



Diseño de estrategias para el reposicionamiento de unidades en Sistemas Públicos de Bicicletas

Miguel Angel Arroyave Guerrero

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2017

Diseño de estrategias para el reposicionamiento de unidades en Sistemas Públicos de Bicicletas

Miguel Angel Arroyave Guerrero

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería

Director:

Ph. D. Pablo Andrés Maya Duque

Co-Directora:

M. Sc. Diana Marcela Pérez Valencia

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones y Estadística

Grupo de Investigación:

Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2017

Aval para entrega de trabajo de investigación:

Pablo Andrés Maya D.

PABLO ANDRÉS MAYA DUQUE. DIRECTOR

Diana Pérez.

DIANA MARCELA PÉREZ VALENCIA. CO-DIRECTORA

*En memoria de mi abuela Oliva Zuluaga de
Arroyave (1923 – 2017).*

Agradecimientos

Este documento representa un proceso de experiencias, aprendizajes, motivaciones y de madurez académica y personal.

A Dios, por poner en mi camino las circunstancias y personas en los momentos precisos.

Mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que estuvieron involucradas de una u otra manera en este proceso, dejando su huella tanto en el ámbito académico como en el personal.

Agradezco a mis padres por todo el apoyo, comprensión, sacrificio y amor que me han brindado durante toda la vida.

A Pablo Andrés Maya Duque y Diana Marcela Pérez Valencia por su acompañamiento, paciencia, tiempo y enseñanzas. Por creer y siempre querer sacar lo mejor de mí.

Resumen

Los Sistemas Públicos de Bicicletas (SPB) son un medio de transporte económico y amigable con el medio ambiente para recorrer distancias medianas y cortas al interior de las ciudades. En la investigación desarrollada se busca intervenir en la gestión de los recursos en estos sistemas, específicamente en el balanceo.

Los SPB, poseen una demanda asimétrica que los caracteriza generando así abundancia o escasez de bicicletas y puntos de anclajes en las estaciones a lo largo de la operación. Por ello, en la mayoría de casos se recurre a estrategias de reposicionamiento para mitigar esta situación y balancear el sistema. De la literatura, se evidencia que los aportes frente al reposicionamiento se han centrado en la planeación de rutas, revelando una brecha en contribuciones a un nivel más agregado de decisión. Esta necesidad es compartida por operadores de SPB latinoamericanos contactados, quienes manifiestan que la planeación del reposicionamiento no debe centrarse exclusivamente en la planeación de rutas, dado el contexto dinámico al que se enfrentan en la operación diaria.

A partir de lo anterior, se propone un modelo matemático de optimización de programación binaria que tiene como objetivo agrupar las estaciones de un SPB en zonas de reposicionamiento, teniendo impacto en un horizonte de planeación táctico. El modelo considera aspectos adicionales a los geográficos, en específico, los requerimientos de bicicletas/puntos de anclaje y la prioridad para el reposicionamiento de cada estación. Se realizan pruebas con instancias reales de un SPB con 452 estaciones.

Palabras clave: *Sistemas Públicos de Bicicletas, Reposicionamiento, Zonas de Reposicionamiento.*

Abstract

Bike-sharing Systems (BSS) are an environmentally friendly and economical mean of transport to travel medium and short distances inside the cities. In this project, we aim at supporting the management of resources, specifically in balancing.

Bike-sharing Systems have an asymmetric demand that characterizes them, thus generating abundance or shortage of bicycles or docks in some stations throughout the operation. Therefore, repositioning strategies are used to mitigate this situation and balance the system. From literature, it is evident that contributions to repositioning have focused on route planning, showing a gap in contributions in a more aggregate level of decision. This need is shared by contacted Latin American BSS's operators, who state that repositioning planning should not focus exclusively on routing, given the dynamic context that they face in daily operation.

From the above, we propose an optimization mathematical model of binary programming that aims to group BSS's stations in repositioning zones, having impact on a tactical planning horizon. The model considers geographic, requirement and priority aspects. Test are performed with real instances of a BSS with 452 stations.

Keywords: *Bike-Sharing Systems, Repositioning, Repositioning Zones.*

Contenido

	Pág.
Resumen	XI
Lista de figuras.....	XVI
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
1. Revisión Estado del Arte de reposicionamiento de bicicletas en Sistemas Públicos de Bicicletas.....	5
1.1 Problemáticas de diseño	7
1.2 Problemáticas de gestión de la demanda	8
1.3 Problemáticas de gestión de los recursos	9
1.3.1 Problemáticas de gestión de recursos: Balanceo de SPB a través del Reposicionamiento de bicicletas.....	11
2. Experiencias de Operadores de SPB de Bicicletas en América Latina	21
2.1 Contextualización	23
2.2 Gestión de la demanda	25
2.3 Reposicionamiento de bicicletas.....	26
2.4 Incentivos como apoyo a las tareas de reposicionamiento	30
2.5 Desafíos en el balanceo de SPB	31
3. Estrategias para el reposicionamiento de bicicletas en SPB.....	35
4. Resultados y análisis	43
4.1 Diseño de las instancias de prueba	43
4.2 Hipótesis 1: Efecto de incluir restricciones adicionales a las geográficas en la conformación de zonas de reposicionamiento	45
4.3 Hipótesis 2: Robustez de las zonas de reposicionamiento	52
4.4 Hipótesis 3: La posibilidad de reposicionar por puntos de demanda.....	58
5. Conclusiones y trabajo futuro	65
Bibliografía	69

Lista de figuras

	Pág.
Figura 0-1: Objetivos propuestos y metodología desarrollada.	3
Figura 1-1: Factores exógenos y endógenos claves para el éxito de SPB.	6
Figura 1-2: Intervenciones desde la Investigación de Operaciones en SPB.	7
Figura 1-3: Estructura general para el balanceo de bicicletas en SPB.	10
Figura 1-4: (a) Desarrollos identificados discriminados estrategia de reposicionamiento (Izquierda). (b) Principales enfoques abordados desde métodos cuantitativos para la solución del reposicionamiento de bicicletas con personal del sistema exclusivamente (derecha).	12
Figura 2-1: Zona de cobertura SPB contactados.	24
Figura 3-1: Función de restricciones de requerimientos.	40
Figura 3-2: Función restricciones de prioridad.	40
Figura 4-1: Número de préstamos por hora del día en el período estudiado.	44
Figura 4-2: Cambio en la función objetivo frente a conjunto de restricciones. Requerimientos (izquierda), Prioridad (centro), Impacto en la función objetivo (derecha).	47
Figura 4-3: Gráfica de interacción entre los factores.	47
Figura 4-4: Cambio en la desviación del desbalance en los requerimientos.	48
Figura 4-5: Cambio en la desviación del número de estaciones por prioridad.	49
Figura 4-6: Comparación de medias entre los niveles del factor de prioridad.	50
Figura 4-7: Zonas de reposicionamiento formadas. Caso base (izquierda). 15%-5 (derecha).	51
Figura 4-8: Configuración de zonas de reposicionamiento recomendada.	52
Figura 4-9: Comparación zonas de reposicionamiento en diferentes picos horarios.	56
Figura 4-10: Comparación vecinos por estación en diferentes picos horarios.	57
Figura 4-11: Estaciones que pueden ser abordadas como puntos de demanda.	59
Figura 4-12: Puntos de demanda configurados por tipo de necesidad.	60
Figura 4-13: Configuración zonas de reposicionamiento a través de puntos de demanda.	61
Figura 4-14: Zonas de reposicionamiento por estación y por puntos de demanda.	62

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Principales objetivos abordados discriminados por tipo de reposicionamiento (ejecutado por personal del operador del sistema).	14
Tabla 1-2: Consideraciones generales tomadas en cuenta en la formulación del problema de reposicionamiento de bicicletas (ejecutado por personal del operador del sistema). .	16
Tabla 1-3: Enfoques de solución para el problema de reposicionamiento de bicicletas (ejecutado por personal del operador del sistema).	18
Tabla 2-1: Cuestionario de entrevista semiestructurada compartida a operadores de SPB.....	22
Tabla 3-1: Listado de parámetros y variables de decisión usadas en el modelo.	37
Tabla 4-1: Clasificación de períodos Valle y Pico.....	44
Tabla 4-2: Comparación zonas de reposicionamiento en diferentes horarios.	54
Tabla 4-3: Comparación zonas de reposicionamiento por estación y por puntos de demanda.	62

Introducción

La bicicleta se constituye en un medio de transporte rápido, económico y ecológico para cubrir distancias cortas al interior de las ciudades. Es por esto que los Sistemas Públicos de Bicicletas (SPB) han resultado ser una estrategia de transporte público altamente popular, pasando de convertirse en interesantes experimentos de movilidad, al principio del presente siglo, a una opción real de transporte público en Europa y Norteamérica.

Un SPB o BSS (Bike Sharing System, por sus siglas en inglés) es un servicio de movilidad en el cual existen bicicletas disponibles para el uso público compartido [1]. Estos involucran la provisión de un grupo de bicicletas a través de estaciones de servicio estratégicamente ubicadas a través de una red, a las cuales pueden acceder usuarios en préstamos de corto tiempo permitiendo viajes desde un punto de origen a otro de destino.

Los SPB se caracterizan por poseer una demanda asimétrica, generando así abundancia o escasez de bicicletas en las estaciones a lo largo del período de operación. Esta condición conlleva a que se deba balancear el sistema, es decir, agregar o quitar bicicletas de las estaciones con el fin de mitigar el efecto de la demanda asimétrica y poder cumplir con niveles de servicio planteados. Es de recordar que en este contexto se debe controlar los niveles de inventario de las estaciones en doble sentido, considerando la disponibilidad de bicicletas y de puntos de anclaje, para que los usuarios puedan acceder al servicio o finalizarlo, respectivamente.

Para lograr balancear el sistema se conciben tres grandes posibilidades. La primera, es el autobalanceo, donde el sistema sin ninguna intervención logra alcanzar los niveles deseados de bicicletas y puntos de anclajes en las estaciones. La segunda, es a través de desplazar la demanda, es decir, realizar un proceso de planeación previo al acceso de los usuarios al sistema con el propósito de persuadirlos a tomar bicicletas en ciertas estaciones. Por último, se concibe un enfoque de balanceo desde la oferta, es decir, estrategias seguidas por parte del operador del sistema para cumplir con los niveles de servicio.

Dado que la posibilidad de que los sistemas logren un autobalanceo es baja, así como persuadir a los usuarios de cambiar sus preferencias de origen-destino, el balanceo de los sistemas se ha centrado en el accionar de los operadores de los sistemas. La principal estrategia seguida por parte de estos es el reposicionamiento de bicicletas a través de la red del sistema, ya sea a través del uso de personal del sistema únicamente o involucrando a los usuarios en un esquema colaborativo.

El reposicionamiento de bicicletas se concibe principalmente como una actividad en un horizonte de planeación operativo, donde la mayoría de decisiones se centran en la planeación de las rutas a seguir por parte de los vehículos que van dejando o recolectando bicicletas a través de las estaciones. Sin embargo, también se pueden involucrar decisiones a un nivel táctico que sirven como punto de referencia para la planeación de rutas, como la determinación de niveles de servicio, los niveles de inventario en las estaciones o la configuración de zonas de reposicionamiento. En esta última decisión, la configuración de zonas de reposicionamiento, se basa el trabajo realizado.

Así mismo, en la actualidad se plantean dos grandes estrategias para realizar las operaciones de reposicionamiento: a través de estaciones (tradicional) o a través de puntos de demanda. Esta última hace referencia a un grupo de estaciones que tienen ciertas características en común y pueden ser tomadas como unidad básica de medida. A modo de ejemplo, en un enfoque por estaciones cada que haya una estación desbalanceada se emite una señal de reposicionamiento, mientras en un enfoque por puntos de demanda esta señal se da cuando un punto de demanda (conjunto de estaciones) está desbalanceado.

En la Figura 0-1 se presenta el objetivo general, así como los objetivos específicos y la metodología seguida en la propuesta que se desarrolla en cuatro etapas. La revisión del Estado del Arte (EM1), se basó en una búsqueda en la literatura de artículos, reportes, libros y conferencias; así como la asistencia a eventos relacionados con SPB, ciclismo urbano y movilidad sostenible. En la segunda etapa metodológica (EM2) se realizaron entrevistas individuales semiestructuradas a operadores de SPB en América Latina con el propósito de evidenciar los contextos donde operan, las estrategias seguidas para realizar la gestión de la demanda y el balanceo de los sistemas, así como las necesidades y desafíos a los que se enfrentan a diario. Basados en los resultados de las etapas metodológicas anteriores, en el diseño y la propuesta de estrategias de reposicionamiento (EM3), se propuso un modelo matemático de optimización que permite configurar zonas de reposicionamiento basado en tres criterios: geográfico, requerimientos y prioridad de las estaciones. Finalmente, en EM4, se evalúa la utilidad de la información brindada por el modelo matemático a través de tres hipótesis: la importancia de incluir aspectos más allá de los geográficos, la robustez de las zonas configuradas en diferentes intervalos de tiempo y la factibilidad de establecer zonas de reposicionamiento a nivel de pequeños grupos de estaciones (puntos de demanda) en vez de estación por estación. La evaluación de las hipótesis es realizada con instancias de un sistema real que opera en Latinoamérica.

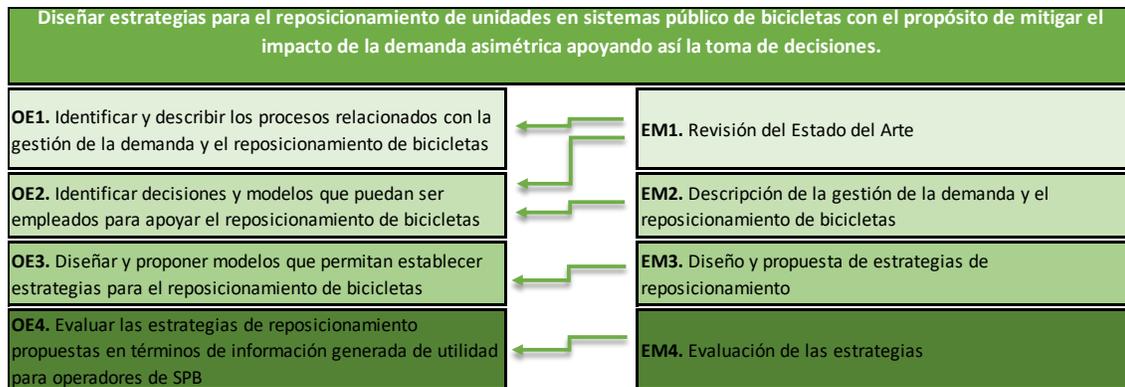


Figura 0-1: Objetivos propuestos y metodología desarrollada.

