6253	8141	6899

Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos y reportes operacionales de los SBC.

Tabla 8: Número de sitios totales de los SBC.

SBC	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nueva York	—	—	—	—	—	—	—
Chicago	—	—	—	5125	8274	9590	10107
Minneapolis	—	2570	3039	3030	3373	3531	3648
Denver	—	—	—	—	—	—	—
Boston	—	—	—	—	—	—	—
Montreal	—	—	—	—	—	—	—
Washington DC	—	—	—	—	—	—	—
Londres	—	—	—	—	—	—	—
Ciudad de México	—	—	—	—	—	—	—

Fuente: elaboración propia usando otros datos de los SBC.

Por número de viajes es claro que existen grandes diferencias entre los nueve sistemas analizados. En el año 2017, el número de viajes en Nueva York y Londres llegan a ser dos ordenes de magnitud mayores que en los sistemas de Minneapolis y Denver. Las diferencias entre los sistemas son menos fuertes cuando estos se comparan de acuerdo al número de estaciones o bicicletas. En el último año de estudio, a pesar de que Londres es el sistema más grande en términos del número de estaciones y bicicletas, el sistema de Nueva York tiene una mayor cantidad de viajes.

Existen diferencias en el número de viajes que se realizan por estación o por bicicleta. El sistema de Nueva York es el más eficiente en estos aspectos pues, en promedio, tiene 25.000 viajes anuales por estación y cada bicicleta es usada 4,8 veces al día. El sistema que tiene menos viajes por estación es Minneapolis (2.500 viajes anuales por estación), mientras que el sistema con menor uso diario de una bicicleta es Chicago (1,8 viajes).

Es posible notar que las bicicletas de Ciudad de México tienen un máximo en 2016, el que podría deberse a la forma en que estas fueron contadas. Un recambio de bicicletas en meses progresivos de dicho año contaría tanto las bicicletas nuevas como las que fueron sacadas de circulación. Se consultó

vía correo electrónico al operador de dicho sistema si se recambiaron las bicicletas dicho año, no obteniéndose respuesta.

La Tabla (9) lista el número de bicicletas reposicionadas en el sistema de Nueva York. La actividad de reposicionamiento significó mover diariamente desde 1.447 bicicletas (año 2014) hasta 2.992 bicicletas (año 2017). El año en que más bicicletas diarias se reposicionaron en comparación al número de bicicletas fue en 2016, equivalente al 35 % de la flota. Esto da cuenta de la magnitud del problema de reposicionamiento.

Tabla 9: Bicicletas reposicionadas en Nueva York (miles).

SBC	2014	2015	2016	2017
Nueva York	528	673	980	1092

Fuente: elaboración propia usando datos de reportes operacionales del SBC de Nueva York.

3.3.2. Características espaciales de los SBC

Localización de las estaciones

Las Figuras (5) a (8) muestran la evolución de la localización de las estaciones de los sistemas de Nueva York, Chicago, Boston y Washington DC. Resulta importante destacar que el aumento del número de estaciones de los sistemas es progresivo hacia nuevos sectores de la ciudad. Los sistemas no se inician dispersos para luego densificarse, por el contrario, tienden a agregar nuevas estaciones hacia zonas aledañas manteniendo el espaciamiento inicial (Nueva York y Boston) o aumentándolo (Chicago y Washington DC).

Es posible apreciar que los sistemas de Chicago y Washington DC tienen algunas zonas con mayor densidad de estaciones. El espaciamiento entre estaciones de los sistemas de Nueva York y Boston en cambio, es más homogéneo en la extensión del sistema.

Resulta interesante destacar el sistema de Washington DC debido a que la extensión del sistema a partir de 2013 se hace hacia pueblos cercanos quedando estaciones agrupadas en cuatro cúmulos. Al ser consultado, el operador confirmó que forman parte del mismo sistema y que se puede viajar entre dichas zonas.

Los sistemas de Minneapolis, Denver, Montreal no son reportados debido a su limitado crecimiento (en los años que se tiene la localización de las estaciones). Los sistemas de Londres y Ciudad de México tampoco se reportan debido a que su crecimiento se centra principalmente en un único período.

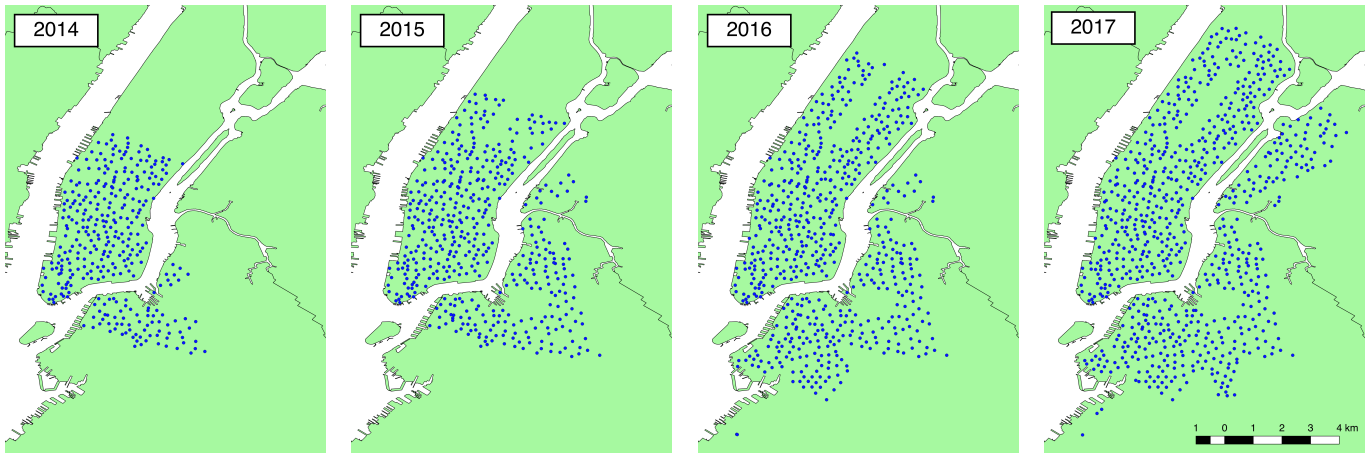


Figura 5: Crecimiento espacial del SBC de Nueva York.
Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos de Nueva York.

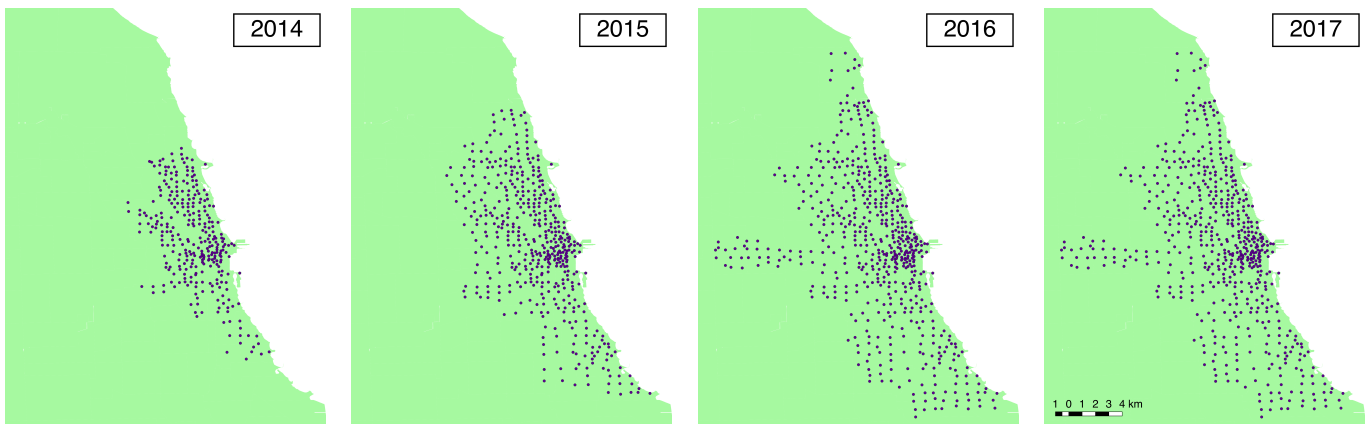


Figura 6: Crecimiento espacial del SBC de Chicago.
Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos de Chicago.

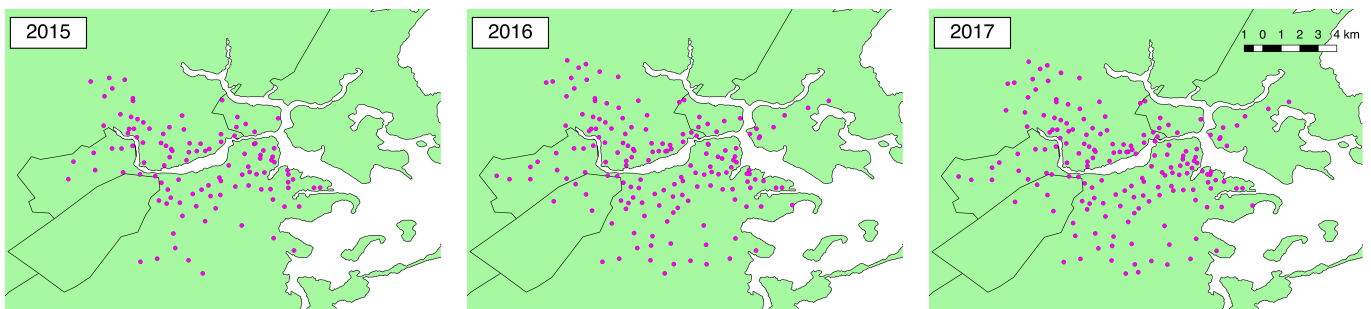


Figura 7: Crecimiento espacial del SBC de Boston.
Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos de Boston.

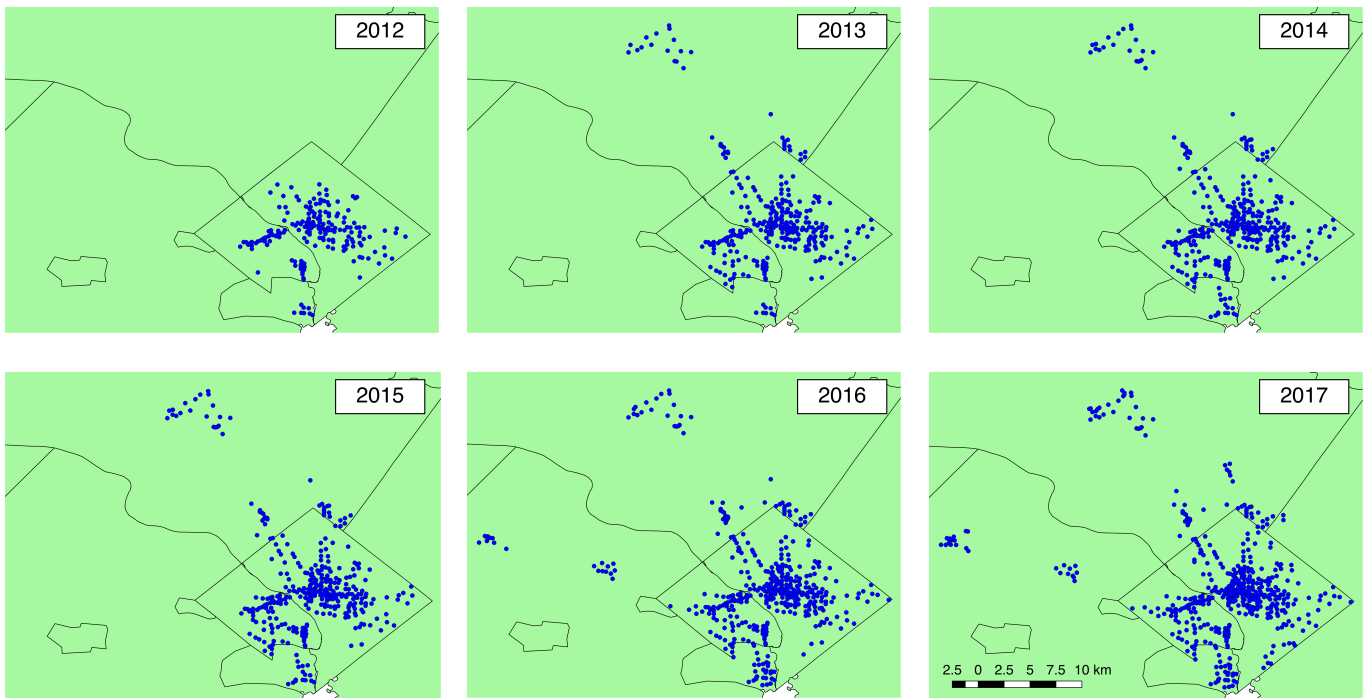


Figura 8: Crecimiento espacial del SBC de Washington DC.

Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos de Washington DC.

Área de cobertura

El área de cobertura de los sistemas por año se muestran en la Tabla (10). Es posible notar que Denver y Londres son los únicos sistemas que disminuyeron su área entre un año y el siguiente, a pesar de que aumentan siempre el número de estaciones. Esto se debe al traslado de una estación perimetral, probablemente poco utilizada, hacia una zona central que no aumenta la cobertura del sistema.

En el largo plazo (es decir entre el inicio de cada sistema y el año 2017), todos los sistemas aumentaron su área. Esta evolución se desarrolla en intensidades y tiempos distintos. Denver, Minneapolis y Montreal se mantuvieron prácticamente constantes. Nueva York, Boston y Washington DC aumentaron su área de cobertura todos los años. Chicago crece fuertemente hasta el 2016, Londres hasta el 2013 y Ciudad de México entre el 2014 y el 2015.

Tabla 10: Área de cobertura de los SBC (km^2).