En el trabajo propuesto, se presenta un modelo matemático de programación binaria que tiene como objetivo agrupar las estaciones de un SPB en un número determinado de zonas, teniendo impacto en un horizonte de planeación táctico. El modelo tiene en consideración aspectos adicionales a los geográficos, en específico, los requerimientos de bicicletas/puntos de anclaje y la prioridad de las estaciones (en términos de transacciones y nivel de desbalance) para el reposicionamiento.

Del trabajo propuesto se destacan dos contribuciones tanto para un contexto académico como de la operación de SPB. Se propone un modelo de apoyo a la toma de decisiones en el reposicionamiento de bicicletas a un nivel de decisión agregado, específicamente en la configuración de zonas de reposicionamiento, ya que las contribuciones frente al reposicionamiento se han centrado en su mayoría a la determinación de rutas. También se realiza un acercamiento al funcionamiento de los SPB a través de entrevistas a operadores en América Latina, a partir de las cuales se identifican las estrategias seguidas en cuanto a la gestión de la demanda y balanceo de los sistemas. En la literatura son pocos los trabajos que realizan una descripción detallada de la operación real de SPB, menos aún en un el contexto latinoamericano.

Lo que resta del documento se desarrolla de la siguiente forma. Inicialmente, en la sección 1 se establece un marco teórico y estado del arte alrededor de la estrategia de reposicionamiento de bicicletas, para darle paso a las experiencias de Operadores de SPB en América Latina, en la sección 2. Posteriormente, se proponen estrategias para el reposicionamiento de bicicletas (sección 3) y la evaluación y análisis de las propuestas realizadas (sección 4). Finalmente, se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

1.Revisión Estado del Arte de reposicionamiento de bicicletas en Sistemas Públicos de Bicicletas

En la presente sección del documento, se busca establecer un marco de referencia sobre los principales desarrollos y tendencias identificados en la literatura frente a los Sistemas Públicos de Bicicletas (SPB), especialmente aquellos desarrollos enfocados a balancear el sistema con el propósito de atenuar el impacto que la demanda asimétrica tiene en la disponibilidad tanto de bicicletas como de puntos de anclaje y su consecuente efecto en el nivel de servicio.

Inicialmente se realiza un bosquejo general de problemáticas propias en SPB en las que los procesos decisorios asociados pueden estar soportados en el uso de métodos cuantitativos. Posteriormente, se hace énfasis en el balanceo, teniendo en cuenta cuáles son las principales estrategias para realizar esta tarea por parte de los operadores de los sistemas y los diferentes enfoques abordados desde la literatura.

Si bien Europa ha sido el epicentro de los SPB, en los últimos años se ha evidenciado una rápida expansión de estos sistemas en el Sureste asiático y en Latinoamérica. Desde la experiencia de sistemas que han sido implementados y aquellos que actualmente están en funcionamiento, se identifican aspectos claves a tener en consideración para el éxito de estos sistemas, los cuales son mencionados en [2] y en [3].

Estos aspectos claves para el éxito de los SPB pueden ser agrupados en dos grandes categorías: factores que están fuera del manejo o intervención del SPB (factores exógenos) y aquellos factores más accesibles a intervenir por parte del SPB (factores endógenos), que se observan en la Figura 1-1.

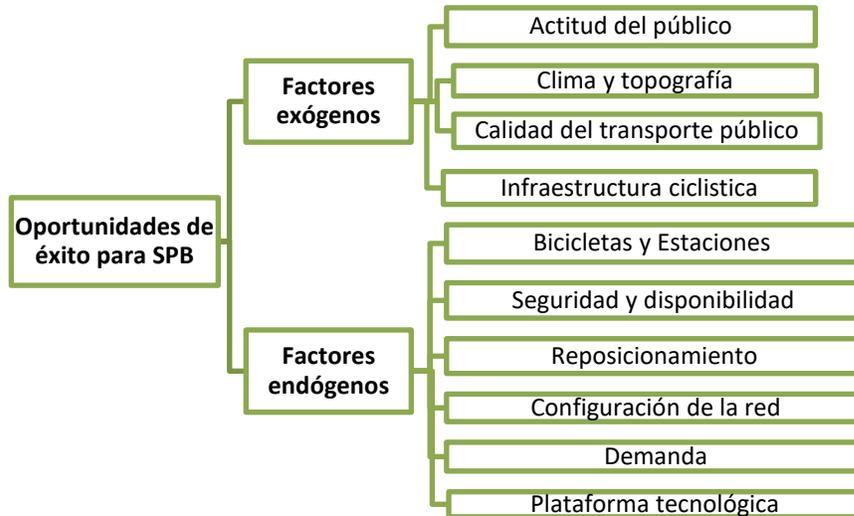


Figura 1-1: Factores exógenos y endógenos claves para el éxito de SPB.

Por ello, basados en los factores endógenos, se propone un marco general de problemáticas dentro de las cuáles se puedan clasificar decisiones/problemas que se han abordado en la literatura, teniendo en cuenta además el nivel de planeación sobre el cual se tiene impacto (estratégico, táctico, operativo o varios niveles).

El marco general de problemáticas propuesto se resume en tres categorías: Problemáticas de diseño (configuración de la red, bicicletas y estaciones), Problemáticas de gestión de la demanda (demanda) y Problemáticas de gestión de recursos (reposicionamiento de bicicletas, mantenimiento). En lo que resta de la sección, se aborda brevemente cada una de estas problemáticas mencionadas y se hace especial énfasis en las intervenciones identificadas frente al reposicionamiento cuyo propósito es balancear la red del sistema. La Figura 1-2 resume las principales intervenciones halladas en la literatura discriminada por tipo de problemática abordada y el nivel de decisión.

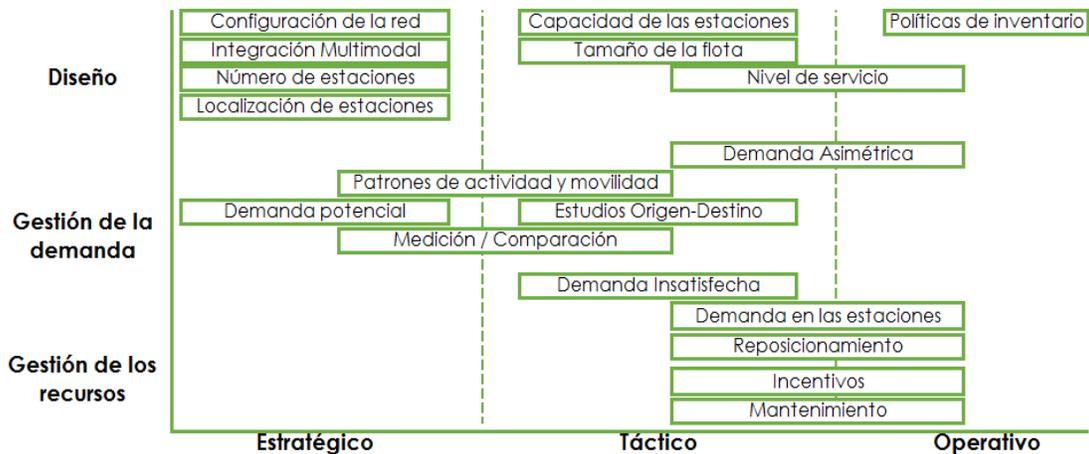


Figura 1-2: Intervenciones desde la Investigación de Operaciones en SPB.

1.1 Problemáticas de diseño

En las problemáticas de diseño, las intervenciones identificadas en la literatura están orientadas hacia la planeación de recursos, respecto a su localización y asignación, así como la interacción con la infraestructura de transporte existente. También, intervenciones orientadas a la capacidad, al nivel de servicio requerido y al número de bicicletas a mantener en cada estación.

A un nivel de decisión estratégico se presentan intervenciones donde al diseño de SPB se involucran redes de transporte existentes con el fin de tenerlas en cuentas y permitir identificar relaciones simbióticas, como el caso aplicado al sistema BIXI de Montreal [4] o teniendo en cuenta la integración de los SPB a redes intermodales, como se propuso para Santander, España [5].

El común denominador en intervenciones a nivel estratégico es determinar el número y la localización de estaciones, sin embargo, entre los elementos diferenciadores identificados se encuentra, por ejemplo, hacer estas determinaciones basados en el nivel de servicio, considerando intereses tanto de inversionistas como de usuarios [6]. Otros han optado por tener en cuenta el inventario de bicicletas a mantener en cada estación [7].

Algunos trabajos abarcan una intervención a nivel estratégico y táctico donde a la configuración de la red, localización y número de estaciones se le suma la determinación

de la capacidad de las estaciones [8] o la determinación del número óptimo de bicicletas y de puntos de anclaje para la ubicación de bicicletas [9].

Dentro de los trabajos orientados hacia decisiones específicamente tácticas, es habitual que se intente mitigar situaciones propias de un SPB como son las estaciones problemáticas (estaciones sin bicicletas o sin puntos de anclaje, es decir desbalanceadas) a través de la capacidad y el nivel de servicio requerido en cada estación [10]; y el dimensionamiento de la flota de bicicletas así como la cantidad a mantener en cada estación.

El trabajo presentado en [11] cuantifica la influencia de la capacidad de las estaciones como suministro para minimizar el número de estaciones desbalanceadas. Otro trabajo con similar propósito, pero teniendo en consideración una asignación inicial de bicicletas en cada estación, estima cómo será el flujo transaccional de bicicletas y la cantidad de viajes que podría soportar la red con la asignación inicial dada [12].

Por último a un nivel de decisión operativo, las intervenciones están orientadas hacia la determinación de políticas de inventarios para la gestión de las estaciones [13] y la identificación de estrategias para la gestión de la flota de bicicletas bajo un equilibrio entre costo y efectividad [14].

1.2 Problemáticas de gestión de la demanda

Las problemáticas de gestión de la demanda merecen especial atención dada su injerencia sobre el diseño y la gestión de recursos. Aportes en este tipo de problemáticas son herramientas útiles para tomar decisiones en los tres niveles de planeación e insumos para posteriores desarrollos en las dos categorías mencionadas.

Dados los volúmenes de información alrededor de los SPB, el uso de minería de datos ha sido un enfoque común utilizado por algunos autores para revelar fenómenos urbanos subyacentes vinculados a la dinámica de las ciudades. Hay intervenciones como las realizadas con información de los sistemas de Viena [15] y de Montreal [16], las cuales identifican patrones de actividad en las estaciones. Otros autores han utilizado la minería de datos con el fin de ofrecer una clasificación de los SPB [17].

Otro enfoque dentro de las problemáticas de la demanda es la identificación de usuarios potenciales de los SPB. Algunos han recurrido a predecir la demanda potencial dado que no hay estaciones de bicicletas en ciertos lugares de la ciudad a través de información del contexto, como en el caso del sistema de Nueva York [18] o aquellos que a través de sistemas de información geográfica (GIS) identifican en cuáles partes un mejoramiento de la infraestructura ciclística puede generar usuarios adicionales al sistema [19].

Si la estimación de la demanda potencial de un SPB es desafiante, lo es aún más en países donde este tipo de sistemas no han sido implementados o no están consolidados. En [20] proponen una metodología con el objetivo de relacionar la demanda de SPB con características externas que afectan el uso de la bicicleta. Recientemente, se ha estudiado el proceso decisorio involucrado en la ubicación de destinos de los usuarios luego de tomar una bicicleta en alguna estación [21]. Por último, cabe reseñar trabajos que han acudido a técnicas de series de tiempo para estimar demanda en las estaciones [22] y demanda no atendida [23].

Se puede resumir que, a nivel estratégico, las intervenciones realizadas están orientadas hacia el estudio de grandes volúmenes de información proveniente tanto de los sistemas como del contexto, para revelar información útil para la toma de decisiones. A nivel técnico, los puntos de intervención más relevantes se relacionan con la estimación (pronóstico) de la demanda de las estaciones y la estimación de demanda no atendida.

1.3 Problemáticas de gestión de los recursos

En estas problemáticas se abordan los factores de éxito relacionados con el mantenimiento tanto de bicicletas como de estaciones y el balanceo del sistema. Es precisamente el balanceo de bicicletas el tema más ampliamente estudiado en la literatura frente a los SPB y el que presenta grandes desafíos. Por un lado se encuentra el componente de emisiones de CO₂ de los vehículos usados para esta tarea [24]. Por otro lado, en términos de costos, la inversión en un vehículo acondicionado especialmente para mover alrededor de 20 bicicletas cuesta alrededor de 14000 a 20000 USD y los costos relacionados a la reposición oscilan entre el 9% y el 11% de los costos operacionales de un SPB [25].

La revisión realizada tiene como principal propósito identificar el estado del arte referente a las estrategias de reposicionamiento seguidas con el fin de balancear la red en SPB. Es preciso aclarar que, desde nuestro punto de vista, los conceptos de balanceo y reposicionamiento difieren. En la Figura 1-3 se observa la relación jerárquica entre ambos conceptos.

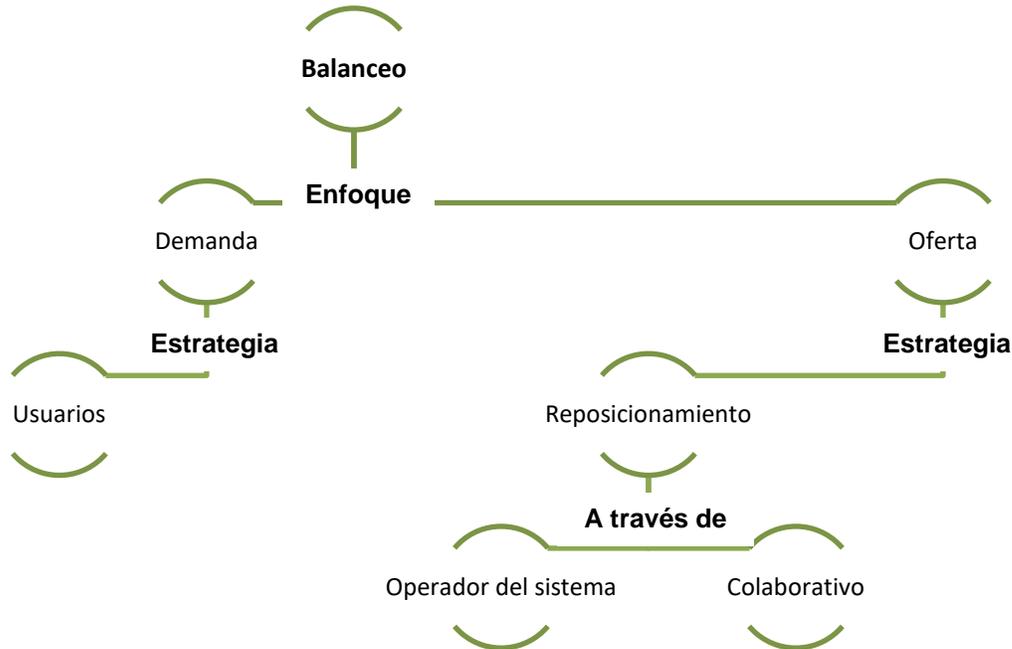


Figura 1-3: Estructura general para el balanceo de bicicletas en SPB.