SBC	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nueva York	—	—	—	48,8	76,4	96,7	120,4
Chicago	—	—	—	95,3	165,0	214,2	215,3
Minneapolis	—	—	71,0	71,1	74,4	76,0	76,7
Denver	—	—	—	26,9	28,2	28,5	27,2
Boston	—	—	—	—	44,1	63,5	66,8
Montreal	—	—	—	107,9	108,0	109,4	118,5
Washington DC	41,8	60,5	97,5	108,2	110,4	132,0	145,1
Londres	—	116,1	156,0	158,3	158,8	163,5	163,4
Ciudad de México	—	26,0	26,2	26,1	42,7	43,0	46,3

Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos de los SBC.

Espaciamiento medio entre estaciones

Con el número de estaciones y el área de cobertura se calcula el espaciamento promedio entre estaciones, resumido en la Tabla (11).

Tabla 11: Espaciamento promedio entre estaciones de los SBC (metros).

SBC	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nueva York	—	—	—	387	451	433	435
Chicago	—	—	—	564	589	608	607
Minneapolis	—	—	646	647	626	613	616
Denver	—	—	—	566	569	566	553
Boston	—	—	—	—	546	615	601
Montreal	—	—	—	485	485	485	465
Washington DC	546	586	624	573	560	574	554
Londres	—	453	513	461	462	461	458
Ciudad de México	—	315	310	308	309	307	315

Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos de los SBC.

Largo medio de los viajes

El largo medio de los viajes se reportan en la Tabla (12).

Tabla 12: Largo medio de viajes en SBC (km).

SBC	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nueva York*	–	–	–	2,66	2,61	3,45	3,75
Chicago	–	–	–	3,14	2,95	2,91	2,84
Minneapolis	3,34	3,52	3,72	4,19	4,15	3,88	4,05
Denver*	–	–	–	3,43	3,43	3,43	3,43
Boston*	–	3,21	2,89	2,84	2,95	2,93	2,97
Montreal	–	–	–	2,54	2,65	2,71	2,65
Washington DC	3,66	3,18	3,15	3,14	3,23	3,43	3,52
Londres	–	3,44	3,39	3,55	3,62	3,58	3,56
Ciudad de México	–	2,38	2,51	2,55	2,65	2,63	2,74

Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos y reportes operacionales* de los SBC.

3.3.3. Evolución de los SBC

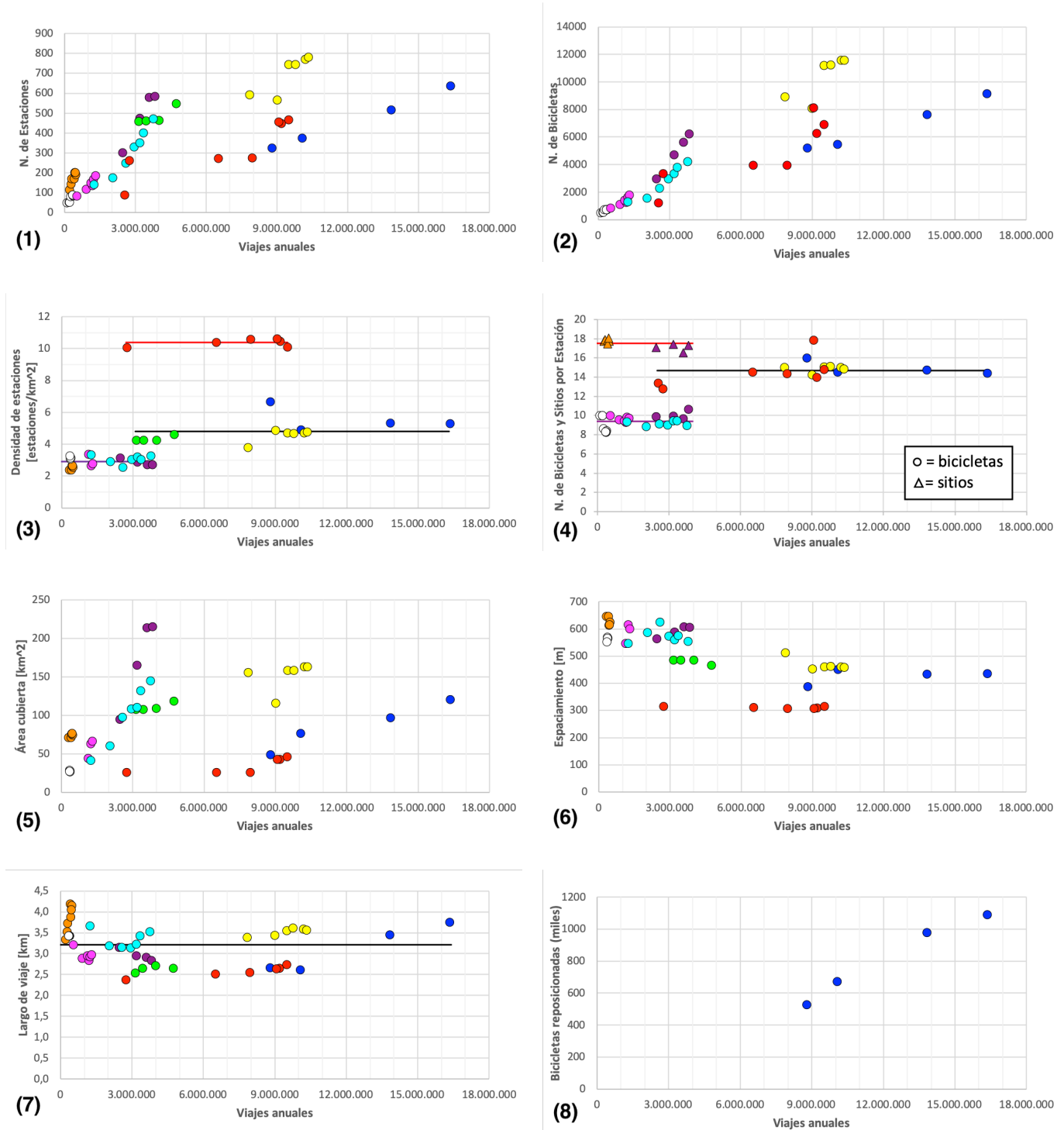
En la Figura (9) se muestran nueve variables y su relación con el uso de los sistemas (viajes anuales): número de estaciones y bicicletas, densidad de estaciones, cantidad de bicicletas y sitios por estación, área cubierta, largo medio de los viajes y bicicletas reposicionadas.

Tanto el número de estaciones como el número de bicicletas son crecientes con respecto al número de viajes (Figuras 9.1 y 9.2). La densidad de las estaciones (Figura 9.3) es constante en tres niveles (2,9; 4,8 y 10,4 estaciones por km^2). Esto evidencia que los operadores de los SBC parecieran determinar desde un principio la densidad de las estaciones, para luego expandirse a zonas aledañas manteniéndola constante, lo que se aprecia claramente en las Figuras (5) y (7). Al analizar todas las observaciones en conjunto es posible notar que los sistemas con más viajes tienden a ser más densos.

El número de bicicletas por estación (marcados con círculos en la Figura 9.4) es constante a dos niveles: los sistemas pequeños tienen aproximadamente 10 bicicletas por estación mientras que los sistemas grandes tienen 15. El número de sitios por estación (marcados con triángulos en la misma figura) sólo se tienen para los sistemas de Chicago y Minneapolis y representan en promedio 17,5 sitios por estación. El único sistema que reporta tanto bicicletas como número de sitios – Chicago – tiene un factor de carga (proporción entre el número de bicicletas y de sitios) que varía entre un 57% y un 62%, levemente menor al límite superior indicado por O'Brien et al. (2014).

El área cubierta por por los sistemas (Figura 9.5) da cuenta de las diferencias en generación de viajes por unidad de superficie. En Chicago se realizan alrededor de 6.000 viajes por km^2 mientras que en Ciudad de México se llega a los 215.000. El espaciamiento entre estaciones (Figura 9.6) se mantiene relativamente constante con el número de usuarios cuando se considera cada sistema individualmente. Al analizar todos los sistemas en conjunto, se aprecia que el espaciamiento decrece con el número de usuarios. Esto es esperable pues la medida utilizada para medir el espaciamiento medio entre estaciones es la raíz cuadrada del inverso de una función creciente (densidad de estaciones, Figura 9.3).

El largo promedio de los viajes resulta constante (Figura 9.7) a un valor de 3,21 km . En los sistemas de Nueva York y Minneapolis el largo medio aumenta con el número de viajes. La explicación a esto puede deberse a la naturaleza de los nuevos pares origen/destino que tienen los sistemas al



● Nueva York ● Chicago ● Minneapolis ○ Denver ● Boston ● Montreal ● Washington D.C. ● Londres ● Ciudad de México

Figura 9: (1) Estaciones; (2) Bicicletas; (3) Densidad de estaciones; (4) Bicicletas y sitios por estación; (5) Área cubierta; (6) Espaciamiento; (7) Largo de viaje; (8) Bicicletas reposicionadas. Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos y reportes operacionales de los SBC.

expandirse a nuevas zonas de la ciudad. Nuevas estaciones (en dichos sectores), explican nuevos destinos de viajeros ya inscritos en los sistemas junto a nuevos orígenes/destinos para nuevos usuarios. Chicago aumenta su área de cobertura fuertemente pero no aumenta el largo medio de los viajes a diferencia de Nueva York. El reposicionamiento de bicicletas aumenta con el número de viajes (Figura 9.8).

Se constata de esta manera que, cuando los sistemas aumentan en viajes, los tiempos de viaje en bicicleta se mantendrían constantes pues los largos de viaje promedio lo son, los tiempos de acceso/egreso a las estaciones disminuyen pues los espaciamientos entre estaciones decrecen y los tiempos de espera en las estaciones podrían verse afectados pues el número de bicicletas por estación crece, pero se desconoce el comportamiento del número de sitios por estación (es decir, si los operadores lo aumentan). De esta manera, se espera la existencia de economías de escala en el funcionamiento de los SBC provocadas principalmente por la disminución de los tiempos de acceso/egreso.

El hecho de que los sistemas no se densifiquen al aumentar el número de viajes, puede deberse a que se está realizando un análisis agregado. Resulta probable que al expandirse a zonas con una menor densidad de habitantes, el operador disponga de estaciones con un mayor espaciamiento entre si, lo que se intuye de la figura que muestra el crecimiento espacial de Chicago (Figura 6). Si a la vez, se densifican zonas con gran cantidad de viajes, por ejemplo el centro de las ciudades, el resultado neto puede ser una densidad constante. La incorporación de la densidad de habitantes debe ser estudiada en trabajos futuros.

4. Formulación de los modelos

En esta sección se desarrollan dos modelos que describen el costo social del transporte de usuarios de un SBC. Dada un área en una ciudad en donde se realizan Y viajes al día en bicicleta de largo medio conocido, se busca optimizar el número y la localización de las estaciones, junto al número de bicicletas, sitios totales y el número de bicicletas que el operador debe reposicionar. Para esto se replicará el enfoque utilizado en el análisis microeconómico del transporte público, el cual se detalla a continuación.

Al optimizar el transporte público se deben tomar en cuenta los recursos proporcionados por el operador (costos operacionales y de capital) y los proporcionados por los pasajeros (su tiempo). Los primeros incluyen la energía, las personas contratadas, la mantención, la administración, la infraestructura y el costo de los buses. Mientras que en los costos de los usuarios se contempla los valores monetarios del tiempo de espera, de acceso y de viaje en vehículo (Jara-Díaz y Gschwender, 2009).

En ausencia de congestión, el costo promedio de los operadores decrece a medida que la demanda de usuarios Y aumenta. Por parte de los usuarios, el tiempo de espera disminuye cuando Y aumenta (si la frecuencia se adapta óptimamente). El tiempo de acceso disminuye también con el crecimiento de la demanda, si se permite que las rutas de buses se densifiquen. El tiempo en vehículo aumenta con Y debido a que más personas se suben y bajan de los buses, lo que hace más largos los tiempos de ciclos de los recorridos. El efecto en el tiempo de espera y de acceso resulta superior al mayor tiempo de viaje en vehículo, lo que se traduce en un costo promedio de los usuarios decreciente con la demanda (Jara-Díaz y Gschwender, 2009).

De este modo, Boyd, Asher y Wetzler (1978) y Allport (1981) concluyen que el costo total (costo de los operadores y de los usuarios) crece menos que proporcional con la demanda. Esto implica que el costo promedio total disminuye con la demanda, manifestando la existencia de economías de escala (Jara-Díaz y Gschwender, 2009). De esta manera, el costo total promedio AC_T es mayor que el costo marginal total MgC_T , como se grafica en la Figura (10). El precio óptimo es cuando la demanda iguala al costo marginal total. La tarifa de transporte público óptima P^* se obtiene de la resta entre MgC_T y lo que los usuarios ya gastan con su tiempo, dado por AC_U .

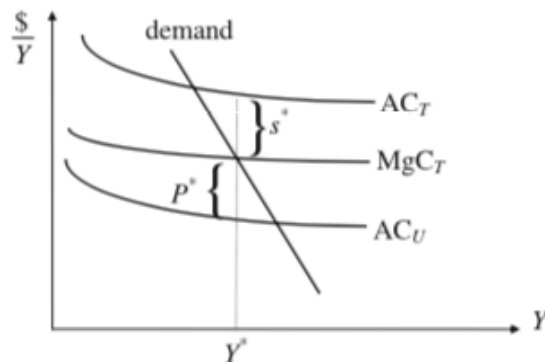


Figura 10: Tarifación y Subsidios Óptimos en transporte Público (Jara-Díaz y Gschwender, 2005).

El costo promedio de los operadores $AC_O (= AC_T - AC_U)$ es mayor que la tarifa resultante, lo que induce (y justifica) un subsidio óptimo S^* que permita cubrir los gastos del operador (Jara-Díaz y Gschwender, 2009).

4.1. Entendiendo el problema: costo de los usuarios y del operador

En un sistema de bicicletas compartidas se debe considerar dentro de los costos de los usuarios la suma de los tiempos de acceso (t_{ac}) y egreso (t_{eg}), el tiempo de espera en las estaciones y el tiempo de viaje en vehículo (t_v); cada uno ponderado por su precio de tiempo respectivo (P_a , P_e y P_v). El tiempo de espera debe hacer alusión a dos fenómenos que ocurren debido a los límites de capacidad en estos sistemas: el tiempo que el usuario espera cuando se encuentra en una estación sin bicicletas al iniciar su viaje, denominado tiempo de espera en el origen (t_{eo}); y el tiempo de espera producto que encuentra una estación llena al finalizar su viaje, denominado tiempo de espera en el destino (t_{ed}).

Por otra parte, el costo del operador está compuesto por cuatro términos: un costo asociado a la administración del sistema (A), otro a las estaciones debido al número de sitios y su mantención (C_E); un costo asociado al número total de bicicletas y su mantención (C_B); y un costo asociado al reposicionamiento de las bicicletas (C_R). Este último costo hace alusión al movimiento de bicicletas vacías por parte del operador debido a desbalances entre la oferta y la demanda de bicicletas y de sitios.

El valor de los recursos consumidos escrito de su forma generalizada es:

$$VRC = \underbrace{P_a(t_{ac} + t_{eg}) + P_e(t_{eo} + t_{ed}) + P_v t_v}_{\text{Costo de los usuarios}} + \underbrace{A + C_E + C_B + C_R}_{\text{Costo del operador}} \quad (1)$$

4.2. M1: modelo estructural sin reposicionamiento

Partiendo del modelo de ciudad rectangular de transporte público de Sivakumaran, Li, Cassidy y Madanat (2014) se formula el modelo inicial al problema, el cual busca recoger los elementos estructurales básicos de un SBC. Los orígenes y destinos de los viajes se distribuyen de manera uniforme en un ciudad de dimensiones $L \times W$ [km^2]. De esta manera se generan Y [viajes/día], lo que se traduce en una densidad de viajes $\rho = Y/LW$ [viajes/ $km^2 - día$].

Las estaciones de bicicletas se instalan de manera equiespaciada. En la dirección vertical se separan por una distancia r_W , mientras que en la dirección horizontal se espacian en r_L como muestra la Figura (11).

El número total de estaciones N resulta del producto entre el número de estaciones que se ubican en la dirección horizontal (N_L) y el número de estaciones en la dirección vertical (N_W), los cuales se pueden calcular de acuerdo al espaciamiento horizontal (r_L) y vertical (r_W) entre las estaciones:

$$N = N_L N_W = \frac{L}{r_L} \frac{W}{r_W} \quad (2)$$

Para acceder a la estación más cercana, los usuarios en promedio caminan $r_W/4$ en la dirección vertical y $r_L/4$ en la dirección horizontal. Si v_a es la velocidad promedio de caminata y considerando también el tiempo de egreso desde la estación hasta el destino se obtiene que la suma de los tiempos de acceso y egreso de todos los usuarios del sistema viene dado por:

$$t_{ac} + t_{eg} = \frac{Y}{v_a} \left(\frac{r_W}{2} + \frac{r_L}{2} \right) \quad (3)$$

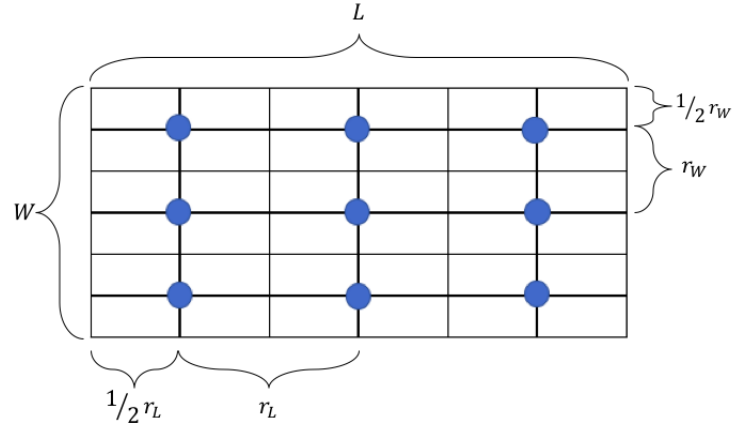


Figura 11: Modelo de ciudad rectangular de dimensiones $L \times W$. En este caso $N_L = N_W = 3$.

En este modelo asumimos que los usuarios siempre encuentran una estación con bicicletas en el origen y sitios disponibles para dejarlas en el destino, es decir los tiempos de espera son nulos ($t_{eo} = t_{ed} = 0$). Si el largo de viaje promedio en bicicleta es l y la velocidad promedio en dichos vehículos es v_v , el tiempo de viaje en vehículo promedio de un usuario es l/v_v . Así, el costo de los usuarios viene dado por:

$$C_u = \frac{P_a Y}{v_a} \left(\frac{r_W}{2} + \frac{r_L}{2} \right) + \frac{P_v Y l}{v_v}, \quad (4)$$

siendo P_v y P_a los precios del tiempo viaje en bicicleta y los precios del tiempo de acceso-egreso, respectivamente.

Debido a que los usuarios siempre encuentran bicicletas disponibles en el origen y sitios libres en el destino (equivalente a decir que la oferta se encuentra perfectamente equilibrada con la demanda), el operador no tiene la necesidad de reposicionar bicicletas ($C_R = 0$). Esto se debe a que forman parte del mismo fenómeno: desde un punto de vista normativo el reposicionamiento llevado a cabo por el operador busca que el tiempo de espera de los usuarios, ya sea en el origen y en el destino, disminuya generando un servicio atractivo. De acuerdo a Vogel y Mattfeld (2010), los operadores reposicionan las bicicletas para mejorar la calidad del servicio de los usuarios, que en el mediano plazo lleva a un mayor número de usuarios inscritos en los sistemas.

Debido a la homogeneidad de la demanda y a la instalación equiespaciada de las estaciones, se puede asumir que las estaciones tendrán un tamaño constante (ie: todas las estaciones tendrán el mismo número de sitios). Así, el costo del operador consta de tres términos: el costo de administración (A), el costo de las estaciones (C_E); y el costo de las bicicletas (C_B). Dentro del segundo se considera: un costo fijo por estación (c_e), asociado al costo por día del terminal tecnológico que entrega la información de la estación y permite desbloquear las bicicletas; y un término que depende del número de sitios en dicha estación (N_s/N). El costo asociado a las bicicletas considera la depreciación de las N_b bicicletas y su mantención producto de la distancia que recorren. Como se tienen N_b bicicletas que realizan Y/N_b viajes cada una de largo l , entonces los kilómetros recorridos en el sistema son Yl . Así, el costo del operador puede expresarse de la siguiente forma:

$$C_o = A + N \underbrace{\left(c_e + c_s \frac{N_s}{N} \right)}_{(C_E)} + \underbrace{(c_b N_b + c_m Y l)}_{(C_B)}, \quad (5)$$

donde c_s es el costo de un sitio adicional para cada estación por día, c_b es el costo por día de una bicicleta y c_m es el costo de mantención de una bicicleta por kilómetro.

Las variables de diseño en este problema son el espaciamiento vertical y horizontal entre las estaciones, el número de bicicletas y el número de sitios.

El valor de los recursos consumidos (VRC) viene dado por la suma de las ecuaciones (4) y (5):

$$VRC = P_a \frac{Y}{v_a} \left(\frac{r_W}{2} + \frac{r_L}{2} \right) + P_v \frac{Yl}{v_v} + A + Nc_e + c_s N_s + c_b N_b + c_m Yl \quad (6)$$

El tiempo promedio que se demora un viaje en bicicleta es l/v_v . Al asumir que los orígenes y destinos de los viajes se distribuyen de manera uniforme, se define el número de bicicletas mínimo necesario para realizar los Y viajes demandados al día como:

$$N_{bm} = \frac{Yl}{Tv_v}, \quad (7)$$

donde T son las horas de operación del sistema al día.

De esta manera el número total de bicicletas (N_b) es de al menos N_{bm} unidades. El número de sitios que permiten anclar todas las bicicletas, es mayor o igual a N_b espacios:

$$N_{bm} \leq N_b \leq N_s \quad (8)$$

Como no hay tiempos de espera, los usuarios siempre encuentran un sitio disponible para dejar su bicicleta. Así, la minimización del costo es equivalente a utilizar el valor límite de la ecuación (8), ya que el número de bicicletas y de sitios hace crecer únicamente al costo del operador sin afectar al costo de los usuarios. Utilizando $N_b = N_s = N_{bm}$ y la ecuación (2) en (6), se simplifica el problema dejando como únicas variables a optimizar los espaciamientos:

$$VRC = P_a \frac{Y}{v_a} \left(\frac{r_W}{2} + \frac{r_L}{2} \right) + P_v \frac{Yl}{v_v} + A + \frac{LW}{r_L r_W} c_e + c_s \frac{Yl}{Tv_v} + c_b \frac{Yl}{Tv_v} + c_m Yl \quad (9)$$

El utilizar el valor límite para el número de bicicletas y de sitios significa que el factor de carga máximo (NAB) en este modelo es de un 100%. Esto implica que una vez terminado el horario de operación, todas las bicicletas quedan aparcadas y ningún sitio queda libre. Adicionalmente, durante el horario de operación, todas las bicicletas están constantemente siendo utilizadas: cuando un usuario deja su bicicleta en una estación al finalizar la etapa de viaje en vehículo, otro usuario inmediatamente la recoge e inicia el suyo.

Se puede notar de la ecuación (9) que los términos asociados al costo del tiempo de viaje en bicicleta, administración, número de sitios, bicicletas y mantención, son constantes; por lo tanto irrelevantes en la optimización del diseño del SBC.

Derivando el VRC de la ecuación (9) con respecto a r_L se obtiene:

$$\frac{\partial VRC}{\partial r_L} = \frac{P_a Y}{2v_a} - \frac{c_e LW}{r_L^2 r_W} \quad (10)$$

Igualando a cero la ecuación (10) se obtiene el espaciamiento horizontal óptimo (ecuación 11). Derivando el VRC con respecto a r_W e igualando a cero se obtiene el espaciamiento vertical óptimo

(ecuación 12):

$$r_L^* = \sqrt{\frac{2c_e LW v_a}{P_a Y r_W}} \quad (11)$$

$$r_W^* = \sqrt{\frac{2c_e LW v_a}{P_a Y r_L}} \quad (12)$$

Reemplazando la ecuación (12) en (11), despejando r_L y luego reemplazándolo en (12) se llega a que el espaciamiento óptimo es el mismo en ambas direcciones, e igual a:

$$r_W^* = r_L^* = \sqrt[3]{\frac{2c_e LW v_a}{P_a Y}} = \sqrt[3]{\frac{2c_e v_a}{P_a \rho}} \quad (13)$$

Se nota de la ecuación (13) que el espaciamiento óptimo no depende de la velocidad promedio de las bicicletas, sino de la velocidad promedio de caminata. Además, el espaciamiento entre las estaciones disminuye cuando la densidad de viajes aumenta.

Por otro lado, el número de estaciones óptimo viene dado por:

$$N^* = \frac{LW}{r_L^* r_W^*} = \sqrt[3]{\frac{LW}{4} \left(\frac{P_a Y}{c_e v_a} \right)^2} \quad (14)$$

De la ecuación (14) se nota que el número de estaciones óptimo del sistema aumenta con el número de viajes, al igual que con el tamaño de la ciudad.

Finalmente, el número de sitios óptimo por cada estación (k^*) viene dado por:

$$k^* = \frac{Yl}{N^* T v_v} = \frac{l}{T v_v} \sqrt[3]{\frac{Y}{LW} \left(\frac{2c_e v_a}{P_a} \right)^2} = \frac{l}{T v_v} \sqrt[3]{\rho \left(\frac{2c_e v_a}{P_a} \right)^2} \quad (15)$$

Se nota de la ecuación (15) que al aumentar la densidad de viajes, el número de sitios óptimos por estación también aumenta.

Reemplazando la ecuación (13) en (9), se obtiene la función de costos:

$$C_T = \frac{P_a Y}{v_a} \sqrt[3]{\frac{2c_e LW v_a}{P_a Y}} + \frac{P_v Y l}{v_v} + A + c_e \sqrt[3]{\frac{LW}{4} \left(\frac{P_a Y}{c_e v_a} \right)^2} + \frac{c_s Y l}{T v_v} + \frac{c_b Y l}{T v_v} + c_m Y l \quad (16)$$

Reordenando términos se obtiene:

$$C_T = \sqrt[3]{2c_e LW Y^2 \left(\frac{P_a}{v_a} \right)^2} + \frac{P_v Y l}{v_v} + A + \sqrt[3]{\frac{c_e LW Y^2}{4} \left(\frac{P_a}{v_a} \right)^2} + \frac{c_s Y l}{T v_v} + \frac{c_b Y l}{T v_v} + c_m Y l \quad (17)$$

El costo medio total viene dado por la siguiente ecuación:

$$CMe_T = \frac{C_T}{Y} = \underbrace{\sqrt[3]{\frac{2c_e LW}{Y} \left(\frac{P_a}{v_a} \right)^2}}_{CMe_u} + \frac{P_v l}{v_v} + \frac{A}{Y} + \underbrace{\sqrt[3]{\frac{c_e LW}{4Y} \left(\frac{P_a}{v_a} \right)^2}}_{CMe_o} + \frac{c_s l}{T v_v} + \frac{c_b l}{T v_v} + c_m l \quad (18)$$

De esta manera el costo medio disminuye con la demanda, evidenciando economías de escala tanto en los costos de usuarios como en los operadores. El costo marginal total viene dado por:

$$CM_{gT} = \frac{2}{3} \sqrt[3]{\frac{2c_e LW}{Y} \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} + \frac{P_v l}{v_v} + \frac{2}{3} \sqrt[3]{\frac{c_e LW}{4Y} \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} + \frac{c_s l}{Tv_v} + \frac{c_b l}{Tv_v} + c_m l \quad (19)$$

Luego, la tarifa óptima viene dada por:

$$P^* = CM_{gT} - CM_{e_u} = -\frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{2c_e LW}{Y} \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} + \frac{2}{3} \sqrt[3]{\frac{c_e LW}{4Y} \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} + \frac{c_s l}{Tv_v} + \frac{c_b l}{Tv_v} + c_m l \quad (20)$$

Agrupando términos se obtiene que:

$$P^* = \sqrt[3]{\frac{c_e}{\rho} \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} \underbrace{\left[\frac{2}{3} \sqrt[3]{1/4} - \frac{1}{3} \sqrt[3]{2} \right]}_{=0} + \frac{c_s l}{Tv_v} + \frac{c_b l}{Tv_v} + c_m l = (c_s + c_b) \frac{l}{Tv_v} + c_m l \quad (21)$$

Es decir, la tarifa óptima es una constante que depende únicamente de la suma del costo de un sitio y una bicicleta adicional, del largo de viaje medio de la bicicleta, del periodo de operación diario, de la velocidad en bicicleta y del costo de mantención.