Por balanceo, se entiende, es una meta fijada por los operadores de los sistemas con el fin de ofrecer un mejor nivel de servicio medido a través de la disponibilidad de bicicletas y puntos de anclaje en las estaciones [26]. Para lograr esta meta, los operadores pueden hacerlo a través de un enfoque desde la demanda o desde la oferta. Desde la demanda, se hace referencia a sugerir a los usuarios en qué estaciones tomar bicicletas, es decir, llevar a cabo un proceso de planeación previo al acceso de los usuarios al sistema con el propósito de persuadirlos a tomar bicicletas en ciertas estaciones. Por otro lado, un enfoque de balanceo desde la oferta hace referencia a estrategias seguidas por los operadores para reposicionar bicicletas entre las estaciones con el propósito de cumplir determinado nivel de servicio.

Las estrategias para el reposicionamiento de bicicletas, de acuerdo a lo identificado en la literatura, se pueden clasificar en dos tipos: aquellas donde esta tarea está a cargo de personal del sistema únicamente y otra donde adicionalmente se busca involucrar a los

usuarios del sistema a través del ofrecimiento de incentivos, la cual llamaremos colaborativa.

Una vez establecida la contextualización y las diferencias entre balanceo y reposicionamiento de bicicletas, queda claro el direccionamiento de la presente revisión del estado del arte. En lo que resta de documento se realiza una introducción al reposicionamiento de bicicletas, para luego enfatizar sobre las dos estrategias identificadas.

1.3.1 Problemáticas de gestión de recursos: Balanceo de SPB a través del Reposicionamiento de bicicletas

Desde la literatura, tradicionalmente se han marcado dos líneas de investigación para abordar la tarea de reposicionamiento, teniendo en consideración únicamente personal del operador del sistema. Está el reposicionamiento estático, el cual se realiza durante la noche o cuando la actividad del sistema es baja, en el cual se ha enfocado la mayoría de las investigaciones, justificado parcialmente, porque es más fácil de abordar desde el punto de vista de la modelación y el impacto generado por el reposicionamiento durante la noche en las primeras horas de operación del día siguiente [26]. La segunda línea de investigación está relacionada con el reposicionamiento dinámico, el cual es realizado durante el día o cuando la actividad del sistema es alta [1].

En años recientes, ha surgido un nuevo campo de investigación para abordar la tarea de reposicionamiento relacionada con los incentivos. Esta estrategia la denominamos como reposicionamiento colaborativo. Los incentivos pueden ser usados para motivar a los usuarios a retornar bicicletas en estaciones con bajos niveles de inventario complementando así la tarea llevada a cabo por personal del sistema [26]. Estos incentivos pueden ser estáticos (incentivo constante) o dinámicos (varía en función de ciertos parámetros).

Una vez resumidas las dos principales estrategias seguidas para realizar la tarea de reposicionamiento (operador del sistema y colaborativo), se presenta un breve resumen de la información identificada en cuanto al reposicionamiento, para posteriormente hacer énfasis en la revisión realizada frente al reposicionamiento llevado a cabo por parte del operador del sistema y al reposicionamiento colaborativo, respectivamente.

Se identifican 112 documentos que incluyen intervenciones en SPB desde las diferentes problemáticas y horizontes de planeación mencionados anteriormente. De estos, alrededor del 25% (29 documentos) están orientados a aportar al balanceo del sistema siguiendo una estrategia de reposicionamiento de bicicletas. Es importante mencionar que los aportes al balanceo de SPB en su mayoría están enfocados a ofrecer soluciones a un nivel operativo (ruteo), y se identifican 4 documentos (de 29) que incluyen intervenciones a un nivel de decisión más agregado como la asignación de bicicletas a las estaciones, niveles de servicio deseados o agrupación de estaciones en zonas.

Como puede observarse en la Figura 1-4 (a) la mayoría (83%) de los desarrollos están enfocados al reposicionamiento por parte del operador del sistema en especial al reposicionamiento estático de bicicletas. Por su parte, el tema de reposicionamiento colaborativo ha sido menos abordado, haciendo referencia a que es un campo de investigación que apenas está siendo explorado, centrándose el mayor interés en la implementación de programas de incentivos dinámicos (4 de los 5 artículos relacionados con reposicionamiento colaborativo).

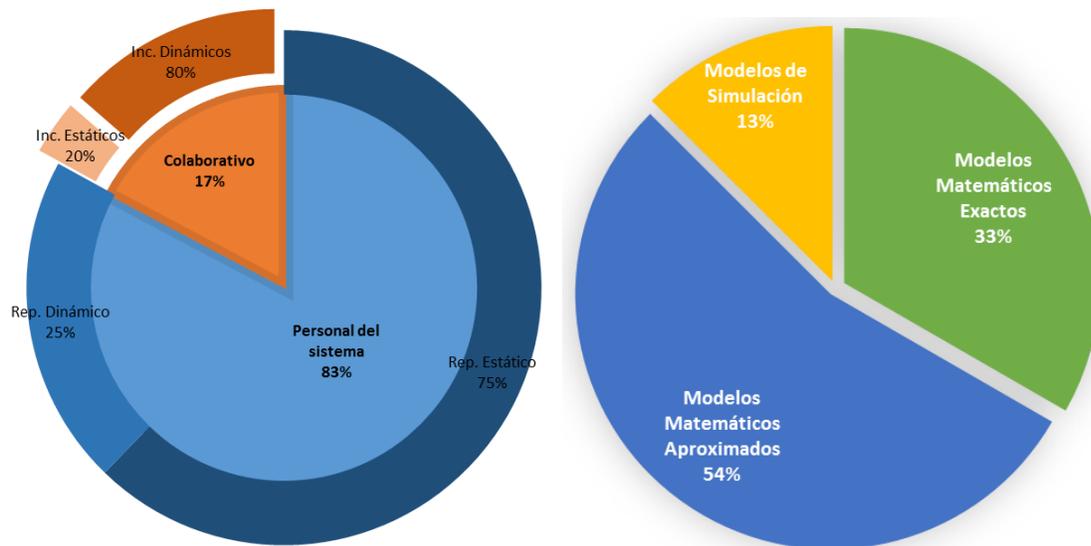


Figura 1-4: (a) Desarrollos identificados discriminados estrategia de reposicionamiento (Izquierda). (b) Principales enfoques abordados desde métodos cuantitativos para la solución del reposicionamiento de bicicletas con personal del sistema exclusivamente (derecha).

Otra información útil previa a la revisión tiene que ver con los enfoques abordados desde los métodos cuantitativos para dar solución al reposicionamiento de bicicletas,

específicamente al reposicionamiento llevado a cabo por parte de personal del sistema debido a que ha sido el tema más ampliamente estudiado. En la Figura 1-4 (b), se observa que la mayoría de trabajos (54%) están enfocados a dar una solución a través de modelos aproximados. Los primeros desarrollos están enfocados a resolver óptimamente (modelos exactos), sin embargo, resolver este problema se hace difícil cuando el número de estaciones aumenta. Por ello, la mayoría de desarrollos en la actualidad están enfocados a utilizar modelos aproximados, seguido por modelos matemáticos exactos y en tercer lugar el uso de modelos de simulación.

▪ **Reposicionamiento por parte del operador del sistema**

Los trabajos realizados por [27] y por [28] son citados por varios autores como las bases para el reposicionamiento estático y dinámico de bicicletas, respectivamente.

Inicialmente, se hace una síntesis relacionando el tipo de reposicionamiento (estático o dinámico) y los principales objetivos planteados por los investigadores. Luego, se hace énfasis en las consideraciones o características generales de los desarrollos identificados en la literatura. Por último, se realiza una revisión de los principales enfoques de solución abordados.

En la Tabla 1-1 se muestran los principales objetivos que se han abordado discriminando si el enfoque es desde el reposicionamiento estático o dinámico. Sin distinción del tipo de reposicionamiento al cual se ha hecho enfoque, la mayoría de desarrollos tienen como principal objetivo la minimización ya sea de tiempos, distancias o costos. Este objetivo principal puede tener en consideración la manipulación de las bicicletas [29]–[31], equilibrar la carga de trabajo asignada a los vehículos [23], [32], [33] o incluso que se use el menor número posible de vehículos [34].

Es común encontrar múltiples objetivos que se pretenden abordar. A la ya mencionada minimización de tiempos, distancias o costos se le acompaña el deseo de minimizar la demanda insatisfecha, es decir, sabiendo el comportamiento temporal del sistema evitar que cuando un cliente llegue a determinada estación no pueda prestar una bicicleta o no encuentre puntos de anclaje para dejarla; demanda que ha sido medida tanto a través de funciones lineales [28], [30] como de funciones convexas (que luego son linealizadas) [27],

[35]. Aparte de la consideración de satisfacción de la demanda, también se incluye el deseo de incluir que la desviación (Gap) entre el número objetivo de bicicletas en cada estación luego del reposicionamiento (teórico) frente al ejecutado (real) sea mínima. En particular, hay quienes se han planteado minimizar el gap cuadrado, así grandes gaps son evitados mientras pequeños gaps son aceptados [36].

Teniendo en consideración un orden cronológico de los desarrollos, se vislumbra que en principio los objetivos estaban planteados únicamente desde el punto de vista del operador del sistema, es decir, se buscaba únicamente minimizar tiempos, distancias o costos. Sin embargo, ha evolucionado al punto de tener en consideración la satisfacción de los usuarios y el número de bicicletas a tener en las estaciones para cumplir unos niveles de servicios deseados e incluso, entre los trabajos más recientes (a 2016) se encuentra el presentado en [37] donde se tiene un objetivo en función del tiempo que transcurre entre que la estación es reportada en desbalance hasta que llega el respectivo vehículo de reposicionamiento a la estación.

Tabla 1-1: Principales objetivos abordados discriminados por tipo de reposicionamiento (ejecutado por personal del operador del sistema).

Tipo de reposicionamiento	Función Objetivo	Referencia
Estático	Minimizar Tiempo/Distancia/Costos	[1], [23], [27], [29], [31]–[35], [37]–[43].
	Minimizar GAP	[31]–[33], [37], [44].
	Minimizar Makespan	[10].
	Minimizar demanda insatisfecha	[27], [35].
Dinámico	Minimizar Tiempo/Distancia/Costos	[30], [45], [46].
	Minimizar GAP	[30], [36].
	Minimizar demanda insatisfecha	[28], [30].

Luego de revisar los principales objetivos abordados en la literatura, es pertinente inspeccionar las consideraciones o características globales que se han tenido en cuenta

al momento de desarrollar modelos de reposicionamiento estático o dinámico de bicicletas, resumidos en la Tabla 1-2. Frente a la consideración de un vehículo o una flota de vehículos no se identifica una tendencia, es decir, hay un equilibrio entre aquellos que eligen modelos con único vehículo o con múltiples.

En los casos donde es considerada una flota de vehículos es común encontrar que previo a la planificación de las rutas se realice una agrupación de estaciones. Esta agrupación, por lo general, está basada en criterios geográficos teniendo en cuenta que los vehículos asignados puedan cumplir con los requerimientos dados, es decir, sean capaces de visitar una cantidad de estaciones determinadas y cumplir sus necesidades de inventario (recoger/dejar bicicletas) sin sobrepasar la capacidad del vehículo [10], [35], [47]. Usualmente se considera asignar un vehículo a un grupo de estaciones (cluster) y así planear múltiples rutas independientes, sin embargo, en [35] es permitido que un vehículo pueda visitar estaciones que no estén incluidas en el clúster inicialmente asignado. Por último frente a la agrupación de estaciones, un desarrollo reciente presentado en [48] evalúa el uso de varios métodos de agrupación de estaciones que ayude a solucionar el problema de reposicionamiento de bicicletas en el Santander Cycle Scheme de Londres. Una característica importante que no se consideraba en los primeros desarrollos (2011-2012) y que se ha incluido en recientes aportes es tener en cuenta los tiempos necesarios para la manipulación de las bicicletas (carga/descarga). La mayoría toman un tiempo fijo de carga/descarga que varía en función del número de bicicletas a manipular (entre 2-5 minutos). Sin embargo, algunos han asumido un tiempo fijo de “visita a cada estación” [40], mientras otros incluyen incluso los tiempos de parqueo de los vehículos de reposicionamiento [23].

Otra consideración importante de resaltar es cómo determinar la cantidad de bicicletas a tomar o dejar en cada estación. Para ello, se consideran niveles de inventario objetivo a mantener en cada estación. La mayoría han tomado esta cantidad como fija, sin embargo algunos autores han establecido que la cantidad de bicicletas a mantener en las estaciones puede encontrarse en un intervalo [10], [29], [36], [37], por ejemplo al implementar que el inventario de bicicletas en las estaciones debe permanecer entre el 25% y el 75% de su capacidad.

Dos características o consideraciones asociadas a la estructura de los modelos usados tienen que ver con la consideración del número de visitas permitidas a las estaciones y dónde termina el recorrido de los vehículos de reposicionamiento. Es común que se permita visita única a las estaciones y que el recorrido empiece y termine en el centro de operaciones (depot), dado que las formulaciones propuestas están basadas en el TSP (o mTSP) o el VRP. No obstante, algunos autores han realizado modificaciones para permitir múltiples visitas a las estaciones, entre otras, para permitir cumplir parcialmente la operación de tomar o dejar bicicletas o usar estaciones como almacenamiento temporal [39]. Frente a dónde se terminan los recorridos de los vehículos, varios autores permiten que el final no sea estrictamente donde empiezan.

Una última característica identificada es la inclusión de un límite para llevar a cabo la tarea de reposicionamiento, independiente de si es abordado a través de un enfoque estático o dinámico. En el enfoque estático puede fijarse un límite que sería desde el cierre de operación del sistema hasta la hora de apertura al día siguiente (en caso de no funcionar 24 h.), mientras en el enfoque dinámico se fijan límites más cortos, por ejemplo, el tiempo que transcurre entre un horario valle y un horario pico. Comúnmente el límite es en tiempo, sin embargo se identifica que el límite puede estar en función del número de estaciones visitadas [41] o que también se incluya un límite de tiempo mínimo de operación [40].

Tabla 1-2: Consideraciones generales tomadas en cuenta en la formulación del problema de reposicionamiento de bicicletas (ejecutado por personal del operador del sistema).

Consideración	Referencia
1 vehículo	[29], [37]–[39], [42], [44]–[46], [49].
Flota de Vehículos	[1], [10], [23], [27], [28], [30]–[36], [40], [41], [43].
Operaciones de Carga/Descarga	[23], [27], [29]–[33], [35], [36], [40], [43], [44].
Inventario en Intervalo	[10], [29], [36], [37].
Múltiples Visitas	[10], [23], [30], [31], [36], [39], [42].
Límite para el reposicionamiento	[27], [30]–[33], [35], [36], [40], [41], [43], [44].
Ruta Abierta	[10], [28], [36], [37].

Por último, es importante referirse a los enfoques de solución abordados, que se mencionan anteriormente y que se encuentran resumidos en la Tabla 1-3.

Teniendo en cuenta un factor cronológico, se identifica que los primeros desarrollos (2011-2012) se enfocan en modelos exactos, sin embargo, dado que la complejidad computacional para encontrar soluciones óptimas crece exponencialmente al aumentar el número de estaciones, la utilización de modelos aproximados ha crecido y es dominante actualmente. Muestra de ello, es que a través de modelos exactos se puedan solucionar óptimamente soluciones hasta con 60 estaciones [42]. Para tener una idea del tamaño de instancias utilizadas en el reposicionamiento de bicicletas, se consideran instancias pequeñas aquellas que tienen hasta 50 estaciones, medianas aquellas con menos de 100 estaciones y grandes a partir de 100 estaciones, clasificación basada en instancias de benchmarking disponibles en la literatura [1], [43].

La mayoría de modelos con un enfoque de solución exacto están basados en formulaciones de MILP (programación lineal entera mixta) o de flujo en redes, agregando métodos para acelerar la búsqueda de soluciones como Branch-and-Cut [1], [39], Branch-and-Bound [37] o esquemas de descomposición (Benders o Dantzig-Wolfe) [28], [29], [42]. Frente a los enfoques de solución aproximados, es común encontrar metaheurísticas de búsqueda tabú [39], [41], [44] dado que tienen buen desempeño para problemas de ruteo. No obstante, se identifica el uso de diferentes metaheurísticas tanto de trayectoria (Destroy & Repair[43], GRASP [31], VNS [30]) como poblacionales (ACO [34]). Incluso se identifican formulaciones basadas en programación por restricciones (CP) solucionadas a través de metaheurísticas (ACO[32] , LNS [33]).

También hay modelos aproximados, en los cuales se formulan algoritmos heurísticos que involucran un horizonte de planeación táctico donde a parte de la operación de reposicionamiento se tiene en consideración el nivel de servicio [10], [23] o la asignación de bicicletas a estaciones [40].

En cuanto a los desarrollos a través de simulación, estos están basados en Fuzzy Inference Systems apoyados de Redes neuronales artificiales (ANN) para el pronóstico de demanda [45], [46]. Otro trabajo identificado basado en simulación es desarrollado en [49] el cual hace uso de este enfoque no precisamente para determinar cómo se debe hacer la

tarea de reposicionamiento sino para analizar y evaluar el impacto que tienen en el desempeño del sistema diferentes políticas o estrategias. Proponen y evalúan el desempeño de 7 políticas de reposicionamiento que van desde omitir la realización de reposicionamiento por parte del personal para observar si el sistema puede entrar en equilibrio sin intervención, hasta una política de reposicionamiento donde haya personal que realice la reposición además de sugerir al usuario una estación de retorno de la bicicleta.

Tabla 1-3: Enfoques de solución para el problema de reposicionamiento de bicicletas (ejecutado por personal del operador del sistema).

Enfoque de solución	Referencia
Exacto	[1], [27]–[29], [37]–[39], [42].
Aproximado	[10], [23], [30]–[36], [40], [41], [43], [44].
Simulación	[45], [46], [49].

▪ **Involucrar a los usuarios en el reposicionamiento: reposicionamiento colaborativo**

El reposicionamiento colaborativo hace énfasis en cómo llevar a cabo la tarea de reposicionamiento teniendo en cuenta tanto a personal del sistema como a los usuarios. Es de interés en este espacio saber cuáles son las estrategias seguidas con el propósito de persuadir a los usuarios para colaborar en la tarea de reposicionamiento de bicicletas. Frente al reposicionamiento seguido por parte del personal del sistema, es común que sea abordado a través de un enfoque dinámico, el cual se abordó en la sección anterior.

Inicialmente, se concibe la idea que al involucrar a los usuarios en la tarea de reposicionamiento se pretende mover bicicletas a estaciones que presenten menor desbalance. Sin embargo, en el trabajo presentado por [50] intencionalmente promueven que estaciones desbalanceadas estén aún más desbalanceadas, basados en que si solo unas pocas estaciones altamente desbalanceadas existen, la tarea de reposicionamiento

realizada por personal del sistema puede ser ejecutada en menor tiempo, haciendo esta tarea más simple, eficiente y con un mayor impacto en los costos.

Las estrategias seguidas para persuadir a los usuarios, basados en la revisión realizada, se clasifican en incentivos económicos [50]–[53] o incentivos en tiempo [11]. Los cuales a su vez pueden ser incentivos estáticos (fijos durante la operación) o incentivos dinámicos (varían de acuerdo con ciertos parámetros). Ejemplo de incentivos basados en tiempo se observa en el sistema Vélib (París), el cual ofrece un tiempo de 15 minutos extra a usuarios que lleven bicicletas a estaciones ubicadas en partes altas de la ciudad [11].

En cuanto a incentivos económicos, hay desarrollos enfocados en ofrecer como tal dinero a los usuarios [51]–[53], pero hay quienes se han enfocado en las tarifas de cobro a los usuarios a través de descuentos por dejar bicicletas en ciertas estaciones o incrementos de tarifas para evitar que sean devueltas en ciertas estaciones [50].

Frente a los parámetros que se tienen en cuenta para el cálculo de incentivos estáticos y dinámicos, los primeros son calculados teniendo en cuenta la capacidad de las estaciones y el nivel de inventario de bicicletas objetivo a mantener en cada estación para cumplir niveles de servicio planteados [11]. Por otra parte, para el cálculo de incentivos dinámicos adicional a los parámetros mencionados, se tienen en cuenta –entre otros- la hora del día, el comportamiento de la demanda y el presupuesto disponible para ofrecer. No es común, según lo identificado, que se tenga en cuenta características de los usuarios para calcular incentivos, sin embargo, en [53] involucran la posición reportada por los usuarios y estiman la distancia que están dispuestos a desplazarse, para determinar en cuáles estaciones tomar y dejar bicicletas así como el incentivo económico a ofrecer. Aun así, falta incluir características socioeconómicas de los entornos en los cuales se encuentran ubicados los sistemas en la estimación de incentivos [51].

Respecto a los enfoques de solución utilizados para la determinación de los incentivos a ofrecer a los usuarios es común que se desarrollen algoritmos heurísticos que involucren tanto el componente de incentivos como de ruteo. Específicamente, sobre los modelos en los cuales se basa la determinación de incentivos hay gran diversidad. Hay modelos basados en teoría de colas [11], programación lineal [51], optimización bi-nivel [50], arrepentimiento mínimo (con aprendizaje) [53] y modelos de control predictivo (MPC) [52].

Hasta este punto se presenta el estado del arte frente a la operación de reposicionamiento de bicicletas que ayuda al balanceo de SPB y así mitigar el impacto de la demanda asimétrica propia de estos sistemas. Es pertinente dar cierre a la revisión revelando desde nuestro punto de vista cuáles son las brechas de conocimiento y posibles puntos de intervención que pueden servir para futuras investigaciones, uno de los cuales es abordado en el presente trabajo.

Se observa una tendencia en las investigaciones sobre reposicionamiento en sistemas públicos de bicicletas en ocupar un horizonte de planeación netamente operativo, es decir, la mayoría de intervenciones están enfocadas en la planeación de rutas que deben seguir los vehículos de reposicionamiento. Dado este escenario, es pertinente que surjan contribuciones que involucren la operación de reposicionamiento desde un nivel de decisión más agregado, donde se aborde, entre otros, la asignación de recursos, la determinación de niveles de servicio o agrupación de estaciones. La importancia de incluir estas decisiones junto a la determinación de rutas se reflejará en una operación más robusta dado el contexto dinámico y variable propio de los SPB.

2. Experiencias de Operadores de SPB de Bicicletas en América Latina

Además de las tendencias desde la literatura frente al reposicionamiento de bicicletas evidenciadas en el Estado del Arte, se hace un acercamiento a las características y realidades a las que se enfrentan día a día operadores de SPB, específicamente en el contexto de América Latina. La intención en este caso es contrastar aspectos reportados en la literatura y la experiencia directa de diferentes operadores de SPB. Es importante resaltar que en la literatura son pocos los aportes que se encarguen de reportar casos específicos de la operación de SPB. En [54] se hace un análisis de los patrones de los usuarios del Vélib' y en [55] analizan la operación de reposicionamiento en nueve SPB de Europa y Norteamérica.

Inicialmente, se identifican a través de www.bikesharingmap.com¹ 31 SPB en América Latina (octubre 2016), de los cuales se buscó contactar a 11 (1 Colombia, 1 Ecuador, 1 Chile, 2 Argentina, 2 México y 4 Brasil). Adicionalmente, un encuentro internacional de SPB, realizado en Medellín, Colombia en 2016 (6 y 7 de octubre) permitió establecer una interacción personal con diferentes operadores de SPB con el propósito de contar con la colaboración para recoger sus experiencias en la operación diaria. Se pudo establecer contacto con cuatro sistemas u operadores de sistemas en Colombia, Chile, México y Brasil/Argentina. Específicamente, se contó con la participación y colaboración de Báxter Gaviria, analista de logística del Sistema de Bicicletas Públicas del Valle de Aburrá-EnCicla (Colombia); Daniel Trujillo, gerente de comunicaciones y marketing de

¹ The Bike-sharing World Map nació en 2007 por iniciativa de Paul DeMaio con el propósito de ser una fuente de información acerca del crecimiento global de SPB. Actualmente comparte información de más de 500 sistemas incluyendo sitio web, número de estaciones y bicicletas, y fecha de inicio del sistema.

BikeSantiago (Chile); Hilda Ortiz, coordinadora de operaciones en Clear Channel México, encargados de la operación de ECOBICI (México); y, Mariano Pérez, director de Sertel Argentina, con experiencia en operación de sistemas en Brasil y Argentina.

Se diseñó una entrevista semiestructurada individual llevada a cabo de manera personal (Colombia, Chile) y online (México, Brasil/Argentina). El alcance de la entrevista está enmarcada en cuatro líneas: contextualización, gestión de la demanda, reposicionamiento, e incentivos y desafíos. La Tabla 2-1 resume el cuestionario compartido a los operadores. Lo anterior, con el objetivo de conocer cómo se lleva a cabo la tarea de reposicionamiento de bicicletas en cada uno de los sistemas e identificar puntos de intervención desde la visión de los operadores.

Tabla 2-1: Cuestionario de entrevista semiestructurada compartida a operadores de SPB.

Contextualización
Infraestructura: bicicletas, estaciones, vehículos para reposicionamiento
Características del servicio: zona de cobertura, días y horario de operación, horarios picos y valle
Características de los usuarios: público objetivo, perfil
Caracterización del Balanceo
¿Qué estrategias emplean para atenuar el desbalanceo en las estaciones?
¿Cómo se efectúa la tarea de reposicionamiento con vehículos? Estimación de necesidades de las estaciones; se reposiciona considerando estaciones individuales o grupos de estaciones; si se usa agrupación, que criterios tienen para formarlos; cómo se define el inventario mínimo y máximo para las estaciones
¿Cómo se evalúa el desempeño de las tareas de reposicionamiento?
Incentivos
¿Usan incentivos para involucrar usuarios en las tareas de reposicionamiento? ¿cuál cree que podría ser el impacto que podría tener su uso?
Desafíos
¿Cuál es el reto que considera más difícil en realizar el balanceo del sistema?

En lo que resta de la sección, se resumen los principales aprendizajes obtenidos de las entrevistas, iniciando por la contextualización, siguiendo con el proceso de gestión de la demanda, la tarea de reposicionamiento y, finalmente, con la temática de incentivos en SPB y los principales desafíos en la operación.

2.1 Contextualización

En primer lugar, se muestra el tamaño de los sistemas para dimensionar la operación a la que se enfrenta el equipo de las personas entrevistadas, así como características del servicio y de los usuarios que tienen impacto en decisiones posteriores frente a la gestión de la demanda y el balanceo del sistema.

El Sistema ECOBICI de ciudad de México, inaugurado en febrero de 2010, cuenta -a 2016- con 452 estaciones y 6100 bicicletas, haciendo de este el sexto SPB más grande a nivel mundial en cuanto a número de préstamos, con cerca de 35000 viajes diarios. Por otro lado, el Sistema BikeSantiago inaugurado en octubre de 2013 (previamente funcionaba el SPB Providencia) tiene a disposición de la ciudad 200 estaciones y 2000 bicicletas. Por su parte, Serttel, tiene a su cargo la operación de 17 SPB entre los que destacan BikeRio, en Brasil (260 estaciones) y Ecobici, en Argentina (90 estaciones). Por último, el Sistema EnCicla en Colombia, cuenta actualmente con 51 estaciones y 1300 bicicletas.

Respecto a las características del servicio, el área de cobertura o polígono de operación es un aspecto importante, relacionado con la densidad de estaciones en la red del sistema, entendida como el número de bicicletas por kilómetro cuadrado. ECOBICI cuentan con un polígono de operación de 35 Km² concentrados en la zona céntrica de la ciudad a través de tres delegaciones: Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez. Actualmente, el 30% de las estaciones están ubicadas cerca de líneas de transporte público, fomentando la intermodalidad. En contraste, se encuentran los casos de BikeSantiago y EnCicla, donde no se tiene una zona de cobertura bien definida. El primero de ellos, BikeSantiago, tiene cobertura en 14 municipalidades (comunas o delegaciones) de la ciudad, donde la mayoría de estaciones están concentradas en el centro de la ciudad y siendo pocas en la periferia donde se presta el servicio en municipalidades que no están conectadas directamente a otras (no adyacentes), como es el caso de Maipú. Frente al segundo caso, EnCicla, las estaciones del sistema están desplegadas en el sector plano de la ciudad, teniendo cobertura en 7 de las 16 comunas. Similar al caso chileno, la mayoría de estaciones se concentran en comunas centrales (La Candelaria, Laureles – Estadio).