El subsidio óptimo viene dado por:

$$S^* = CM_{e_o} - P^* = \frac{A}{Y} + \sqrt[3]{\frac{c_e LW}{4Y} \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} = \frac{A}{Y} + \underbrace{\sqrt[3]{\frac{1}{4}}}_{\approx 0,63} \sqrt[3]{\frac{c_e}{\rho} \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} \quad (22)$$

Finalmente se nota que el subsidio óptimo aumenta con el costo del terminal de una estación, el precio de acceso y el área del sistema, mientras que disminuye con el número de viajes y con la velocidad media de caminata. El costo de administración es una fuente de economías de escala: al ser un costo fijo, es mejor cuando se amortiza entre más personas.

El subsidio total óptimo es:

$$S_T^* = A + 0,63 \sqrt[3]{c_e LW Y^2 \left(\frac{P_a}{v_a}\right)^2} \quad (23)$$

Finalmente se nota que:

$$\begin{aligned} \lim_{Y \rightarrow \infty} S^* &= 0 \\ \lim_{Y \rightarrow \infty} S_T^* &= \infty \end{aligned}$$

4.3. M2: modelo estructural con reposicionamiento

En el modelo idealizado anteriormente descrito no se da cuenta de la actividad de reposicionamiento de las bicicletas por parte del operador. El siguiente modelo la incorpora de manera agregada. Para esto se sigue asumiendo que los orígenes y destinos de los usuarios se distribuyen espacialmente de manera uniforme sobre la ciudad rectangular durante el periodo de operación del sistema, así las estaciones se distribuyen equiespaciadamente en el espacio; pero se da cuenta que debido a una distribución temporal no uniforme y a que las estaciones son de capacidad limitada, algunas pueden llenarse mientras otras pueden encontrarse vacías. Esto se traduce, para los usuarios, en tiempos de espera en el origen (t_{eo}) y en el destino (t_{ed}). Por lo tanto el costo de los usuarios puede ser disminuido con reposicionamiento lo que tiene un costo para el operador.

El número de bicicletas mínimo (N_{bm}) también es el número de bicicletas siendo utilizadas en cualquier momento. El efecto de que el operador reposicione bicicletas de manera inteligente, es decir que las mueva de las estaciones en que faltan sitios disponibles hacia estaciones en que faltan bicicletas disponibles; se traduce en la disminución de los tiempos de espera de los usuarios tanto en el origen como en el destino. Sea N_r el número de bicicletas que el operador traslada en un día de operación. Al aumentar N_r/T (el número de bicicletas reposicionadas en una hora) el tiempo de espera en el origen disminuye porque se tienen más bicicletas para iniciar el viaje. El tiempo de espera en el destino también disminuye ya que se tienen menos bicicletas utilizando los sitios de las estaciones que requieren que se finalicen los viajes.

El tiempo de espera en origen aumenta con la probabilidad de no encontrar una bicicleta en las estaciones de origen, o equivalentemente, aumenta con uno menos la probabilidad de encontrar bicicletas en el origen. Esta última se puede escribir como las bicicletas totales (N_b) menos las bicicletas siendo utilizadas (N_{bm}) más las bicicletas que son reposicionadas a las estaciones de origen en una hora (N_r/T), todo dividido por el número total de bicicletas. De esta manera el tiempo de espera en el origen crece con la forma:

$$1 - \Pr(\text{encontrar bicicletas en origen}) = \frac{N_b}{N_b} - \frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_b} = \frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \quad (24)$$

El tiempo de espera en el destino aumenta con la probabilidad de no encontrar sitios disponibles, lo que es equivalente a encontrar bicicletas en el destino. Esta probabilidad viene dado por las bicicletas totales (N_b) menos las bicicletas en circulación (N_{bm}) menos las bicicletas que son sacadas por el operador en las estaciones de destino en una hora (N_r/T), todo dividido por el número de sitios:

$$\Pr(\text{no encontrar sitios en destino}) = \frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \quad (25)$$

De esta manera, los tiempos de espera de los usuarios quedan determinados al definir la capacidad del sistema (N_b y N_s) y la actividad de reposicionamiento (N_r). En la literatura no se han descrito modelos que describan las formas funcionales que tienen los tiempos de espera de los usuarios de los SBC. Sin embargo, se describen los tiempos de espera medios de cada usuario en el origen y en el

destino de la siguiente manera:

$$t_{eo} = f \left(\frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \right), \quad (26a)$$

$$t_{ed} = g \left(\frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \right). \quad (26b)$$

Donde f y g son funciones crecientes respecto a sus argumentos, los cuales están acotados entre 0 y 1. Al inverso del argumento del tiempo de espera en el origen se le denominará **holgura de bicicletas efectiva** mientras que al argumento del tiempo de espera en el destino se le llamará **tasa de ocupación efectiva**, la cual es siempre menor que el factor de carga máximo (NAB).

El argumento de f tiende a 0 cuando el número de bicicletas totales es mucho mayor que el número de bicicletas mínimas o bien el número de bicicletas que se reposiciona por hora es igual al número de bicicletas mínimas. En dichos casos el tiempo de espera en el origen también debiera ser nulo pues se tienen más que suficientes bicicletas para iniciar los viajes. El tiempo de espera en el origen es máximo cuando el N_b es el valor mínimo de bicicletas y el operador no realiza reposición. En este caso el argumento de f toma el valor de 1.

La tasa de ocupación efectiva tiende a 0 cuando el número de sitios es mucho mayor al número de bicicletas disponibles en los destinos o bien se reposicionan por hora todas las bicicletas no utilizadas ($N_b - N_{bm}$). En dichos casos el tiempo de espera en el destino debiera ser nulo pues encontrar sitios libre para cerrar el viaje resulta fácil. El tiempo de espera en destino es máximo cuando el número de sitios es igual al número de bicicletas no utilizadas y no se realiza reposición. En dicho caso la tasa de ocupación efectiva toma el valor de 1.

Para este modelo se mantienen el mismo tiempo de acceso y egreso de los usuarios del modelo anterior (ecuación 3) y el tiempo de viaje en bicicleta. Así, el costo de los usuarios viene dado por la ecuación (4) más las componentes de los tiempo de espera (26a) y (26b):

$$C_u = \frac{P_a Y}{2v_a} (r_L + r_W) + P_e Y \left(f \left(\frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \right) + g \left(\frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \right) \right) + \frac{P_v Y l}{v_v}, \quad (27)$$

donde P_e es el precio del tiempo de espera.

El operador recoge inteligentemente en una hora de operación las N_r/T bicicletas en las estaciones más cargadas y las deja en las estaciones en que se requieren. La ruta que la flota de camiones de reposición debe recorrer es un problema de gran complejidad (Raviv et al., 2013; Schuijbroek et al., 2017). Se asume que el costo de reposicionamiento de una bicicleta (c_r) es constante y no depende del tamaño del sistema ni del espaciamiento entre las estaciones ni del largo medio de los viajes. Así el costo de reposición (C_r) que incurre el operador al día es:

$$C_R = c_r N_r \quad (28)$$

El costo del operador viene dado por la suma de las ecuaciones (5) y (28):

$$C_o = A + N \left(c_e + c_s \frac{N_s}{N} \right) + c_b N_b + c_m Y l + c_r N_r \quad (29)$$

Finalmente, el valor de los recursos consumidos viene dado por la suma de las ecuaciones (27) y (29):

$$\begin{aligned}
VRC &= \frac{P_a Y}{2v_a}(r_L + r_W) + P_e Y \left(f \left(\frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \right) + g \left(\frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \right) \right) + \frac{P_v Y l}{v_v} \\
&+ A + \frac{LW}{r_L r_W} c_e + c_s N_s + c_b N_b + c_m Y l + c_r N_r
\end{aligned} \tag{30}$$

Las variables de diseño para este modelo son el espaciamiento (r_L y r_W), el número de bicicletas (N_b), el número de sitios (N_s) y el número de bicicletas reposicionadas (N_r). Los términos asociados al costo del tiempo de viaje en bicicleta, administración y mantenimiento son constantes; por lo tanto irrelevantes en la optimización del diseño del SBC con reposición.

Por inspección se aprecia que ni los tiempos de espera, ni el costo de reposicionamiento influyen en el número de estaciones. Debido a esto, el espaciamiento óptimo de este modelo es el mismo en ambas direcciones e igual al del modelo sin reposicionamiento. Se define r como el espaciamiento óptimo:

$$r \equiv r_L^* = r_W^* = \sqrt[3]{\frac{2c_e LW v_a}{P_a Y}} = \sqrt[3]{\frac{2c_e v_a}{P_a \rho}} \tag{31}$$

4.3.1. Formas funcionales de los tiempos de espera

Las funciones de los tiempos de espera en origen (f) y destino (g) deben ser crecientes, pues a medida que sus argumentos tienden a 1, aumentan los tiempos de espera. Cuando el argumento de los tiempos de espera es cercano a 0, ya sea porque el número de bicicletas es muy alto (en comparación al mínimo) en el origen o porque el número de sitios es muy alto (en comparación al número de bicicletas disponibles) en el destino; el efecto de eliminar una bicicleta o un sitio, respectivamente, es leve. Cuando ya se eliminan más bicicletas o sitios, el efecto marginal en el tiempo de espera comienza a ser mayor.

De esta manera, se modelan f y g como funciones potenciales:

$$t_{eo} = f \left(\frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \right) \approx \alpha \left(\frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \right)^\beta, \tag{32a}$$

$$t_{ed} = g \left(\frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \right) \approx \gamma \left(\frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \right)^\delta, \tag{32b}$$

donde $\beta, \delta \geq 1$. α y γ son parámetros que deben ser calculados. Teniendo esto en consideración, el valor de los recursos consumidos viene dado por la ecuación (33).

$$\begin{aligned}
VRC &= \frac{P_a Y r}{v_a} + P_e Y \left(\alpha \left(\frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \right)^\beta + \gamma \left(\frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \right)^\delta \right) + \frac{P_v Y l}{v_v} \\
&+ A + \frac{LW}{r^2} c_e + c_s N_s + c_b N_b + c_m Y l + c_r N_r
\end{aligned} \tag{33}$$

Así, el problema de minimización es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min}_{N_b, N_s, N_r} \quad VRC \\
 & \text{s.a.} \quad N_s - N_b \geq 0 \\
 & \quad \quad N_b - N_r/T \geq N_{bm} \\
 & \quad \quad N_{bm} - N_r/T \geq 0
 \end{aligned} \tag{34}$$

La primera restricción es equivalente a decir que el factor de carga máximo (NAB) debe ser menor o igual que 1. De esa manera se asegura que a la hora de cierre de operación del sistema, todas las bicicletas quedan ancladas en un sitio. La segunda restricción indica que el número de bicicletas reposicionadas por hora no puede ser mayor que el número de bicicletas que se encuentran libres. La última restricción limita a los tiempos de espera en el origen de manera que no sean negativos. Este es un problema de minimización no lineal con tres restricciones lineales, el cual no se puede resolver analíticamente como el modelo anterior, por lo que es necesario simular. Se resuelve numéricamente el problema planteado en la ecuación (34) con tiempos de espera lineales y cuadráticos mediante el uso del *software* AMPL mediante la rutina MINOS (Fourer, Gay y Kernighan, 2009).

De esta manera se describe la actividad de reposicionamiento en una ciudad plana en la que se producen desbalances temporales y las estaciones son de capacidad finita, modelado a través de mayores tiempos de espera de los usuarios en las estaciones de origen y de destino. El modelo reconoce: el número mínimo de bicicletas para realizar los viajes (N_{bm}), a través de los tiempos de espera; el número de sitios, a través del tiempo de espera en el destino; y el número de bicicletas junto a las bicicletas reposicionadas por hora, los cuales afectan ambos tiempos de espera.

4.4. Síntesis de la formulación

En este capítulo se han desarrollado dos modelos que describen el costo social del transporte de usuarios de un SBC ubicado en un área determinada en donde se realizan Y viajes al día en bicicleta de largo medio l conocido. El primero se basa en un sistema sin tiempos de espera ni reposicionamiento que funciona con el mínimo de bicicletas y sitios necesarios, lo que se traduce en un equilibrio permanente en que todas las bicicletas son utilizadas en todo momento. El segundo modelo se basa en otorgar holgura al número de bicicletas y sitios de manera que los tiempos de espera de los usuarios en las estaciones puedan ser minimizados a través de un sistema de mayor capacidad y/o con actividad de reposicionamiento.

En ambos modelos se obtiene que el espaciamiento óptimo es inversamente proporcional a la raíz cúbica de la demanda, resultado que proviene del compromiso entre los tiempos de acceso-egreso de los usuarios a las estaciones y los costos de las estaciones del operador. Cuando analizan un único periodo, Chang y Schonfeld (1991) obtienen que el espaciamiento entre líneas de buses de transporte público paralelas también es inversamente proporcional a la raíz cúbica de la demanda. Ellos minimizan el valor de los recursos consumidos en función del espaciamiento y del intervalo de buses (variables espacial y temporal) mientras que en este modelo se minimiza el VRC en función del espaciamiento en ambas direcciones (variables únicamente espaciales).