Realizando una visualización geográfica del caso mexicano, chileno y colombiano (Figura 2-1), se puede intuir que una adecuada planeación del área de operación es una decisión

que puede facilitar o dificultar el balanceo del sistema, ya que, sistemas menos densos conllevan a mayores desplazamientos de los vehículos encargados del reposicionamiento. Por ello, dada la importancia de definir adecuadamente las zonas de cobertura y su repercusión en la densidad de la red del sistema, Serttel en su proceso de planificación e implementación de SPB plantea ubicar entre 8 y 14 estaciones por Km² y tener de 8 a 15 bicicletas por cada 1000 habitantes.

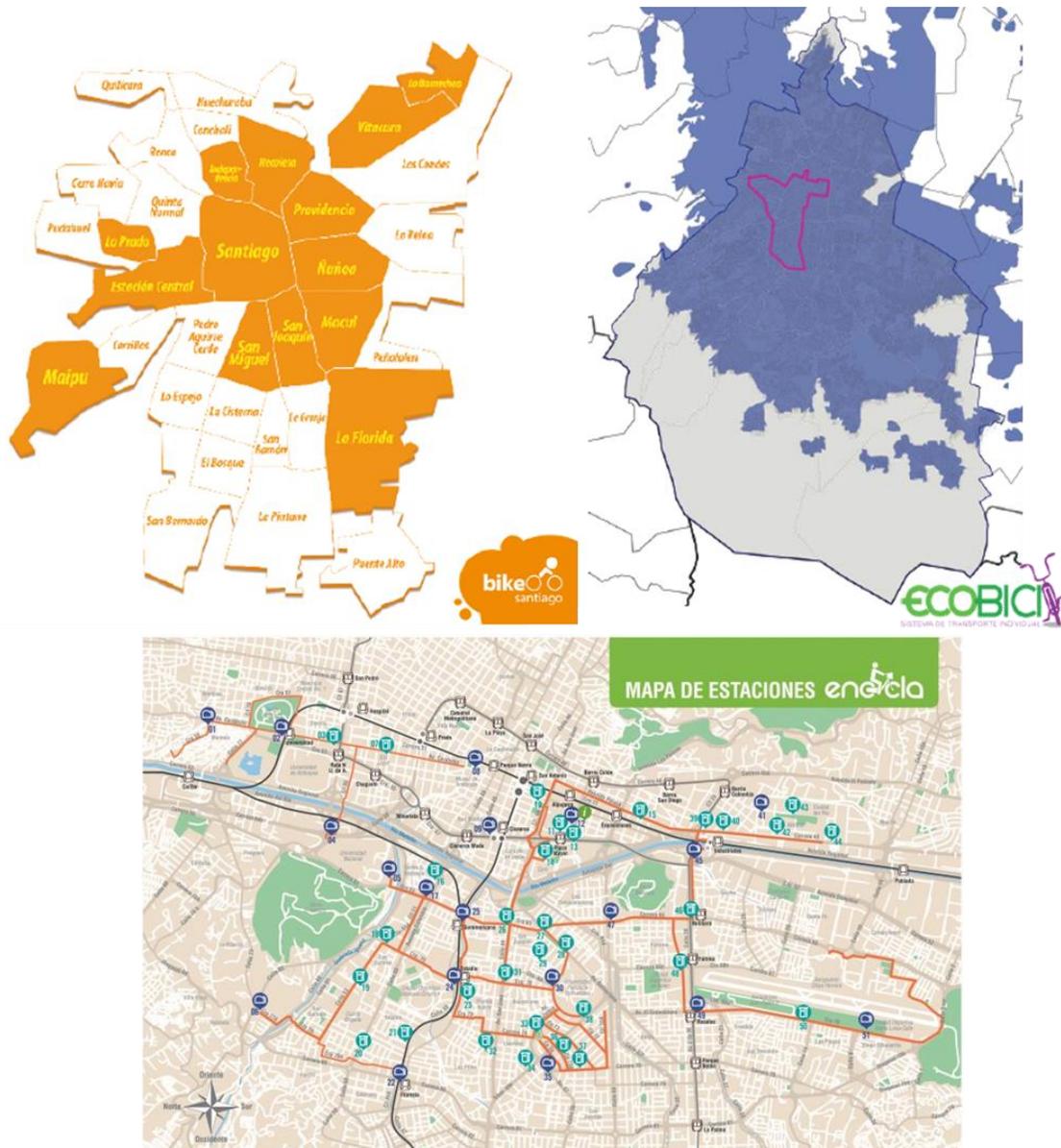


Figura 2-1: Zona de cobertura SPB contactados.

Por último, las características de los usuarios que usan el sistema puede ser un punto de apoyo para la gestión de la demanda y una adecuada disposición de los recursos,

aportando, entre otros, a una adecuada proyección de los puntos donde se debe concentrar la operación en diferentes espacios temporales.

Un punto en común entre los sistemas contactados es que la mayoría de sus usuarios están entre los 25 y los 35 años, siendo en su mayoría hombres (alrededor del 60%). Ahora bien, la importancia de identificar el perfil de los usuarios está relacionado con la actividad principal a la que estos se dedican. El sistema BikeSantiago y ECOBICI están enfocados en personas que laboren ya que no son sistemas gratuitos (membresía BikeSantiago: \$85 USD anuales; membresía ECOBICI: \$25 USD anuales). Por otro lado, el Sistema Encicla, gratuito, tiene principalmente a estudiantes como usuarios.

Desde la definición del polígono de operación de ECOBICI se evidencia el tipo de usuarios a los que está destinado el sistema ya que este se ubica en el centro de la ciudad, foco de actividades laborales, administrativas y bancarias. Así, 5 de cada 10 usuarios no viven en el polígono de operación, mientras el 15% de usuarios viven en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), por ello es fundamental que la ubicación de las estaciones propicie la intermodalidad. Al igual que en México, BikeSantiago concentra su operación en ofrecer una alternativa de transporte para usuarios de ingresos medios-altos, que se movilizan por la zona central de la ciudad (Santiago centro, Providencia, Vitacura).

2.2 Gestión de la demanda

La gestión de la demanda, enfocada hacia cómo se determina el número de bicicletas o puntos de anclajes disponibles en las estaciones, es de interés dado que tiene una relación estrecha con la tarea de reposicionamiento, foco central del presente documento.

Previo a esta planeación, hay una decisión a un nivel decisorio más agregado que mencionan los operadores de sistemas y que tiene repercusión directa en niveles más bajos, se trata de la configuración de la red del sistema. ¿Es preferible estaciones de capacidad media/baja a distancias cortas o estaciones de alta capacidad a una mayor distancia entre ellas? La decisión entre operadores es clara, es preferible estaciones con media/baja capacidad que ayuden a configurar una red densa (estaciones/Km²). Esta decisión ayuda a amortiguar la demanda asimétrica fluctuante de estos sistemas, ya que si una estación no puede cumplir los requerimientos de los usuarios (bicicletas/puntos de

anclaje), este puede desplazarse fácilmente a una estación cercana. La concepción de que los usuarios puedan desplazarse entre estaciones cercanas abre la posibilidad a que se plantee balancear el sistema a través de grupos de estaciones en vez de estación por estación. Esta agrupación, comúnmente, recibe el nombre de puntos de demanda, los cuales son configurados por cantidades pequeñas de estaciones que tienen en común ciertos criterios, destacándose la proximidad geográfica y el tipo de requerimientos.

En cuanto a la determinación del número de bicicletas o puntos de anclaje a mantener en cada estación es común que esté basada en la experiencia del personal operativo encargado de monitorear el sistema, acompañados de software que muestra los niveles de inventario en las estaciones en tiempo real como soporte a la toma de decisiones. Que esta decisión esté basada en la experiencia hace referencia en que el personal conoce de manera empírica el comportamiento del sistema, en términos de horarios pico/valle, estaciones generadoras o receptoras de viajes de acuerdo con la hora del día y principales orígenes-destinos de los usuarios. Sin embargo, no hay un soporte que ayude a cuantificar y estandarizar la operación. Por ejemplo, qué tan generadoras/receptoras son unas estaciones con respecto a otras, cuál es el flujo transaccional real de las estaciones de acuerdo con la hora del día, entre otras cuestiones. Por ello, el software que monitorea en tiempo real los niveles de inventario en las estaciones permite fácilmente identificar estaciones que necesitan ser intervenidas, ya que, las estaciones van cambiando su color de acuerdo con políticas fijadas. Una política común es fijar, en términos porcentuales, el inventario mínimo y máximo a mantener en las estaciones (EnCicla utiliza un 25%-75%, Es decir, que el número de bicicletas en las estaciones esté entre un 25% y un 75% de su capacidad). Por lo regular, estos niveles son fijos para todas las estaciones y durante todo el periodo de operación, un supuesto que sugiere uniformidad de comportamiento en las estaciones, lo cual en un contexto de SPB no siempre se cumple. Otra política de inventario diferente a la de fijar niveles mínimos y máximos, es la seguida por Serttel donde se busca cumplir una relación entre puntos de anclajes y bicicletas de 2 a 1.

2.3 Reposicionamiento de bicicletas

Teniendo identificadas las necesidades de bicicletas y puntos de anclajes en las estaciones, surge la necesidad de reposicionar bicicletas a través de la red con el propósito de balancear el sistema para cumplir con las políticas y niveles de servicio fijados.

Previo a la ejecución del reposicionamiento en campo, es necesario planear zonas de reposicionamiento, las cuales son conjuntos de estaciones que luego son visitadas por los vehículos encargados del reposicionamiento. Los operadores hacen énfasis en la importancia de definir zonas de reposicionamiento adecuadas, lo que permitiría menores desplazamientos a los vehículos, un factor importante dado que en la actualidad la mayoría de ciudades medianas y grandes sufren problemas de congestión vehicular.

Para definir estas zonas, tradicionalmente se ha tenido en cuenta factores geográficos de distancia y accesibilidad, sin embargo, los operadores de sistemas han manifestado su interés en definir zonas que incluyan el comportamiento de la estación (generadora, receptora, autobalanea) o las condiciones de tráfico vial. Si bien este es el propósito, resulta un desafío para los operadores configurar zonas de reposicionamiento que incluya criterios más allá de los geográficos. Entre los sistemas consultados, es común que se tengan configuradas zonas en las cuales en cierto momento de la operación la mayoría de sus estaciones requieren bicicletas o puntos de anclaje, por lo que es imposible para un vehículo balancear estas zonas sin tener que desplazarse al menos a una zona adyacente. Por ejemplo, el sistema ECOBICI de México tiene dividido su polígono de operación en 15 zonas de reposicionamiento, con alrededor de 30 estaciones asignadas por zona. Se asigna un tipo de vehículo por zona (flota heterogénea) de acuerdo con la accesibilidad y una zona puede tener asignados varios vehículos dependiendo de la capacidad, demanda de la zona y horario en el que se ejecute el reposicionamiento. En el caso de BikeSantiago, se tienen tres grandes zonas (Sector alto, el centro y el poniente) de acuerdo con los patrones de movilidad. Por su parte, el sistema EnCicla cuenta con 9 vehículos de reposicionamiento distribuidos en 8 zonas. Finalmente, Serttel en la operación de los sistemas de Sao Paulo y Río de Janeiro tiene definidas 4 zonas de reposicionamiento de acuerdo con los requerimientos de las estaciones, accesibilidad y congestión vial.

La ejecución de la tarea de reposicionamiento por parte de los operadores, similar a lo identificado en la literatura, es dividido de acuerdo con el nivel de actividad del sistema. Así, se tiene un reposicionamiento programado el cual es ejecutado durante horarios de baja intensidad y al cierre de la operación con el propósito de preparar el sistema para horarios picos o para las primeras horas de la mañana del día siguiente, respectivamente. Una particularidad se presenta en EnCicla al igual que en ECOBICI donde al cierre de la

operación las bicicletas no son dispuestas de acuerdo con las necesidades del día siguiente sino en estaciones donde las condiciones de seguridad se garanticen y una hora previa al inicio de operación sí son dispuestas donde son requeridas.

Complementariamente, existe un reposicionamiento más reactivo, que busca en horarios de alta intensidad cumplir de la mejor manera con los niveles de servicio fijados. Es de resaltar que las políticas de requerimientos de bicicletas y/o puntos de anclaje a mantener en las estaciones durante los periodos de alta intensidad son violados constantemente con el fin de prever la demanda de los usuarios en el corto plazo. Por lo tanto, se puede hablar de una tarea de reposicionamiento programado donde hay cierto nivel de planeación de la ejecución y un reposicionamiento reactivo, donde los operadores de los vehículos están atentos a las alertas generadas por el personal encargado de monitorear en tiempo real la red del sistema.

Se identifica una práctica común entre operadores de sistemas en los horarios de actividad alta, la cual es llamada como pulmones o corrales. Esta práctica consiste en acumular (o evacuar) bicicletas en las estaciones más allá de su capacidad teórica. Si la estación es manual no hay mayores inconvenientes, pero en el caso de estaciones automáticas esta práctica lleva a la utilización de espacio público, por lo que a futuro puede generar problema el uso de estas medidas, por lo tanto, debe ser controlada y mejor planeada su utilización. Una particularidad es presentada en BikeSantiago, donde las personas encargadas de ejecutar los pulmones o corrales son denominados pedaleros. Los pedaleros son estudiantes universitarios que se desplazan en bicicleta entre las estaciones y su tarea es llevar o liberar varias bicicletas entre las estaciones de acuerdo con las necesidades. Esta medida fue tomada dadas las dificultades presentadas en movilidad durante horas de alta actividad del sistema, por lo que el desplazamiento de los vehículos de reposicionamiento se ve afectado o imposibilitado.

Tradicionalmente, se realiza el reposicionamiento a nivel de estaciones, pero en la actualidad ha surgido una idea relacionada con realizar el reposicionamiento por puntos de demanda. Para evaluar la factibilidad de realizar un reposicionamiento por puntos de demanda se debe partir de un sistema denso, el cual garantice distancias cortas entre las estaciones desde el punto de vista de los usuarios. En un reposicionamiento basado en puntos de demanda se emite una señal de reposicionamiento cuando un conjunto de

estaciones presenta desbalance, en vez de lanzar una señal por cada vez que hay una estación desbalanceada. En BikeSantiago, por ejemplo, se lanza una señal de reposicionamiento cuando en un sector se presentan tres o cuatro estaciones desbalanceadas. En ECOBICI están actualmente realizando pruebas piloto para realizar su reposicionamiento a través de puntos de demanda, para lo cual se tienen criterios como que las estaciones tengan el mismo comportamiento en el rango horario, que sean cercanas para el usuario (alrededor de 300 m) y deben estar interconectadas sin barreras físicas. Esta idea es sustentada en tener una estación que sea de mayor uso transaccional, es decir, donde siempre acude el usuario y a las otras acude solo porque en la primera no encuentra bicicletas o puntos de anclaje. El flujo transaccional de las estaciones revela la necesidad de priorizar el reposicionamiento entre las estaciones, ya que, será de mayor trascendencia tener balanceadas aquellas estaciones que son altamente visitadas frente a estaciones con bajos niveles de actividad.

Por último, es necesario mencionar cómo se evalúa el desempeño de la tarea de reposicionamiento. Es común evaluar el desempeño en función del tiempo que las estaciones permanecen llenas/vacías o exceden los límites fijados. En el caso de los sistemas operados por Serttel, una estación que no se encuentre entre el 20% y el 80% de su capacidad no puede tardar más de 3 horas en esta condición, a partir de lo cual se deriva el nivel de servicio medido como el tiempo total del día que las estaciones están fuera de los límites establecidos. Además, poseen un histograma con el nivel de ocupación de las estaciones cuya meta es tener la forma de una distribución triangular cuyo valor de frecuencia más alto sea el 50%. BikeSantiago tiene una evaluación similar donde miden el tiempo en que una estación se mantiene llena o vacía, teniendo en consideración que durante ciertos horarios de la operación se permiten estaciones en dicha condición. Por último, ECOBICI cuenta con indicadores como el nivel de servicio de bicicletas/puntos de anclajes y la proporción real de bicicletas en calle. El nivel de servicio de bicicletas o puntos de anclajes se mide basado en tiempo de estaciones llenas o vacías, considerando el compromiso de un nivel de servicio del 95%.

2.4 Incentivos como apoyo a las tareas de reposicionamiento

A los operadores de SPB latinoamericanos contactados también se les consultó acerca de la idea de involucrar a los usuarios en labores de reposicionamiento a través del ofrecimiento de incentivos.

La visión general es que con el tema de incentivos se trataría de cambiar un paradigma en la operación, el cual no ha de ser fácil de implementar. Las dos principales razones expuestas están relacionadas con las preferencias de los usuarios y la etapa de desarrollo en la que se encuentran los SPB en Latinoamérica. La primera razón hace referencia a la dificultad de cambiar las líneas de deseo o modificar orígenes-destinos de los usuarios. Acá se deben considerar aspectos como el tipo y la cantidad de incentivo a ofrecer para persuadir a los usuarios, además conocer los movimientos de los usuarios y contar con un sistema denso con el propósito de que, al ser implementada una política de incentivos, se les sugieran a los usuarios reposicionamientos cercanos a sus orígenes/destinos. La segunda razón concierne a que los SPB en Latinoamérica apenas están en sus primeros aprendizajes de implementación y operación, por lo que los usuarios también se encuentran en un aprendizaje sobre las diferencias entre este sistema de transporte frente a los tradicionales. Un ejemplo de este aprendizaje es que, si bien en la mayoría de casos los usuarios pagan una membresía, esto no representa que el operador deba garantizar tener disponibilidad de bicicleta/punto de anclaje en la estación en el momento requerido por el usuario, como ocurriría en un servicio de taxi o de buses donde se tienen unas frecuencias de operación relativamente constantes.

Por otro lado, se exponen dos ideas por parte de los operadores que aportarían el tema de incentivos. Una idea es que los sistemas de incentivos deben ser sectorizados y por ello requieren una planificación adecuada. Se menciona específicamente su funcionamiento en zonas como laderas donde los usuarios prestan bicicletas, pero no las retornan; también, puede concebirse en zonas céntricas de las ciudades donde las condiciones de tráfico afectan la movilización de los vehículos de reposicionamiento, por lo que se impactaría en reducir la necesidad de regulación. Esta sectorización de incentivos incluiría segmentación de usuarios, ya que podría ser más factible que turistas se acojan

a un sistema de incentivos dado que sus recorridos pueden ser flexibles y que las tarifas de uso son frecuentemente más altas frente a un usuario regular.

La segunda idea expuesta está relacionada con la cantidad de incentivo a ofrecer, que no necesariamente es una retribución monetaria. Se consideraría una barrera para los incentivos la cantidad de dinero (pequeña) ofrecida como incentivo comparada con las membresías pagadas por los usuarios, por lo que, podría considerarse el impacto social y ambiental que tendrían los usuarios al colaborar en el balanceo del sistema. Para el usuario sentir que colabora o que está haciendo algo bueno puede persuadirlo a colaborar más allá del incentivo económico.

Previo a planear la implementación de programas de incentivos, los operadores coinciden en que los primeros esfuerzos en el corto y mediano plazo deben estar orientados a medir el impacto que tendría involucrar a los usuarios en tareas de reposicionamiento. El impacto se debe medir desde puntos de vista financiero, operativo (reducción de tareas de reposicionamiento por parte de personal del sistema) y ambiental/social. Esta medición del impacto, principalmente operativo y financiero abre la puerta para persuadir a operadores de sistemas de implementar estrategias de reposicionamiento colaborativas.

2.5 Desafíos en el balanceo de SPB

Por último, en las entrevistas se indaga sobre los puntos críticos y desafiantes en la operación diaria de SPB. En común, se habla de dos puntos: el reposicionamiento durante una actividad alta del sistema y la medición del nivel de servicio. El primero es el punto más crítico de la operación, reta a los operadores a reinventarse constantemente, cambiando y adaptando estrategias conforme cambia la ciudad y los usuarios. La tarea de reposicionamiento en momentos de alta actividad no solo depende de la gestión del operador, también hay factores exógenos que se han mencionado como las condiciones de tránsito que impiden llegar en los tiempos deseables a las estaciones. Si a lo anterior se le suma que a medida que el sistema crece será más complicado tener una operación ideal, da luces sobre un punto fuerte donde intervenir. Es decir, se debe mejorar lo máximo posible la gestión del operador para que el impacto de factores exógenos sea mínimo o por lo menos se puedan amortiguar. Por ello, intervenciones que vayan más allá de

únicamente planear las rutas a seguir por los vehículos, tendrá un aporte en preparar de la mejor manera al sistema durante los periodos de actividad alta.

Frente a la medición del nivel de servicio, la preocupación de los operadores radica en que actualmente la demanda sin atender no puede ser calculada en su totalidad. En los SPB se puede presentar demanda sin atender por dos vías: un usuario llega a prestar una bicicleta y no hay disponibilidad o un usuario quiere dejar una bicicleta en una estación y no hay puntos de anclajes disponibles. Actualmente, solo es posible medir de manera realista la demanda sin atender debido a que no hay puntos de anclajes disponibles, ya que, los usuarios al identificar dicha situación pasan su tarjeta en los tótems de las estaciones reportando la situación con el fin de obtener tiempo extra y encontrar otra estación donde dejar la bicicleta. La otra demanda, estación sin bicis, representa un desafío, ya que, un usuario al estar cerca de la estación y verla vacía, puede que no se acerque y pase de largo, o aguarda un tiempo esperando disponibilidad y desista de usar el servicio o se desplaza a otra estación cercana.

A modo de cierre, es pertinente mencionar aspectos relevantes de los Sistemas que accedieron a contar sus experiencias para tener un panorama de los SPB en Latinoamérica. En la actualidad, los SPB latinos están atravesando por la primera etapa de aprendizajes concluyentes sobre la implementación. Estos aprendizajes van a diferentes niveles: financiación, planeación, temas contractuales, sensibilización de los usuarios, operación, entre otros. Por ello, es común encontrar aspectos por mejorar en la planeación de la operación, en lo que concierne a la investigación, contando con un soporte cuantitativo para la toma de decisiones.

En el caso ECOBICI, se tiene un sistema que cuenta con el respaldo de una empresa como Clear Channel con amplia experiencia en la operación de SPB a nivel mundial, destacando Bicing en Barcelona. Se tuvo una planeación adecuada en el polígono de operación desde la fase inicial, teniendo claridad hacia donde expandir el sistema en fases posteriores. Precisamente la ubicación inicial de las estaciones se basó en los lineamientos del sistema Bicing, considerando temas como el tráfico, vías de acceso, sitios potencialmente generadores o atractores de viajes, fomentar la intermodalidad y temas de seguridad.

En cuanto a Serttel, es una empresa que opera 17 SPB en Brasil y Argentina, asegurando una retroalimentación constante. Se intenta involucrar un componente de soporte cuantitativo a todas sus decisiones y políticas. Como se menciona, en la fase de planificación se tiene un objetivo de fijar entre 8 y 14 estaciones por Km², así como un número de bicicletas por cada 1000 habitantes. En cuanto a lo específico en la operación, se tienen unas relaciones entre bicicletas y puntos de anclaje a mantener, así como la forma de evaluar el desempeño de la tarea de reposicionamiento.

BikeSantiago es un Sistema que logró implementarse y consolidarse en 2013 gracias a una reestructuración luego de varios procesos operativos y contractuales, que empezó con el Sistema de bicicletas compartidas de Providencia –primer SPB en Latinoamérica- en el 2008. Un aspecto que dificulta la operación de BikeSantiago es el área de cobertura, ya que tiene cobertura en 14 municipalidades, como se menciona anteriormente. Sin embargo, es pertinente mencionar un tema político inmerso en esta decisión. En Chile las municipalidades tienen un alto grado de autonomía en sus decisiones, por lo que podían surgir múltiples SPB que operaran como islas independientes, caso que se presentó con la municipalidad de Las Condes. Debido a este antecedente, se realizó una licitación para un sistema intercomunal en Santiago, que incluyera municipalidades con diferentes realidades sociales, culturales y económicas. Este contexto soporta la decisión de un área de operación extensa, donde se tiene que la mayoría de estaciones están concentradas en el centro de la ciudad (Providencia, Santiago, Ñuñoa, Independencia, Recoleta, Estación Central), mientras en la periferia las estaciones son pocas como en las municipalidades de Maipú (alrededor de 500.000 habitantes) que cuenta con cuatro estaciones y La Florida (alrededor de 350.000 habitantes) con dos. También es de destacar la práctica de los pedaleros, una forma de mitigar las dificultades de tráfico en el centro de la ciudad que impide un fácil y rápido acceso de vehículos de los vehículos de reposicionamiento.

Frente a EnCicla, es importante hacer claridad que es un Sistema 100% gratuito financiado por una entidad gubernamental. Surge en 2010 como una iniciativa de estudiantes universitarios. Es una muestra que se pueden unir esfuerzos gubernamentales y educativos en la concepción, planificación e implementación de SPB. Desde sus inicios hasta la actualidad (2016) ha estado en constante expansión, por lo que actividades operativas como la gestión de la demanda y el balanceo del sistema presentan dificultades

al no haber logrado una estabilidad. Actualmente, tiene presencia en 7 comunas de la ciudad de Medellín. Sin embargo, dado que la entidad financiadora es de carácter metropolitano sus proyectos de expansión incluyen un área de operación de varias ciudades, lo que significa un reto tanto en la planificación de la densificación del sistema como en la operación diaria de un sistema con un área de injerencia grande.

Así, se evidencia lo visto en la revisión del estado del arte, donde hay decisiones tomadas por factores exógenos, los cuales no son de fácil intervención. Decisiones que regularmente tienen un impacto en un nivel de decisión agregado, por lo que generan un impacto directo en decisiones operativas como el balanceo del sistema. Por ello, es importante a través de este tipo de acercamientos identificar diferentes características y estrategias seguidas por los operadores para llevar a cabo la operación diaria de los sistemas, cómo realizarla de la mejor manera posible tal que se logren mitigar los impactos tanto de factores exógenos como endógenos.

3. Estrategias para el reposicionamiento de bicicletas en SPB

En las secciones anteriores se abordó el reposicionamiento de bicicletas en SPB tanto desde el punto de vista académico como desde la ejecución de esta tarea por parte de operadores de sistemas en Latinoamérica. En este espacio, luego de un adecuado estudio y retroalimentación del panorama actual del reposicionamiento de bicicletas, se propone un aporte que tiene impacto a nivel académico y en la planeación del reposicionamiento.

Muchos autores han abordado el reposicionamiento desde la perspectiva del ruteo. Sin embargo, reposicionamiento no significa estrictamente ruteo. Hay decisiones asociadas que involucran un nivel más agregado de planeación. Así, se puede pensar en el reposicionamiento considerando objetivos frente a niveles de servicio, niveles de inventario o configuración de zonas. Decisiones que deben tomarse previo a la definición de rutas a seguir por parte de los vehículos y que tienen impacto directo sobre esta tarea, facilitándola o complicándola. La necesidad de involucrar decisiones a un nivel más agregado quedó revelada a partir de la literatura revisada, ya que el foco está centrado en la planeación de rutas. Así mismo, desde los operadores se manifiesta que el reposicionamiento no debe centrarse exclusivamente en la planeación de rutas dado el contexto dinámico al que se enfrentan en la operación diaria.

Teniendo como punto de partida los antecedentes presentados, se propone un aporte desde un horizonte de planeación táctico. Una situación problemática comúnmente identificada en los sistemas consultados son las grandes distancias que deben realizar los vehículos con el fin de balancear el sistema. Una de las raíces de esta problemática está directamente relacionada con el conjunto de estaciones que se le asigna a cada vehículo, es decir, la zona de reposicionamiento. La determinación de zonas de reposicionamiento

en la mayoría de casos está fundamentada en un criterio geográfico (distancia y accesibilidad). Sin embargo, tener en cuenta solo este criterio, puede resultar en configuraciones de zonas con requerimientos en un solo sentido, es decir, están cargadas hacia las necesidades de bicicletas o de puntos de anclaje. Consecuentemente, es inminente que los vehículos visiten zonas adyacentes para cumplir con los objetivos de balanceo. Por lo tanto, es pertinente que en la decisión de configurar zonas de reposicionamiento se le consideren criterios más allá del geográfico, en especial, se propone mitigar esta situación al tener en cuenta los requerimientos de las estaciones durante los diferentes periodos de operación y la prioridad con la que se debe realizar el reposicionamiento.