Las tarifas óptimas obtenidas en el modelo sin reposicionamiento son constantes. Las únicas características de los sistemas que las afectan son el periodo de operación diario y el largo medio de los viajes en bicicleta. El subsidio óptimo de M1 consta de un término asociado a la administración

del sistema, el cual se amortiza con el número de usuarios y otro asociado al costo de las estaciones el cual disminuye con la densidad de viajes.

Como se utiliza largo medio de viaje en bicicleta constante y conocido, el costo del tiempo que los usuarios andan en bicicleta no entra en el problema de optimización del diseño de ambos modelos.

La descripción de un desbalance recurrente producto de una demanda de viajes espacialmente no uniforme en la ciudad, producida por ejemplo por un grupo de estaciones arriba de un cerro, debe ser tratado en modelos espacialmente más detallados.

5. Aplicación de los modelos

En esta sección se busca evaluar los resultados de la modelación para distintos niveles de demanda con parámetros promedio, encontrados en diversas fuentes de la literatura, los cuales en conjunto no son representativos de ningún SBC en particular pero permiten mostrar el comportamiento de los modelos en una ciudad/sistema tipo.

Se evaluará un SBC con periodo de operación de 24 horas al día, largo promedio de viaje en bicicleta constante de 3,21 *km* y áreas de cobertura constantes de 26, 121 y 215 *km*². Valores que corresponden al largo promedio encontrado en la sección (3) y a la superficie mínima, promedio (del 2017) y máxima de los nueve sistemas analizados.

5.1. Parámetros

De manera de poder evaluar los resultados analíticos y numéricos para ambos modelos, se encontraron en la literatura los parámetros listados en la Tabla (13).

Tabla 13: Parámetros utilizados en los modelos 1 y 2.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades	Modelo
Velocidad de caminata ^A	v_a	5,38	[<i>km/h</i>]	1 y 2
Velocidad de bicicleta ^B	v_v	12	[<i>km/h</i>]	1 y 2
Precio del tiempo de acceso-egreso ^C	P_a	4803,9	[<i>CLP/h</i>]	1 y 2
Precio del tiempo de espera ^C	P_e	6411,9	[<i>CLP/h</i>]	2
Precio del tiempo de viaje en bicicleta ^C	P_v	5226,0	[<i>CLP/h</i>]	1 y 2
Costo fijo de una estación ^D	c_e	4369,39	[<i>CLP/dia</i>]	1 y 2
Costo de un sitio adicional ^D	c_s	956,35	[<i>CLP/dia</i>]	1 y 2
Costo de una bicicleta ^E	c_b	469,58	[<i>CLP/dia</i>]	1 y 2
Costo de mantención ^F	c_m	18,45	[<i>CLP/km</i>]	1 y 2
Costo de reposicionamiento ^G	c_r	2040	[<i>CLP</i>]	2
Costo de administración ^H	A	152548	[<i>CLP/dia</i>]	1 y 2

^A De acuerdo a Barreira, Rowe y Kang (2010).

^B La velocidad de bicicleta que utiliza el sistema de Nueva York para estimar la distancia de los viajes. <https://www.citibikenyc.com/system-data>. Revisado el 25 de octubre 2018.

^C Recopilado de Jovicic y Hansen (2003). Tasa de conversión de 1€=750CLP.

^D De acuerdo a Teng et al. (2017), el costo de una estación es de 7036USD. El costo de un sitio es de 1540USD. Asumiendo una depreciación total en tres años, mantención nula y una tasa de conversión de 1USD=680CLP.

^E De acuerdo a Midgley (2009), el costo de cada bicicleta es en promedio €725. Asumiendo una depreciación total en tres años y una tasa de conversión de 1€=750CLP.

^F De acuerdo a Zhang, Zhang, Duan y Bryde (2015), el costo de mantención por kilómetro es de 0,18 yuanes. Tasa de conversión de 1Yuan=101CLP.

^G El costo de reposición por bicicleta reportado por DeMaio (2009) es de 3USD. Tasa de conversión de 1USD=680CLP.

^H Estimación propia con datos del presupuesto 2016 de BikeSantiago.

5.1.1. Cálculo de los parámetros del tiempo de espera

El cálculo de los parámetros que describen la forma de los tiempos de espera (α y γ) se basan en el supuesto de que el tiempo de espera promedio en el origen (t_{eo}) y en el destino (t_{ed}) en el sistema de Nueva York es de un minuto en total. Se utilizó este supuesto pues se desconoce cuánto tiempo esperan los usuarios de los SBC en promedio y pareciera ser un valor verosímil. Utilizamos los datos del sistema de Nueva York para calcular α y γ , pues es el único que reporta información del número de bicicletas reposicionadas.

Las características físicas que describen los tiempos de espera del sistema de Nueva York desde el 2014 al 2017 son conocidas, salvo el número de sitios. Se asume que el número de sitios promedio por estación se mantiene constante y descargamos los datos instantáneos del sistema el día 24 de abril de 2019 donde se reporta la capacidad de cada una de las estaciones. Así, se obtuvo que N_s/N es de 31,8 sitios por estación.

En el modelo con reposicionamiento, el tiempo de espera promedio total viene dado por la suma de las ecuaciones (32a) y (32b):

$$t_{eo} + t_{ed} = \alpha \left(\frac{N_{bm} - N_r/T}{N_b} \right)^\beta + \gamma \left(\frac{N_b - N_{bm} - N_r/T}{N_s} \right)^\delta \quad (35)$$

Los parámetros de conversión a tiempo vienen dados por:

$$\alpha = t_{eo} \left(\frac{N_b}{N_{bm} - N_r/T} \right)^\beta \quad (36a)$$

$$\gamma = t_{ed} \left(\frac{N_s}{N_b - N_{bm} - N_r/T} \right)^\delta \quad (36b)$$

La Tabla (14) muestra todos los valores necesarios para calcular los factores de conversión a tiempo. Los tiempos de espera medio en origen y en destino son iguales a 30 segundos. Recordando que $N_{bm} = Yl/Tv_v$, se modelaron los tiempos de espera de manera lineal ($\beta = \delta = 1$) y de manera cuadrática ($\beta = \delta = 2$).

Tabla 14: Datos de SBC de Nueva York para el cálculo de los factores de conversión.

Año	N_{bm}	N_b	N_s	N_r/T
2014	222	5212	10367	60
2015	250	5449	11925	77
2016	454	7615	16409	112
2017	583	9150	20225	125

Fuente: elaboración propia usando datos instantáneos y reportes operacionales del SBC de Nueva York.

Los parámetros calculados se reportan en la Tabla (15). Se utilizaron los valores más altos marcados con asterisco.

Tabla 15: Parámetros de los tiempos de espera.

Año	Modelo lineal		Modelo cuadrático	
	α	γ	α	γ
2014	0,268*	0,018	8,608*	0,037
2015	0,262	0,019	8,250	0,045
2016	0,186	0,019	4,134	0,045
2017	0,166	0,020*	3,319	0,048*

*Valores utilizados.

5.2. Variables de diseño óptimas

5.2.1. Espaciamiento y número de estaciones óptimos (M1 y M2)

Las Figuras (12) y (13) comparan el espaciamiento y el número de estaciones óptimos para sistemas con área de cobertura mínima, promedio (del 2017) y máxima de las observadas, junto a las observaciones empíricas de los 9 SBC estudiados. El espaciamiento y el número de estaciones óptimos encontrados son los mismos tanto para el modelo 1 sin reposicionamiento como para el modelo 2, independiente de la forma funcional que tengan los tiempos de espera.

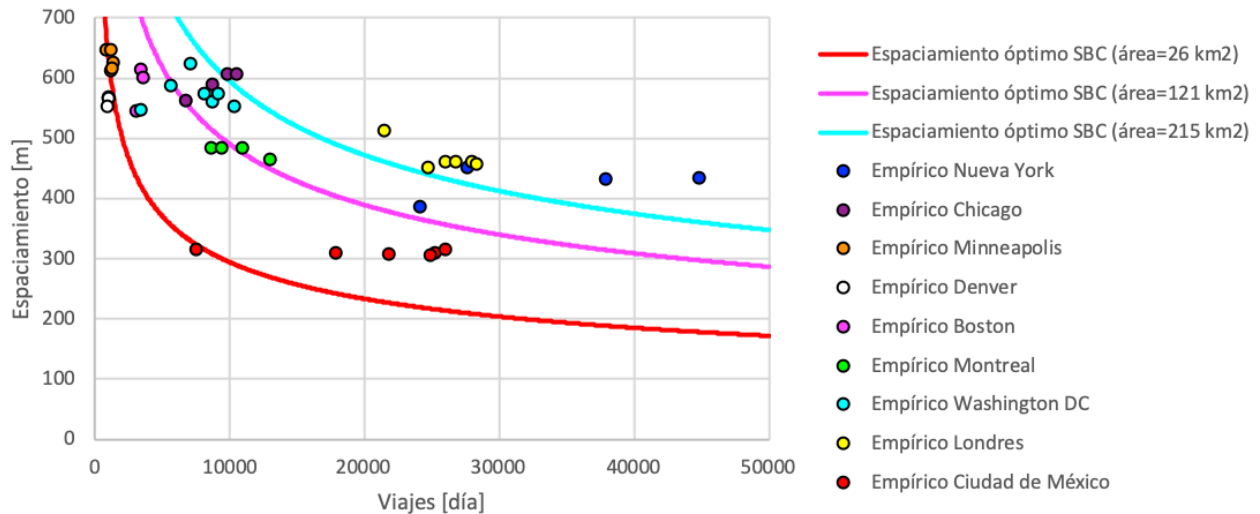


Figura 12: Espaciamiento óptimo de ciudades tipo para M1 y M2 junto a observaciones empíricas. Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos, reportes operacionales y parámetros de SBC.

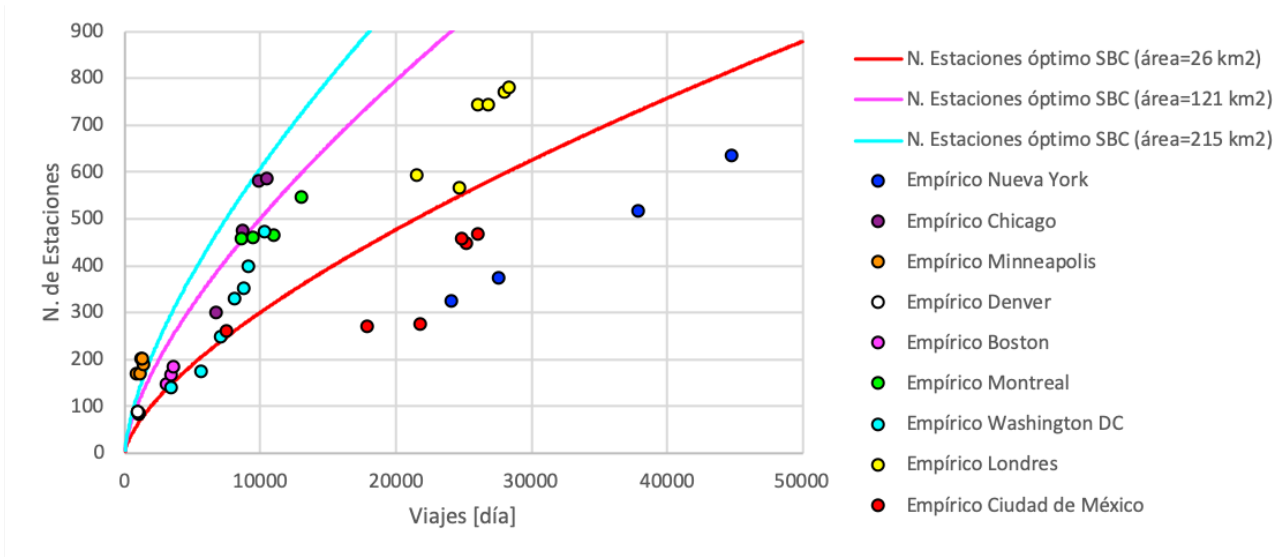


Figura 13: Número de estaciones óptimo de ciudades tipo (M1 y M2) junto a observaciones empíricas. Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos, reportes operacionales y parámetros de SBC.

Se nota que tanto para el espaciamiento como el número de estaciones óptimos describen la forma que tienen los resultados empíricos de los SBC analizados y que los resultados analíticos se encuentran cercanos a las observaciones. Se utilizaron los precios del tiempo de un estudio realizado en Dinamarca (Jovicic y Hansen, 2003), de manera que no es correcto concluir que algunos datos empíricos se alejan de los resultados óptimos.

5.2.2. Número de sitios, bicicletas y bicicletas reposicionadas óptimos (M2)

Como se vio en el modelo sin reposicionamiento, luego de la ecuación (8), el número de bicicletas y de sitios que minimiza el VRC es el número de bicicletas mínimo. Así, por construcción, el factor de carga máximo (NAB) es del 100% y $N_r = 0$.

La Figura (14) muestra los resultados numéricos obtenidos para M2 con tiempos de espera cuadráticos en términos del número de sitios, bicicletas y bicicletas reposicionadas. Adicionalmente se grafican las observaciones empíricas (número de bicicletas y bicicletas reposicionadas) de los sistemas con mayor número de viajes (Nueva York, Londres y Ciudad de México) y el número de bicicletas mínimo, de manera de comparar los resultados obtenidos con el modelo sin reposicionamiento (M1).

Utilizando los parámetros promedio encontrados, para cualquiera de las dos formas funcionales de los tiempos de espera, N_b y N_s resultan crecientes con el número de viajes y no se obtienen bicicletas reposicionadas ($N_r = 0$). El factor de carga máximo se mantiene constante para cualquier número de viajes: 96% cuando se utiliza tiempos lineales, alejándose de los valores descritos en la literatura; y 70% con tiempos cuadráticos, levemente superior al reportado por O'Brien et al. (2014). De esta manera, el modelo con tiempos lineales no describe adecuadamente el comportamiento de los sistemas.

Debido a que el NAB se mantiene constante a medida que aumenta el número de viajes y el reposicionamiento es nulo, se concluye que los tiempos de espera se mantienen constantes. El tiempo de espera en el origen es de 103 segundos mientras que en el destino es de 74 segundos, los cuales

resultan elevados en comparación con los valores de entrada utilizados en el cálculo de los parámetros α y γ (30 segundos cada uno).

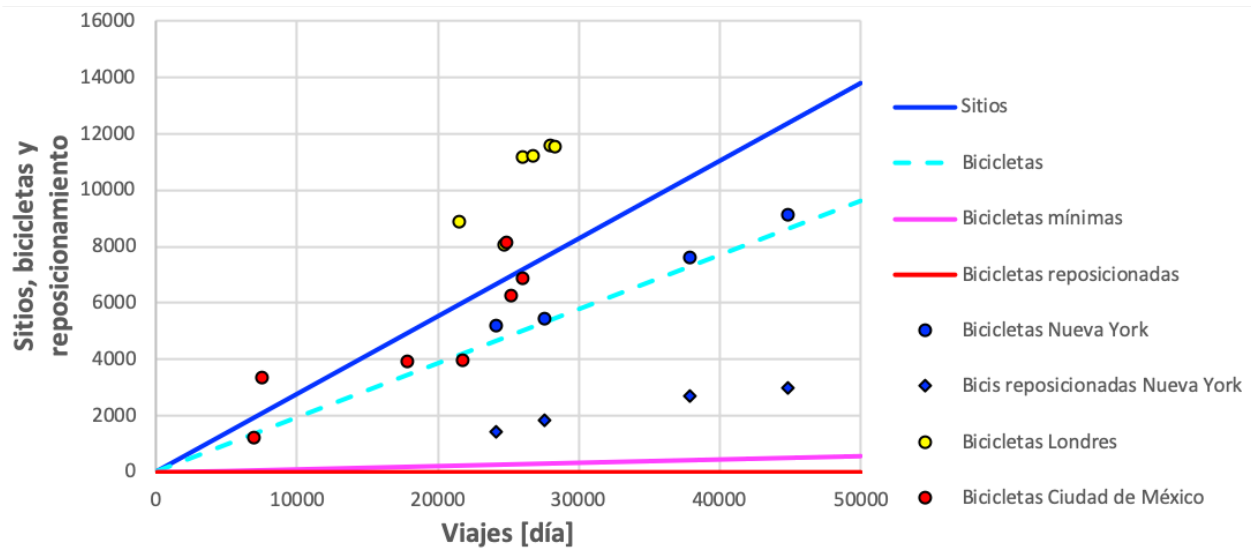


Figura 14: Número de sitios, bicicletas y bicicletas reposicionadas óptimos y empíricos con tiempos de espera cuadráticos. Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos, reportes operacionales y parámetros de SBC.

5.3. Subsidios y tarifas óptimas

La Figura (15) muestra la forma constante que tienen las tarifas óptimas en el modelo 1 (ecuación 21) junto a distintos niveles de subsidios óptimos dependiendo del tamaño del SBC (ecuación 22), los cuales son decrecientes.

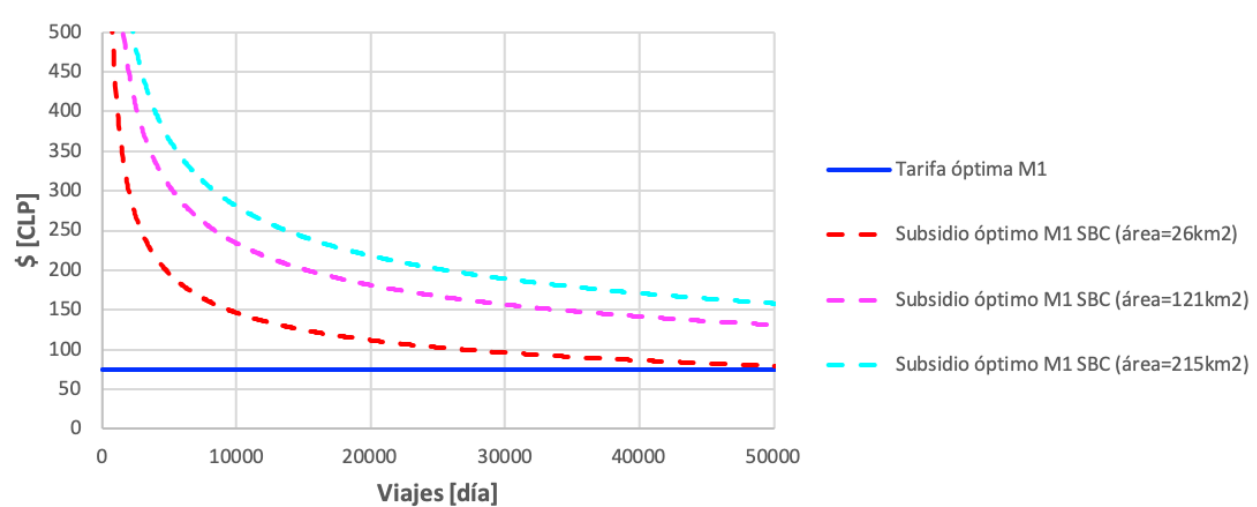


Figura 15: Tarifa y subsidios óptimos en modelo sin reposición para SBC de distinto tamaño. Fuente: elaboración propia usando parámetros de SBC.

Las tarifas y subsidios óptimos (calculados numéricamente) del modelo con reposicionamiento y tiempos de espera cuadráticos se muestran en la Figura (16). Como se puede notar cuando se tienen número de viajes pequeños, las tarifas obtenidas tienen pequeñas diferencias, las que son atribuibles al cálculo numérico. A medida que aumentan los viajes las tarifas se hacen constantes e iguales, independientemente del tamaño del sistema modelado.

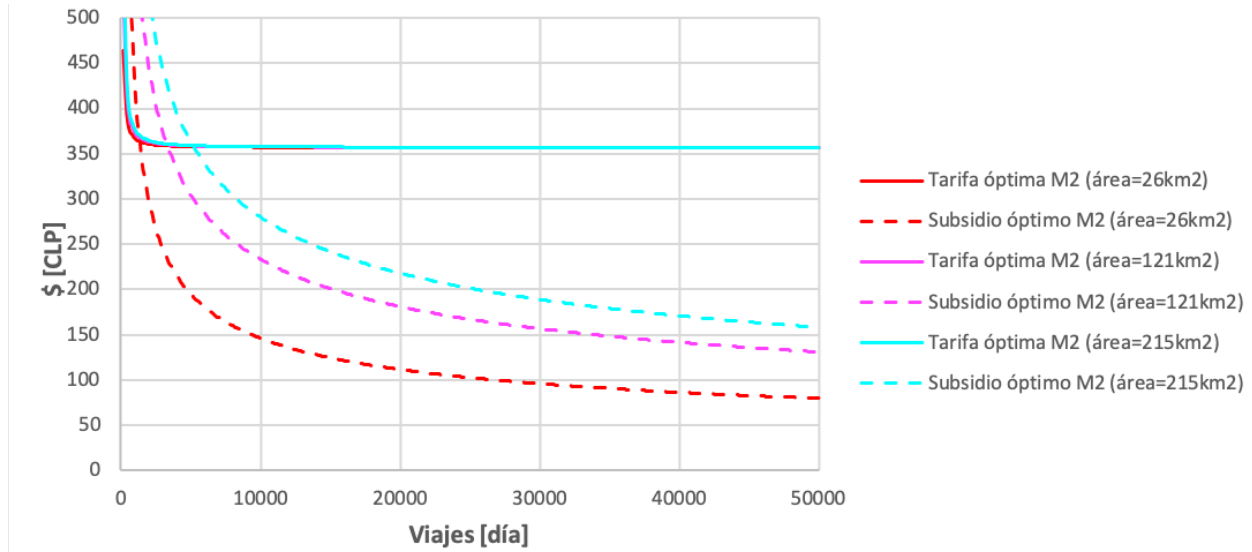


Figura 16: Tarifas y subsidios óptimos en modelo con reposición y tiempos de espera cuadráticos para SBC de distinto tamaño. Fuente: elaboración propia usando parámetros de SBC.

Como se puede notar, los subsidios tanto para M1 como para M2, son idénticos. Esto se debe a que las economías de escala están causadas principalmente por: la amortización del costo de administración; y el compromiso entre el tiempo medio de acceso/egreso y el costo de las estaciones. Respecto a las tarifas, estas resultan mayores en el modelo que considera reposición debido a la consideración de los tiempos de espera y al resultado óptimo de un sistema de mayor capacidad (mayor número de bicicletas y de sitios en comparación a M1).

5.4. Sensibilidad bicicletas reposicionadas versus costo de las bicicletas

Al observar la ecuación (33) se puede notar que existe un compromiso entre los costos de reposicionar una bicicleta (c_r) y de comprar una bicicleta (c_b), a través del tiempo de espera. Utilizando los parámetros promedio se obtiene reposicionamiento nulo, lo que refleja que el costo de reposicionar no compensa la disminución de los tiempos de espera en el origen ni en el destino, prefiriéndose aumentar el número de bicicletas y de sitios. Esto a pesar de haber utilizado los mayores valores de conversión del tiempo de espera (α y γ) listados en la Tabla (15), los que aumentan dichos tiempos favoreciendo la reposición.

El costo de las bicicletas varía dependiendo de sus prestaciones. De acuerdo a Midgley (2009), el precio de una bicicleta varía entre los 250 y los 1.200 euros. Considerando depreciación total en tres años y tasa de conversión de $1\text{€} = 750\text{ CLP}$ el costo de una bicicleta puede ser de un máximo de 821,92 [CLP/día]. Por otro lado, el costo de reposición de una bicicleta en el sistema de París reportado por DeMaio (2009) es de 3 dólares, el cual parece bastante alto. Si se considerara un SBC menos

extenso, en una ciudad con un mercado laboral más barato, se podría llegar verosímilmente a un costo de 2 dólares por bicicleta reposicionada. Considerando una tasa de conversión de 1 *USD*=680 *CLP* se obtiene un costo de 1.360 *CLP* por bicicleta reposicionada.

De esta manera se analiza el compromiso entre el número de bicicletas y el reposicionamiento, aumentando el costo de las bicicletas y disminuyendo el de reposición. La Figura (17) muestra los resultados obtenidos en términos del número de sitios, bicicletas y bicicletas reposicionadas. El resultado óptimo en esta situación es un sistema de baja capacidad (el doble del mínimo de bicicletas) con una alta reposición. El modelo reposiciona lo máximo que le permite la segunda restricción, es decir que se reposicionan todas las bicicletas disponibles. Adicionalmente, se activa la primera restricción de manera que el factor de carga máximo es del 100%. La tasa de ocupación efectiva es del 0%. Esto indica que al finalizar la operación del sistema no queda ningún sitio sin bicicletas y que el tiempo de espera en el destino es bajo (6 segundos). El tiempo de espera en el origen es de 2 segundos.

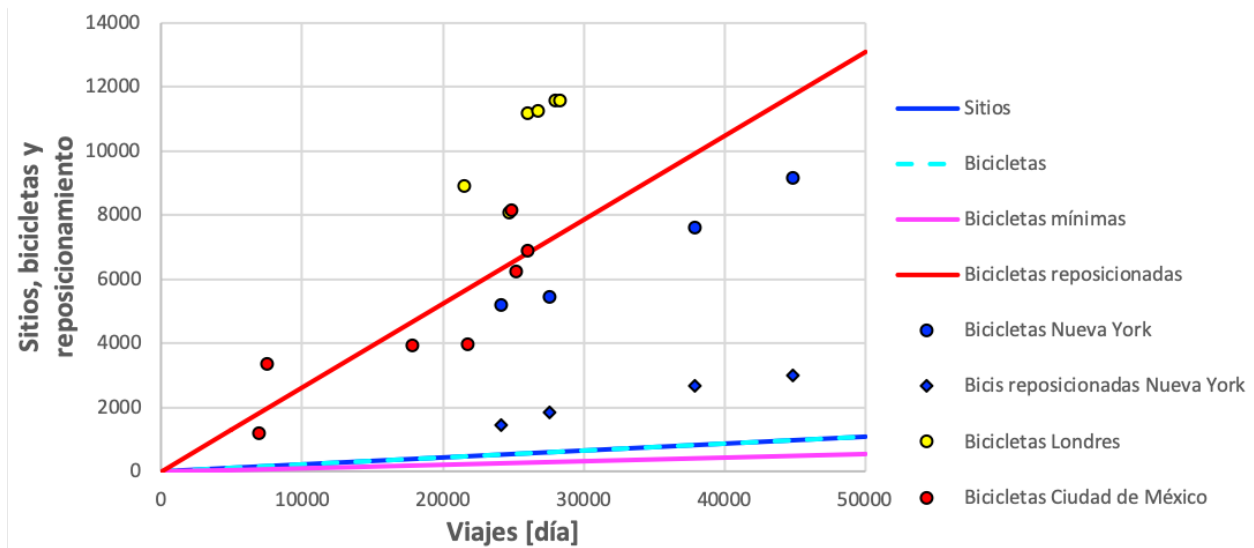


Figura 17: Número de sitios, bicicletas y bicicletas reposicionadas óptimos y empíricos con tiempos de espera cuadráticos. Fuente: elaboración propia usando datos de viajes históricos, reportes operacionales y parámetros de SBC alternativos.

La Figura (18) muestra los resultados óptimos de tarifas y subsidios bajo los parámetros alternativos. Se obtienen los mismos subsidios que para M2 con parámetros promedio, pero ahora las tarifas son 100 pesos mayores. Esto se debe a que la disminución del costo de las bicicletas y sitios totales no alcanza a compensar el aumento del costo de reposición.