Las estrategias para configurar las zonas de reposicionamiento de acuerdo con la unidad básica de medida se pueden abordar desde dos frentes. El primer frente, el más usual, es determinar las zonas como una agrupación de estaciones. El segundo frente, el cual ha empezado a tomar fuerza, es configurar zonas a partir de puntos de demanda. Los puntos de demanda son un conjunto reducido de estaciones que comparten características similares que permite unirlas y abordarlas como un único elemento. Es de precisar que un enfoque a partir de puntos de demanda solo puede concebirse en sistemas densos, es decir, aquellos con al menos 10 estaciones/Km² [56].

Se propone un modelo matemático de optimización de programación binaria. Basado en el trabajo presentado por [57] en un contexto de transporte de mercancía donde asignan órdenes de clientes a vehículos de envío, se propone para el problema que acá se aborda la función objetivo y el conjunto de restricciones asociadas a asignar estaciones a zonas de reposicionamiento. El modelo de zonificación propuesto en este trabajo, además de la proximidad geográfica tiene en consideración los requerimientos de bicicletas/puntos de anclaje de las estaciones, así como la prioridad para el reposicionamiento, siendo el conjunto de restricciones asociadas a estas consideraciones lo novedoso del modelo presentado.

La consideración de requerimientos busca proponer zonas de reposicionamiento equilibradas, promoviendo que en una zona se tengan tanto estaciones generadoras como receptoras de viajes, de tal manera que al contrastar los requerimientos de bicicletas y de puntos de anclajes sea lo más neutral posible. Por otro lado, la prioridad de

reposicionamiento de las estaciones, entendida como una relación entre el desbalance y el flujo transaccional, es pertinente considerarla promoviendo así que estaciones con alto flujo transaccional y altamente desbalanceadas, las cuales requieren un reposicionamiento ágil, no queden concentradas en pocas zonas dificultando así las labores por parte de los vehículos de reposicionamiento. La definición de prioridad está basada en el trabajo presentado en [58].

El modelo considera un conjunto de estaciones (E) las cuales se deben asignar a una zona, un conjunto de estaciones candidatas (C) entre las cuales se escogerán las estaciones que serán el centroide de las zonas de reposicionamiento, y un conjunto de prioridades (P) que indican la prelación en el reposicionamiento para cada estación.

En la Tabla 3-1 se muestran los parámetros y las variables de decisión usados. El parámetro de conexión (c_{ij}) es calculado en función de un indicador de accesibilidad y el radio de cobertura. Esto quiere decir que, Un par de estaciones estarán conectadas únicamente si están dentro del radio de cobertura y si no existe una barrera física que impida el desplazamiento directo de un vehículo entre el par de estaciones en mención. Así, c_{ij} se calcula como:

$$\begin{aligned} &\forall (i \in E, j \in C) \\ & \text{if } (d_{ij} < d_{max}) \\ & \quad I_{ij}^d := 1 \\ & \quad c_{ij} := I_{ij}^d * I_{ij}^a \\ & \quad \text{else} \\ & \quad \quad c_{ij} := 0 \\ & \text{end if} \end{aligned}$$

El parámetro de prioridad (p_{il}) es binario, indicando si una estación posee dicha prioridad o no. Cada estación posee una única prioridad. Los últimos parámetros (balance y prioridad) permiten controlar los factores mencionados anteriormente relacionados con promover zonas balanceadas en cuanto a requerimientos y el tipo de estaciones asignadas a cada zona.

Tabla 3-1: Listado de parámetros y variables de decisión usadas en el modelo.

Parámetros

d_{ij}	distancia entre la estación $i \in E$ y la estación $j \in C$
I_{ij}^d	indicador de cobertura entre la estación $i \in E$ y la estación $j \in C$
I_{ij}^a	indicador de accesibilidad entre la estación $i \in E$ y la estación $j \in C$
c_{ij}	si existe conexión entre la estación $i \in E$ y la estación $j \in C$
$dmax$	radio de cobertura
r_i^+	requerimiento de bicicletas en la estación $i \in E$
r_i^-	requerimiento de puntos de anclaje en la estación $i \in E$
p_{il}	si la estación $i \in E$ tiene la prioridad de reposicionamiento $l \in P$
cl	número de zonas de reposicionamiento a formar
balance	porcentaje máximo de desbalance permitido en los requerimientos de cada zona
prioridad	diferencia en número de estaciones por cada tipo de prioridad frente a un valor teórico en cada zona
Variables de decisión	
x_{ij}	1, si la estación $i \in E$ pertenece a la zona con centro en la estación $j \in C$ 0, ECC
y_j	1, si la estación candidata $j \in C$ es centro de una zona 0, ECC

El modelo de programación binaria propuesto para la configuración de zonas de reposicionamiento en un contexto de SPB es presentado en las ecuaciones (1) – (10).

$$F. O: \min z = \sum_{i \in E} \sum_{j \in C} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s. a:

$$\sum_{j \in C} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in E \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq c_{ij} y_j, \quad \forall i \in E, j \in C \quad (3)$$

$$\sum_{j \in C} y_j = cl \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{i \in E} r_i^+ x_{ij} - \sum_{i \in E} r_i^- x_{ij}}{\sum_{i \in E} r_i^+ x_{ij} + \sum_{i \in E} r_i^- x_{ij}} \leq balance, \quad \forall j \in C \quad (5)$$

$$\frac{-\sum_{i \in E} r_i^+ x_{ij} + \sum_{i \in E} r_i^- x_{ij}}{\sum_{i \in E} r_i^+ x_{ij} + \sum_{i \in E} r_i^- x_{ij}} \leq balance, \quad \forall j \in C \quad (6)$$

$$\sum_{i \in E} p_{il} x_{ij} - \left\lfloor \frac{\sum_{i \in E} p_{il}}{cl} \right\rfloor y_j \leq prioridad, \quad \forall j \in C, l \in P \quad (7)$$

$$\left\lfloor \frac{\sum_{i \in E} p_{il}}{cl} \right\rfloor y_j - \sum_{i \in E} p_{il} x_{ij} \leq prioridad, \quad \forall j \in C, l \in P \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad (10)$$

La función objetivo (1) busca minimizar la suma de las distancias entre las estaciones que son elegidas como centros de las zonas y cada una de las estaciones que le son asignadas. La elección de dicha función objetivo puede generar problemas, ya que se pueden configurar zonas poco compactas, es decir, en vez de formarse zonas circulares se pueden tener zonas de forma alargada. Una forma de controlar que las zonas formadas sean compactas es restringiendo la distancia máxima entre cada par de estaciones que pertenecen a una misma zona. Sin embargo, computacionalmente es exigente dado el número de comparaciones que se deben hacer, por lo que desde un enfoque de solución exacto podría no ser tratable cuando el número de estaciones a asignar es grande, dificultad que no se tendría en un enfoque de solución aproximado. En nuestro caso, esta problemática es mitigada mediante el parámetro de conexión que implícitamente define un radio máximo de cobertura para las zonas de reposicionamiento.

El conjunto de restricciones (2) - (4) representan consideraciones comunes en problemas de agrupación: una estación debe quedar asignada a una zona (2), las estaciones solo se pueden asignar a zonas habilitadas siempre y cuando exista conexión entre la estación y la estación centroide de la zona (3), y se constituyen tantas zonas de reposicionamiento como se predetermine (4).

El conjunto de restricciones en (5) y (6) controlan el porcentaje máximo de desbalance permitido en cada zona, relacionando la diferencia entre requerimientos de puntos de anclajes y bicicletas frente a los requerimientos totales. En la Figura 3-1 se puede observar el papel que cumple este conjunto de restricciones dentro del modelo. Al no considerarse estas restricciones es posible que se configuren zonas donde los requerimientos netos de las estaciones sea bicicletas (izquierda); mientras que, al considerarse estas restricciones, se controla la relación entre los requerimientos de bicicletas y puntos de anclajes de las estaciones, en un valor proporcional entre 0 y lo indicado por el parámetro de balance.

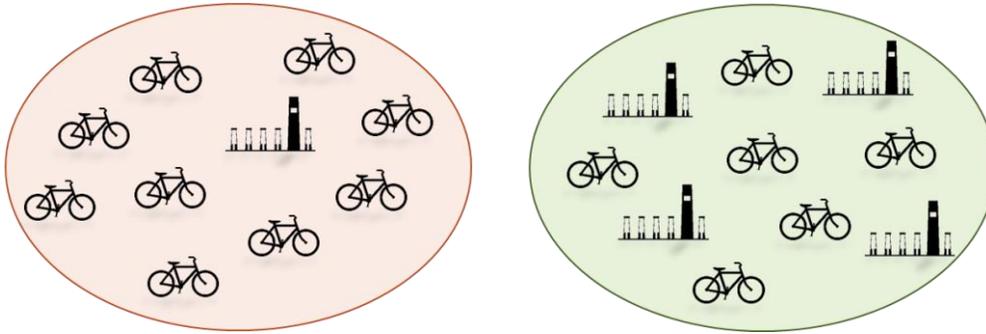


Figura 3-1: Función de restricciones de requerimientos.

El conjunto de restricciones (7) y (8) controlan que el número de estaciones, por tipo de prioridad, asignadas a cada zona esté en un intervalo (parámetro de prioridad) frente a un valor teórico. Este valor teórico es calculado como la parte entera entre el número total de estaciones de cada prioridad y el número de zonas a conformar. Para tener claridad sobre el papel de estas restricciones se ejemplificará a través de la situación descrita en la Figura 3-2. Inicialmente, lo que se pretende con esta restricción es evitar configurar zonas, como se observa en el círculo rojo, donde hay estaciones con un solo tipo de prioridad. Suponiendo que hay un sistema con 100 estaciones, 3 tipos de prioridad (gris, roja y verde) y se busca configurar 5 zonas, se toma como referencia las estaciones de prioridad verde. Teóricamente, cada una de las zonas a configurar debería quedar con 10 estaciones de prioridad verde, sin embargo, se permite estar por encima o por debajo de este valor teórico de acuerdo con lo permitido por el parámetro de prioridad. Así, una zona puede quedar con “10 – prioridad” o “10 + prioridad” estaciones de prioridad verde.

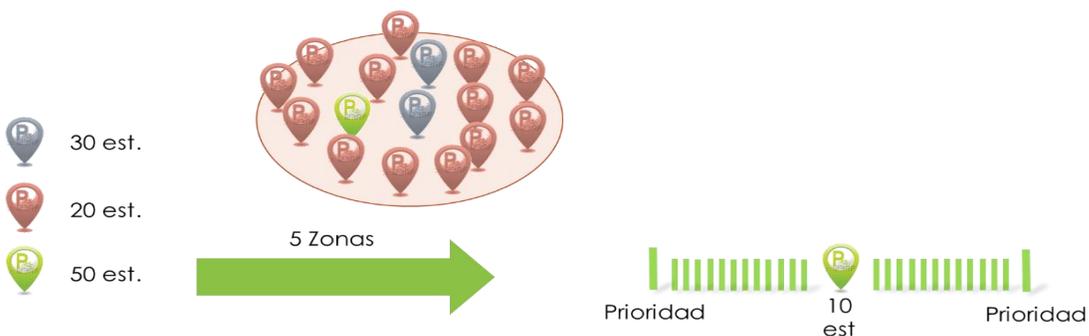


Figura 3-2: Función restricciones de prioridad

Como está planteado el conjunto de restricciones (7) y (8), se tiene un parámetro de prioridad global, es decir, indistinto sea el tipo de prioridad el número de estaciones

permitidas por encima o por debajo del valor teórico en cada zona es el mismo. Esto puede provocar en que para instancias particulares el conjunto de restricciones sea muy estricto o, por el contrario, sea muy laxo. Por lo tanto, puede pensarse en un parámetro variable de acuerdo con el tipo de prioridad y en términos porcentuales, ya que el propuesto es entero. Se señalan mas no se abordan estos aspectos a mejorar del modelo, dado que la intención es proponer un modelo genérico. Por último, se encuentran las restricciones de dominio (9) y (10).

A partir del modelo planteado anteriormente, se busca estudiar tres hipótesis que contribuyen a dimensionar el impacto que tiene en la operación involucrar un soporte cuantitativo para la configuración de zonas de reposicionamiento. Dos de las hipótesis están fundamentadas en una estrategia de reposicionamiento a partir de estaciones, mientras la otra está fundamentada en un reposicionamiento a partir de puntos de demanda.

Hipótesis 1: ¿Existe efecto al incluir aspectos como los requerimientos y la prioridad del reposicionamiento de las estaciones en la configurar zonas de reposicionamiento? ¿En qué niveles deberían fijarse de tal forma que las zonas queden equilibradas?

Hipótesis 2: ¿Es posible configurar zonas de reposicionamiento robustas frente a los horarios picos de operación que se presentan en los SPB?

Hipótesis 3: Si se evalúa la factibilidad de enfocar la tarea de reposicionamiento por puntos de demanda en vez de estaciones, en todas o algunas áreas del sistema, ¿Cómo afecta este enfoque a la configuración de zonas de reposicionamiento?

Para abordar la primera hipótesis, inicialmente se elige el intervalo horario con mayor nivel transaccional que sirve como instancia de prueba. Posteriormente, se fijan diferentes niveles para ambos conjuntos de restricciones (requerimientos y prioridad) para ver su impacto en la función objetivo, así como en la configuración de las zonas. Por último, se proponen niveles en los cuales se fijan los conjuntos de restricciones donde se haga un balance entre la configuración de las zonas de reposicionamiento y el impacto a la función objetivo.

En la segunda hipótesis, teniendo como valores para los conjuntos de restricciones de interés aquellos derivados de la primera hipótesis, se estudia si en los diferentes picos horarios de operación las zonas de reposicionamiento configuradas son similares. Para ello, se propone observar los elementos en común de las zonas en diferentes horarios, así como también determinar para cada estación los vecinos con los que cuenta en cada uno de los diferentes horarios.

Para la última hipótesis de estudio, inicialmente se debe determinar cuáles estaciones son factibles de ser tomadas como puntos de demanda de acuerdo con algunos criterios preestablecidos. Una vez conformados los posibles puntos de demanda junto a las estaciones que no fue posible agrupar, se corre el modelo con los niveles de las restricciones propuestos. Al final, se compara las configuraciones de zonas de reposicionamiento cuando se aborda a través de estaciones o cuando se realiza a través de puntos de demanda.