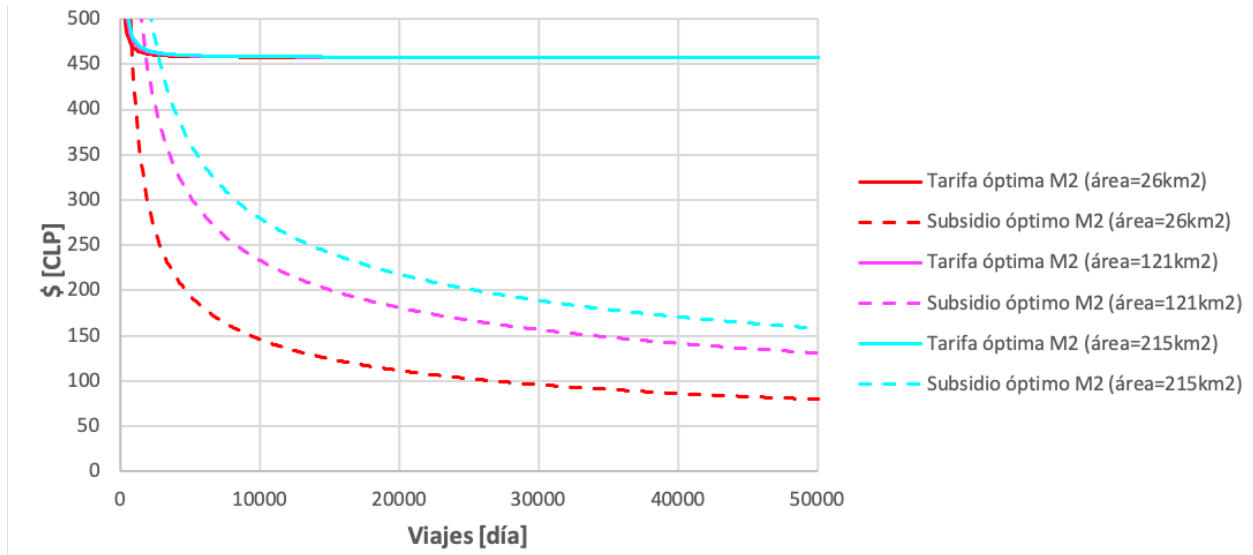


Figura 18: Tarifas y subsidios óptimos en modelo con reposición y tiempos de espera cuadráticos para SBC de distinto tamaño. Fuente: elaboración propia usando parámetros de SBC alternativos.

6. Discusión y extensión de los modelos

Los modelos desarrollados permiten la descripción de un SBC de tercera generación ubicado en un área constante de una ciudad en donde se distribuyen de manera uniforme viajes en bicicleta de largo medio conocido. Para ambos modelos se obtuvo funciones analíticas del espaciamiento y del número de estaciones óptimos, variables que al evaluarse con parámetros promedio encontrados en la literatura, describen el comportamiento y son cercanos a los valores empíricos de los sistemas analizados.

La incorporación de la actividad de reposicionamiento en el modelo 2 mediante los tiempos de espera de los usuarios, en las estaciones al iniciar/terminar sus viajes en bicicleta, resulta novedosa y astuta, pues simplifica a través de una única variable –el número de bicicletas reposicionadas– una actividad espacial y temporal compleja. Por otro lado, la incorporación de los tiempos de espera otorga mayor capacidad a los sistemas, aumentando tanto la holgura de las bicicletas como el factor de carga máximo.

En el modelo 1 se obtuvo expresiones de tarifa y subsidio óptimos. A medida que aumenta el número de viajes, la tarifa es constante pero los subsidios son decrecientes producto de dos fuentes de economías de escala: el costo de administración del sistema el cual se amortiza entre más usuarios (como las vías de un tren en transporte público); y el compromiso entre el costo de las estaciones y la reducción del tiempo de acceso/egreso a ellas. Al comparar los subsidios del M1 con los subsidios obtenidos numéricamente del M2, se puede decir que estas son las únicas fuentes de economía de escala en el modelo con reposicionamiento, pues se obtienen los mismos resultados. Las tarifas en cambio son mayores en el modelo con reposicionamiento, pues se agregan nuevas componentes a la función objetivo.

En este trabajo se utilizaron parámetros promedio encontrados en la literatura, los cuales no representan ninguna ciudad en particular. Se debe trabajar con los parámetros de una ciudad si se quiere optimizar el diseño de su SBC. Se modeló la operación diaria de un SBC sin dar cuenta de los periodos punta en que se requiere un sistema de mayor capacidad. Desarrollos futuros debieran considerar dicho efecto.

Se utilizó un costo de reposicionamiento constante en el segundo modelo, independiente del espaciamiento entre estaciones o del tamaño del sistema. Esta asunción también debe ser estudiada con más detalle en trabajos futuros pues si el operador reposiciona bicicletas entre estaciones cercanas, seguramente repercutirá en menores costos de reposición por bicicleta y se tendría un incentivo para instalar más estaciones y/o tener menos bicicletas. La decisión de mover bicicletas vacías por parte del operador entre estaciones cercanas o lejanas depende de la naturaleza del origen del desbalance. En este trabajo los desbalances se deben a la capacidad limitada de las estaciones. Sin embargo, en las ciudades existen situaciones en que se producen desequilibrios recurrentes debido a viajes asimétricos producto de diferencias en la distribución de los viajes permanentes o a condiciones topográficas dominantes, los cuales este modelo no es capaz de capturar. La modelación de la actividad de reposicionamiento debido a dichas situaciones debe ser estudiada en detalle.

De acuerdo a Vogel y Mattfeld (2010) el efecto de no poder anclar una bicicleta en la estación de destino produce en los usuarios mayor frustración que no poder iniciar un viaje por falta de bicicletas en la estación de origen. Esto debido a que terminado el tiempo base del uso de la bicicleta, típicamente 30 minutos, el operador cobra tarifas proporcionalmente mayores al tramo anterior. Esto hace presumir que los usuarios de los sistemas de tercera generación tienen precios de tiempo de espera

distintos, donde el precio de tiempo de espera en el destino es más oneroso que en el de origen. Resulta interesante la incorporación de este efecto en próximos estudios, para lo cual será necesario extender la investigación del valor del tiempo de espera de los usuarios.

6.1. Los SBC de cuarta generación

En los sistemas de bicicletas compartidas de cuarta generación (*Mobike*), se tiene que el tiempo de egreso será nulo ya que los usuarios podrán dejar las bicicletas en el destino de su viaje y prácticamente no tendrán que caminar. El tiempo de espera en el destino también será nulo porque estas bicicletas no requieren de un sitio libre en una estación para terminar el viaje; el sistema de anclaje se encuentra integrado en la bicicleta.

Los modelos desarrollados en la sección (4) presentan desafíos para representar adecuadamente los sistemas de cuarta generación, debido a que nacen de un modelo con estaciones (ver Figura 11). Si el modelo contara con una única estación de infinitos sitios, cada uno donde se pueda dejar una bicicleta, se tendría que el espaciamiento vertical y horizontal sería igual al largo y ancho de la ciudad. Esto se traduciría en tiempos de acceso mayores a los reales, pues significaría que todos los usuarios tengan que ir al centro de la ciudad a buscar una bicicleta. Si se dice en cambio que ahora el sistema cuenta con infinitas estaciones de un solo sitio cada una, se tendrá que $r_L = r_W = 0$, lo que implica un tiempo de acceso nulo, lo que sería correcto sólo si se tuvieran infinitas bicicletas. En un modelo de cuarta generación, el número de bicicletas disponibles pasa a determinar el tiempo de acceso de los usuarios.

Cabe destacar que algunos sistemas de cuarta generación permiten reservar mediante su aplicación una bicicleta por un tiempo máximo de 15 minutos, evitando que otro usuario la utilice. Esto tiene como consecuencia una disminución en el tiempo de espera en el origen para quien planifica con anterioridad su viaje y reserva la bicicleta. Pero para quien no lo hace, es esperable un mayor tiempo de espera. El efecto de encontrar una bicicleta en la calle, la cual no es utilizable porque ha sido reservada por otro usuario, puede generar desafección por el sistema en algunos usuarios. Es necesario ahondar en estos efectos al igual que en el beneficio que trae para el operador conocer con anterioridad la demanda de bicicletas y hacer más precisa la actividad de reposicionamiento en tiempo real.

Si un sistema de tercera generación se transforma a uno sin estaciones, es esperable que si se mantiene el número de bicicletas, estas queden mejor distribuidas por lo que el tiempo de acceso debería ser menor que con la previa generación. El largo del viaje en bicicleta de cada usuario va a cambiar, pero es esperable que el largo medio del viaje en bicicleta (l) se mantenga constante. De esta manera, los viajes se realizarán de manera más rápida ($v_a < v_v$), lo que debiera implicar una disminución en el tiempo de espera en el origen.

Si bien los desbalances producto de las condiciones topográficas o viajes cargados en una sola dirección deberán ser solucionados mediante actividad de reposicionamiento en cualquier generación de sistema, existen razones para creer que dicha actividad será mayor en los SBC de cuarta generación. Los usuarios de los sistemas de tercera generación tienen que terminar su viaje en una estación, mientras que en los sistemas *dockless* un usuario puede bloquear su bicicleta fuera del área de operación, la cual deberá ser buscada por el equipo de reposicionamiento. Si la actividad de reposicionamiento de los SBC de cuarta generación es mayor que la de los sistemas con estaciones, entonces también se espera que este efecto influya en un mayor número de bicicletas en el sistema.

6.2. Bicicletas asistidas eléctricamente

Algunos sistemas de Bicicletas Compartidas como los de Barcelona y Nueva York, están incorporando bicicletas con asistencia eléctrica. Las denominadas *pedelecs* permiten aumentar la velocidad de las bicicletas y su radio de acción; cierran tanto las brechas de género como de edad; suavizan los cerros; y quitan el sudor de los ciclistas (Bruntlett y Bruntlett, 2018). La incorporación de estas bicicletas en los SBC es novedosa y no se ha masificado todavía, de manera que se tiene una nueva área por estudiar. Los beneficios de los *pedelecs* en los SBC se traducirán en nuevos usuarios y más viajes. Los nuevos viajes se deben a la llegada de nuevos usuarios que antes les era muy agotador andar en bicicleta como también a los antiguos usuarios que ahora podrán realizar viajes que antes eran muy largos para hacerlos en bicicleta.

Esta mejora tecnológica traerá un nuevo impulso para los SBC de tercera generación que en los últimos años se han visto en aprietos por la masificación de los sistemas sin estaciones en varias ciudades (Gu et al., 2019). Si ambos tipos de sistemas incorporan bicicletas eléctricas, aquellos con estaciones podrán cargarlas en los mismos sitios, sin la necesidad de empleados dedicados a recolectarlas, transportarlas, cargarlas y distribuirlas a diferencia de los sistemas sin estaciones⁸. Si el costo de reposicionamiento en los sistemas de tercera generación es considerado como uno de los principales costos operacionales, entonces el costo de cargar las baterías de las bicicletas eléctricas sin estaciones será aún mayor. Este se podría ver reducido si las baterías de las bicicletas son desmontables⁹, pero de igual manera requerirá de trabajadores encargados de intercambiar las baterías vacías por las cargadas.

Otro efecto que traerá la incorporación de bicicletas eléctricas en los SBC es la mejora de la distribución de las mismas en el espacio en aquellas ciudades donde hasta ahora se tienen desbalances recurrentes producto de una demanda espacialmente no homogénea debido a condiciones topográficas dominantes (cerros). Esto se traducirá en una disminución de las bicicletas reposicionadas y en el costo asociado a este aspecto.

El hecho de que una bicicleta se cargue en un sitio de una estación podría imposibilitar el uso de la bicicleta y limitar el número de sitios disponibles mientras la batería se esté cargando. Este efecto se debiera traducir en sistemas de mayor capacidad (más bicicletas y más sitios). Debido a la incorporación de mayor tecnología, energía eléctrica, desarrollo de mayores velocidades en las bicicletas, mayor cantidad de viajes y más largos; es esperable que el costo de las bicicletas y su mantención aumente. Las estaciones requerirán de alimentación eléctrica por lo que serán más caras de instalar y operar. Esto, sumado al mayor número de sitios puede resultar en una disminución en el número de estaciones y por ende en un mayor tiempo de acceso-egreso de los usuarios. Finalmente, el tiempo de viaje en bicicleta se verá disminuido por la mayor velocidad de las bicicletas.

Desde el punto de vista de la salud, la incorporación de bicicletas eléctricas en los SBC produce impactos menos favorables ya que estas imponen un menor esfuerzo físico para los usuarios (Otero et al., 2018); aumentan la velocidad y con ello la probabilidad y las consecuencias de los accidentes; y dependiendo de la forma de producción de la electricidad que utilizan, pueden generar impactos medioambientales.

Los camiones que reposicionan las bicicletas generan externalidades negativas de congestión y

⁸ Los *scooters* eléctricos de la empresa *Lime* requieren de un gran número de colaboradores que recolectan, cargan y distribuyen los vehículos durante las noches.

⁹ Los *scooters* eléctricos de la empresa *Scoot*, a diferencia de los de *Lime*, tienen baterías desmontables.

contaminación, tanto atmosférica como acústica. Estas han cuestionado los reales beneficios de los SBC en las ciudades (Raviv et al., 2013). De la misma forma, la flota de camiones encargada de recolectar las bicicletas descargadas y dejar las cargadas, o intercambiar las baterías vacías por las llenas, pueden generar cuestionamientos adicionales.

7. Conclusiones

Este trabajo de título desarrollan dos modelos estructurales que permite diseñar óptimamente los Sistemas de Bicicletas Compartidas (SBC) de tercera generación, es decir aquellos que cuentan con estaciones donde los usuarios deben buscar y devolver las bicicletas, con la finalidad de calcular las tarifas y subsidios óptimos. Para ello, se adaptó la metodología de tarificación óptima, utilizada en Transporte Público, minimizando la suma de los costos de los operadores y usuarios de un SBC en el que los viajes en bicicleta se distribuyen de manera uniforme en un área de una ciudad plana.

Tras una exhaustiva recopilación y síntesis de la literatura sobre las características, modelación y uso de los datos de los SBC, se concluyó que las características básicas que describen el funcionamiento de estos sistemas son la localización y número de las estaciones, el número bicicletas, sitios y la cantidad de bicicletas reposicionadas. Se describió, con base en los datos empíricos de nueve SBC de tercera generación de distintas ciudades, el crecimiento en densidad y extensión espacial. Se concluyó que la densidad de las estaciones, el número de bicicletas y de sitios por estación se mantienen constantes en los sistemas, al igual que el largo medio de los viajes. Se confirmó además que la reposición de bicicletas es una actividad importante.

Se desarrollaron dos modelos que describen un SBC de una ciudad plana con demanda uniforme y largos de viaje constantes. El primero considera el compromiso entre el tiempo de acceso-egreso y el número de estaciones. Al no incorporar tiempos de espera de los usuarios en las estaciones, ya sea para buscar una bicicleta o para dejarla, el operador no realiza actividad de reposicionamiento. La minimización del valor de los recursos consumidos resulta en el número de bicicletas y sitios mínimos necesarios para cubrir la demanda, un factor de carga del 100 % y un estado de equilibrio permanente en que todas las bicicletas son constantemente utilizadas. Se obtuvieron resultados analíticos para el número de estaciones y su espaciamiento óptimos, los que se comportan de manera similar a los valores empíricos de los nueve sistemas descritos. Se calculan los subsidios óptimos para este modelo, los cuales son decrecientes, y la tarifa óptima resulta constante.

El segundo modelo incorpora tiempos de espera de los usuarios en las estaciones de origen, producto de que no encuentran bicicletas; y en las estaciones de destino, debido a que no encuentran sitios libres donde dejarlas. La actividad de reposicionamiento se describe mediante un costo para el operador producto de las bicicletas que debe mover inteligentemente desde las estaciones en que no se necesitan a aquellas en que faltan; las que a su vez disminuyen los tiempos de espera de los usuarios. Debido a que los nuevos términos de esta formulación no afectan el compromiso entre el costo de las estaciones y los tiempos de acceso-egreso, se obtiene el mismo espaciamiento y número de estaciones óptimos que en el modelo anterior. Debido a la no linealidad de la función objetivo del problema de minimización, no se pueden obtener resultados analíticos de las variables de diseño, ni las expresiones de subsidios y tarifas óptimas. Así, este modelo se resolvió numéricamente para tiempos de espera (en origen y destino) lineales y cuadráticos.

Utilizando parámetros promedio encontrados en la literatura, el modelo con tiempos lineales resulta tener una proporción entre bicicletas y sitios (NAB) muy alta – del 96 %–, de manera que se adoptó el modelo con tiempos cuadráticos con $NAB=70\%$, levemente superior a lo informado en la literatura. Con estos parámetros no se obtiene reposicionamiento, de manera que se utilizan alternativos obteniéndose la máxima reposición que permite una restricción del problema de minimización.

Los subsidios óptimos obtenidos son iguales tanto en el modelo básico, como en los modelos con reposicionamiento. Estos provienen de de la amortización del costo de administración del sistema y

de las economías de escala provenientes del compromiso del tiempo de acceso/egreso de los usuarios y el costo de las estaciones. Las tarifas óptimas son constantes, pero mayores cuando el modelo considera tiempos de espera y reposición.

Finalmente, se describen las modificaciones que se deben incorporar al utilizar los modelos planteados para representar los SBC de cuarta generación, es decir aquellos que no tienen estaciones. Se pronostican algunos efectos que tendría la incorporación de bicicletas eléctricas en ambos tipos de sistemas.

El trabajo desarrollado incluyó los compromisos entre el número de estaciones con el tiempo de acceso-egreso; y el número de bicicletas, bicicletas reposicionadas y el número de sitios, con los tiempos de espera. Nuevos compromisos deben ser analizados, junto con estudiar en mayor profundidad los tiempos de espera de los usuarios en las estaciones. Es necesario avanzar a un modelo más comprensivo que permita representar también los desbalances debido a viajes recurrentes cargados en un sólo sentido producto de la topografía o de los periodos punta en los sistemas. Para ello será necesario desagregar espacial y temporalmente los viajes en bicicleta y analizarlos de acuerdo a las matrices origen-destino.

La flexibilidad que trae el uso de la bicicleta en el viaje de los usuarios que utilizan los SBC no se ve representada en este tipo de modelos. El efecto de que los usuarios caminen adicionalmente a otra estación debido a que la más cercana al origen se encuentra sin bicicletas, o que realicen viajes más largos debido a que la estación más cercana al destino se encuentra sin sitios disponibles, no fue estudiado. La mayoría de los viajes en SBC provienen de la caminata o del transporte público, lo que los hace modos competitivos. Se debe avanzar hacia un modelo transporte público-caminata-SBC.

Considerando únicamente el compromiso entre el tiempo de acceso-egreso y el costo de las estaciones, se obtuvieron resultados auspiciosos en relación a subsidios óptimos. Si se consideraran además todos los beneficios sociales que trae el mayor uso de la bicicleta en las ciudades, como los beneficios en salud, contaminación y congestión; se tendrían incentivos adicionales para subsidiar los SBC. La incorporación de bicicletas eléctricas podría diluir los beneficios de salud pues su uso requiere menor actividad física y podrían producir más accidentes. Finalmente, desde un punto de vista de políticas públicas, los tomadores de decisión debieran considerar la localización de los SBC también en comunas de menores ingresos, de manera tal que los subsidios no sean regresivos.

Bibliografía

- Allport, R. J. (1981). The costing of bus, light rail transit and metro public transport systems. *Traffic Engineering & Control*, 22(HS-032 837).
- Almannaa, M., Elhenawy, M. y Rakha, H. (2019, 14 de febrero). Identifying Optimum Bike Station Initial Conditions using Markov Chain Modeling. *Transport Findings*. doi:10.32866/6801
- Austwick, M. Z., O'Brien, O., Strano, E. y Viana, M. (2013). The structure of spatial networks and communities in bicycle sharing systems. *PloS one*, 8(9), e74685.
- Bargar, A., Gupta, A., Gupta, S. y Ma, D. (2014). Interactive visual analytics for multi-city bikeshare data analysis. En *The 3rd International Workshop on Urban Computing (UrbComp 2014)*, New York, USA (Vol. 45).
- Barreira, T. V., Rowe, D. y Kang, M. (2010). Parameters of walking and jogging in young adults. *International Journal of Exercise Science*, 3(1), 4-13.
- Basso, L. J. y Jara-Díaz, S. R. (2010). The case for subsidisation of urban public transport and the Mohring effect. *Journal of Transport Economics and Policy (JTPEP)*, 44(3), 365-372.
- BiciLasCondes. (2019). ¿Qué es Bici Las Condes? Recuperado el 16 de mayo de 2019, desde <https://www.bicilascondes.cl/es/servicio/que-es-bici-las-condes>
- BikeSantiago. (2019). Página de inicio. Recuperado el 16 de mayo de 2019, desde <https://www.bikesantiago.cl/>
- Borgnat, P., Abry, P., Flandrin, P., Robardet, C., Rouquier, J.-B. y Fleury, E. (2011). Shared bicycles in a city: A signal processing and data analysis perspective. *Advances in Complex Systems*, 14(03), 415-438.
- Boyd, J. H., Asher, N. J. y Wetzler, E. S. (1978). Nontechnological innovation in urban transit: A comparison of some alternatives. *Journal of Urban Economics*, 5(1), 1-20.
- Bruntlett, M. y Bruntlett, C. (2018). *Building the Cycling City: The Dutch Blueprint for Urban Vitality*. Island Press.
- Chang, S. K. y Schonfeld, P. M. (1991). Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(6), 453-478.
- DeMaio, P. (2009). Bike-sharing: History, impacts, models of provision, and future. *Journal of public transportation*, 12(4), 3.
- Faghih-Imani, A. y Eluru, N. (2016). Incorporating the impact of spatio-temporal interactions on bicycle sharing system demand: A case study of New York CitiBike system. *Journal of Transport Geography*, 54, 218-227.

-
- Fishman, E. (2016). Bikeshare: A review of recent literature. *Transport Reviews*, 36(1), 92-113.
- Fishman, E., Washington, S. y Haworth, N. (2013). Bike share: a synthesis of the literature. *Transport reviews*, 33(2), 148-165.
- Fourer, R., Gay, D. M. y Kernighan, B. W. (2009). *AMPL a modeling language for mathematical programming*. Brooks/Cole.
- Froehlich, J. E., Neumann, J. y Oliver, N. (2009). Sensing and predicting the pulse of the city through shared bicycling. En *Twenty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J. y Latorre, M. (2012). Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: a GIS approach. *Applied Geography*, 35(1-2), 235-246.
- Gu, T., Kim, I. y Currie, G. (2019). To be or not to be dockless: Empirical analysis of dockless bikeshare development in China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 119, 122-147.
- Heymes, C. y Levinson, D. (2018). Dockless in Sydney: The Rise and Decline of Bikesharing in Australia.
- Jansson, J. O. (1980). A simple bus line model for optimisation of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economics and Policy*, 53-80.
- Jara-Díaz, S. R. y Gschwender, A. (2003). Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. *Transport Reviews*, 23(4), 453-469.
- Jara-Díaz, S. R. y Gschwender, A. (2005). Making Pricing Work in Public Transport. *Handbooks in Transport*, 6.
- Jara-Díaz, S. R. y Gschwender, A. (2009). The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services. *Transportation*, 36(1), 65-75.
- Jovicic, G. y Hansen, C. O. (2003). A passenger travel demand model for Copenhagen. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(4), 333-349.
- Kaltenbrunner, A., Meza, R., Grivolla, J., Codina, J. y Banchs, R. (2010). Urban cycles and mobility patterns: Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system. *Pervasive and Mobile Computing*, 6(4), 455-466.
- Larsen, J. (2013). Bike-sharing programs hit the streets in over 500 cities worldwide. *Earth Policy Institute*, 25(1).
- Lin, J.-R. y Yang, T.-H. (2011). Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 47(2), 284-294.

-
- Lohry, G. F. y Yiu, A. (2015). Bikeshare in China as a public service: Comparing government-run and public-private partnership operation models. En *Natural Resources Forum* (Vol. 39, 1, pp. 41-52). Wiley Online Library.
- Midgley, P. (2009). The role of smart bike-sharing systems in urban mobility. *Journeys*, 2(1), 23-31.
- Mobike. (2019). Mobike Launches Chile. Recuperado el 16 de mayo de 2019, desde <https://mobike.com/global/blog/post/mobike-chile-launch>
- MTT. (2019). Presentamos resultados de la Encuesta Origen Destino de Santiago. Recuperado el 16 de mayo de 2019, desde <http://www.mtt.gob.cl/archivos/10194>
- O'Brien, O., Cheshire, J. y Batty, M. (2014). Mining bicycle sharing data for generating insights into sustainable transport systems. *Journal of Transport Geography*, 34, 262-273.
- Oja, P., Titze, S., Bauman, A., De Geus, B., Krenn, P., Reger-Nash, B. y Kohlberger, T. (2011). Health benefits of cycling: a systematic review. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(4), 496-509.
- O'Mahony, E. y Shmoys, D. B. (2015). Data analysis and optimization for (citi) bike sharing. En *Twenty-ninth AAAI conference on artificial intelligence*.
- Otero, I., Nieuwenhuijsen, M. y Rojas-Rueda, D. (2018). Health impacts of bike sharing systems in Europe. *Environment international*, 115, 387-394.
- Raviv, T., Tzur, M. y Forma, I. A. (2013). Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2(3), 187-229.
- Romanillos, G., Zaltz Austwick, M., Ettema, D. y De Kruijf, J. (2016). Big data and cycling. *Transport Reviews*, 36(1), 114-133.
- Romero, J. P., Ibeas, A., Moura, J. L., Benavente, J. y Alonso, B. (2012). A simulation-optimization approach to design efficient systems of bike-sharing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 646-655.
- Sayarshad, H., Tavassoli, S. y Zhao, F. (2012). A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization. *Applied Mathematical Modelling*, 36(10), 4944-4951.
- Schuijbroek, J., Hampshire, R. C. y Van Hoes, W.-J. (2017). Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems. *European Journal of Operational Research*, 257(3), 992-1004.
- Shaheen, S., Guzman, S. y Zhang, H. (2010). Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: past, present, and future. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2143), 159-167.

-
- Sivakumaran, K., Li, Y., Cassidy, M. y Madanat, S. (2014). Access and the choice of transit technology. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59, 204-221.
- Tang, Y., Pan, H. y Shen, Q. (2011). *Bike-sharing systems in Beijing, Shanghai, and Hangzhou and their impact on travel behavior*.
- Tech, V. (2012). Capital bikeshare study: A closer look at casual users and operation. *Virginia Tech, Arlington*.
- Teng, H., Kutela, B., Mulokozi, E., Hu, B., Jiao, Y. y Li, H. (2017). Feasibility study of a campus-based bikesharing program at UNLV.
- Vogel, P. y Mattfeld, D. C. (2010). Modeling of repositioning activities in bike-sharing systems. En *World conference on transport research (WCTR)*.
- Wood, J., Slingsby, A. y Dykes, J. (2011). Visualizing the dynamics of London's bicycle-hire scheme. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 46(4), 239-251.
- Woodcock, J., Tainio, M., Cheshire, J., O'Brien, O. y Goodman, A. (2014). Health effects of the London bicycle sharing system: health impact modelling study. *Bmj*, 348, g425.
- Zhang, L., Zhang, J., Duan, Z.-y. y Bryde, D. (2015). Sustainable bike-sharing systems: characteristics and commonalities across cases in urban China. *Journal of Cleaner Production*, 97, 124-133.
- Zhao, J., Deng, W. y Song, Y. (2014). Ridership and effectiveness of bikesharing: The effects of urban features and system characteristics on daily use and turnover rate of public bikes in China. *Transport Policy*, 35, 253-264.