4.Resultados y análisis

En la sección anterior se propone un modelo matemático y tres hipótesis con las cuales se busca dimensionar el impacto que tiene en la operación un soporte cuantitativo para determinar zonas de reposicionamiento en SPB. El desarrollo de esta sección inicia con una contextualización de la información utilizada para construir las instancias de prueba para posteriormente evaluar y analizar las tres hipótesis planteadas.

4.1 Diseño de las instancias de prueba

Se hace uso de información proveniente de ECOBICI de México D.F., información de libre acceso disponible en la página web del sistema. ECOBICI cuenta (a 2016) con 452 estaciones. Se usa datos provenientes de los tres meses donde la operación es mayor (septiembre-noviembre de 2016) correspondiente a 2.353.389 registros (viajes). El sistema opera los siete días de la semana entre las 05:00 h. y las 23:00 h. Para la construcción de instancias se excluyen fines de semana dado que la actividad del sistema es muy baja frente a la que se tiene entre semana. En la Figura 4-1 se resume los préstamos de bicicletas en el sistema por hora. Se observa que hay tendencias similares en el sistema independientemente del mes que se estudie. Se identifican dos horarios de máximo uso a las 08:00 h. y a las 18:00 h. Así mismo, la actividad del sistema baja a partir de las 19:00 h y entra en un periodo de mínima actividad que puede estar comprendido entre las 21:00 h y las 06:00 h.

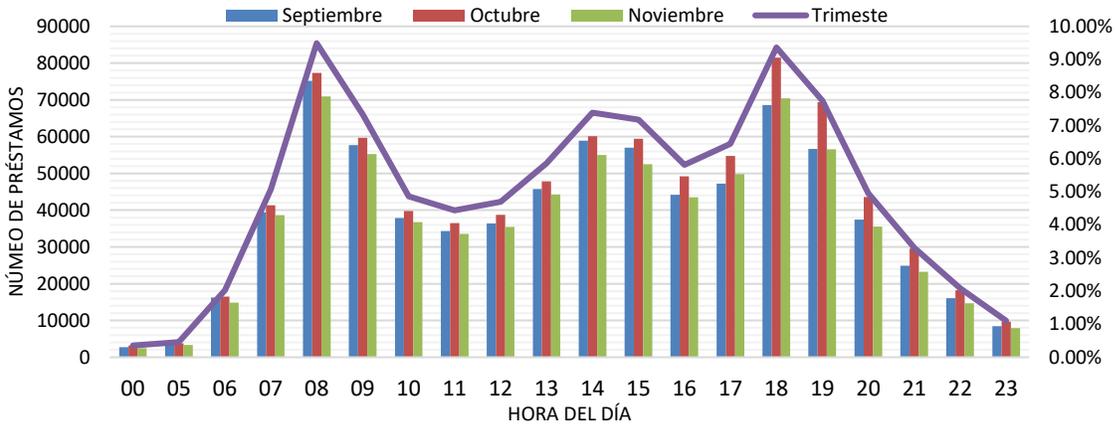


Figura 4-1: Número de préstamos por hora del día en el período estudiado.

Para la construcción de instancias, se sigue la metodología propuesta por [58] con el propósito de determinar horarios picos-valle, la priorización de estaciones y los requerimientos de cada estación.

Se divide el horario de operación en intervalos de 30 minutos, justificado en el hecho que el 95% de los viajes tienen una duración inferior 32 minutos, permitiendo que en un intervalo se alcance a capturar préstamos y devoluciones de bicicletas. En la Tabla 4-1 se resumen los periodos valle y pico, así como la longitud de cada uno de estos periodos.

Tabla 4-1: Clasificación de períodos Valle y Pico.

Horario	Hora Inicio	Hora Fin
Valle Madrugada	00:00:01	07:30:00
Pico Mañana	07:30:01	10:30:00
Valle Mañana	10:30:01	14:00:00
Pico Tarde	14:00:01	18:00:00
Pico Noche	18:00:01	21:00:00
Valle Noche	21:00:01	00:00:00

Se construyen tres instancias asociadas a los horarios picos determinados (Mañana, Tarde, Noche). Es de interés estudiar los horarios picos, ya que se busca que los operadores balanceen el sistema de la mejor manera en miras a prestar un mejor servicio

durante estos horarios de alto flujo transaccional. Para las hipótesis 1 y 3, se hace únicamente uso de una instancia asociada al pico de la tarde ya que en este horario se presenta el 26% de transacciones del sistema; mientras que para la hipótesis 2, donde se busca evaluar la robustez frente a las zonas configuradas en distintos picos horarios, se hace uso de las tres instancias construidas.

Para todas las corridas realizadas del modelo se fijó en 15 el número de zonas de reposicionamiento a configurar, ya que corresponde al número de zonas definidas actualmente por los operadores del sistema. Se tienen cuatro tipos de prioridad (Alto, medio-alto, medio-bajo, Bajo) de acuerdo a lo propuesto en [58]. La implementación computacional es realizada a través del software FICO® Xpress Optimization Suite en equipos con procesador Intel Core i5® y memoria RAM de 4 GB. Adicionalmente, se fijan dos criterios de parada: cuando se alcance un gap inferior al 5% o el tiempo de ejecución transcurrido haya sido de 6 horas.

4.2 Hipótesis 1: Efecto de incluir restricciones adicionales a las geográficas en la conformación de zonas de reposicionamiento

Basados en la instancia del pico de la tarde se diseña un experimento con dos factores, cada uno asociado con los conjuntos de restricciones referenciados en la formulación matemática. Un factor asociado a los requerimientos, donde se busca controlar la relación entre las necesidades de bicicletas y puntos de anclajes en cada zona conformada, fijando un porcentaje máximo de desbalance permitido. El otro factor está relacionado con la prioridad de las estaciones para el reposicionamiento, donde se pretende que las estaciones asignadas a cada zona queden equilibradas, en cuanto al tipo de prioridad, frente a un valor teórico. Es importante recordar que el valor teórico para cada tipo de prioridad es calculado como la parte entera entre el número de estaciones con una prioridad determinada y el número total de zonas a conformar.

Se definen seis niveles para cada uno de los factores, cuyos límites inferiores y superiores se definen basados en la factibilidad de la instancia y el punto a partir del cual el conjunto de restricciones se vuelve activa, respectivamente. Así, para el factor referente a los requerimientos se definen niveles de: 15%, 18%, 20%, 35% 70% y 100%; mientras para el

factor asociado a la prioridad de las estaciones se definen niveles de: 1, 3, 5, 8, 12 y 15. A modo de ejemplo, un escenario donde se fijen niveles de 18% y de 3, respectivamente, significa que en cada una de las zonas configuradas la diferencia entre los requerimientos de bicicletas y puntos de anclajes de las estaciones debe ser máximo del 18%; adicionalmente, en cada zona, el número de estaciones asignadas de acuerdo al tipo de prioridad puede diferir (en términos absolutos) en 3 frente al valor teórico.

Así, se tiene un total de 36 corridas experimentales y un escenario base, el cual consiste en correr el modelo matemático omitiendo los conjuntos de restricciones asociadas a los requerimientos y a las prioridades. De las 37 corridas realizadas en 2 de ellas (15% y 1; 15% y 3) no se pudo obtener solución entera de acuerdo con los criterios de parada definidos.

Inicialmente, se busca identificar el impacto en la función objetivo al involucrar ambos factores en la configuración de zonas de reposicionamiento. En la Figura 4-2 se observa el impacto en la función objetivo al involucrar los requerimientos (izquierda), prioridades (centro) y cuál de estos factores (requerimientos y prioridades) tiene mayor impacto en la función objetivo (derecha). Queda claro que involucrar ambos factores impacta negativamente el objetivo planteado, es decir, aumenta la distancia entre las estaciones elegidas como centros de zonas de reposicionamiento y sus correspondientes estaciones asignadas. Consecuentemente, entre más riguroso se es en fijar los niveles de los factores, la función objetivo crece considerablemente frente al escenario base (señalado como 0). Sin embargo, frente a cuál de los factores tiene mayor peso en el cambio de la función objetivo, el gráfico de efectos (derecha) permite observar que tiene mayor impacto el conjunto de restricciones asociadas con involucrar la prioridad para el reposicionamiento de las estaciones, específicamente se puede ver cómo en un valor de prioridad de 1 incrementa ampliamente la función objetivo. Es decir, a medida que se fijen valores más bajos para el conjunto de restricciones relacionadas con la prioridad se incrementa la suma de las distancias entre los centroides y las estaciones que le son asignadas, perdiendo así compacidad.

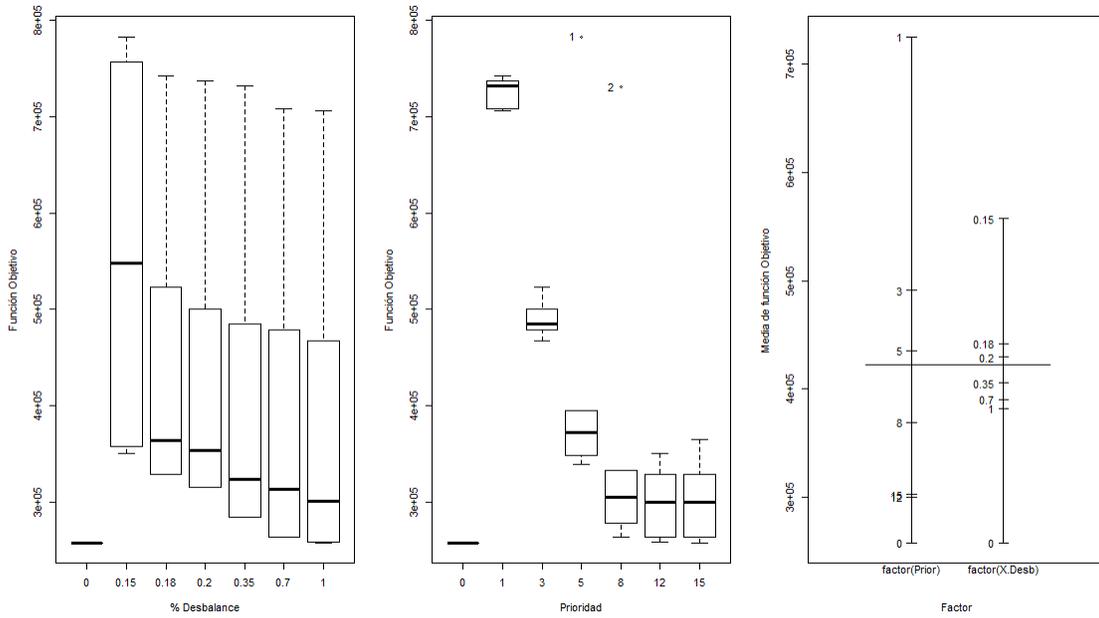


Figura 4-2: Cambio en la función objetivo frente a conjunto de restricciones. Requerimientos (izquierda), Prioridad (centro), Impacto en la función objetivo (derecha).

También es pertinente verificar si hay presencia de interacción entre los factores seleccionados. En la Figura 4-3, la presencia de líneas paralelas indica que no hay interacción. Es decir, independientemente del nivel elegido para el porcentaje de desbalance, cuando se fija un nivel de prioridad cada vez más estricto la función objetivo crece.

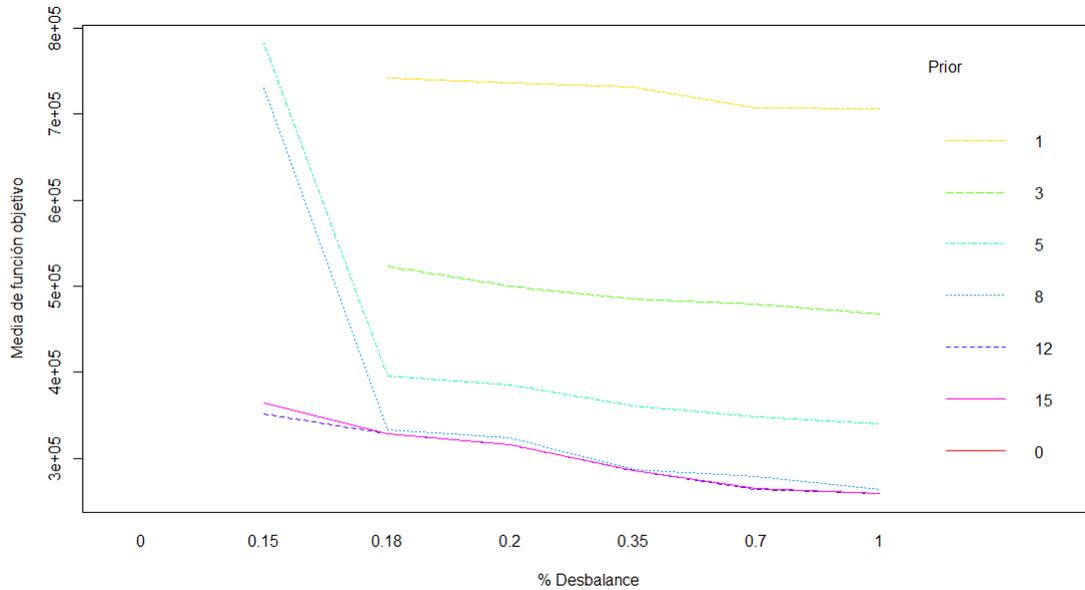


Figura 4-3: Gráfica de interacción entre los factores.

Por otra parte, se debe observar cómo estos dos factores contribuyen al principal propósito del soporte cuantitativo propuesto, es decir, configurar zonas de reposicionamiento equilibradas en donde se involucren criterios más allá del geográfico, específicamente los requerimientos de las estaciones y la prioridad para el reposicionamiento. Cuando se presta atención al escenario base se encuentran zonas de reposicionamiento dispersas, donde se presencian zonas con una diferencia en sus requerimientos del 4% o 6%, es decir, zonas equilibradas frente a las necesidades de las estaciones, mientras en otras zonas la diferencia asciende al 100% o 98%, revelando la problemática descrita por operadores donde se configuran zonas desequilibradas requieren bicicletas o puntos de anclajes netamente. En la Figura 4-4 se observa la desviación de los requerimientos entre las zonas conformadas frente al nivel fijado en el factor de requerimientos. Así, en el escenario base se tiene una desviación superior al 30% entre las zonas que corresponde a la situación descrita. Mientras tanto, fijar valores para este factor en 35% o menos, promueve que la desviación en los requerimientos entre las zonas conformadas sea inferior al 10%, es decir, se conforman zonas de reposicionamiento homogéneas frente a los requerimientos de sus estaciones. Adicionalmente, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre elegir un valor del 18% o 20% ya que su impacto en promover zonas equilibradas es similar.

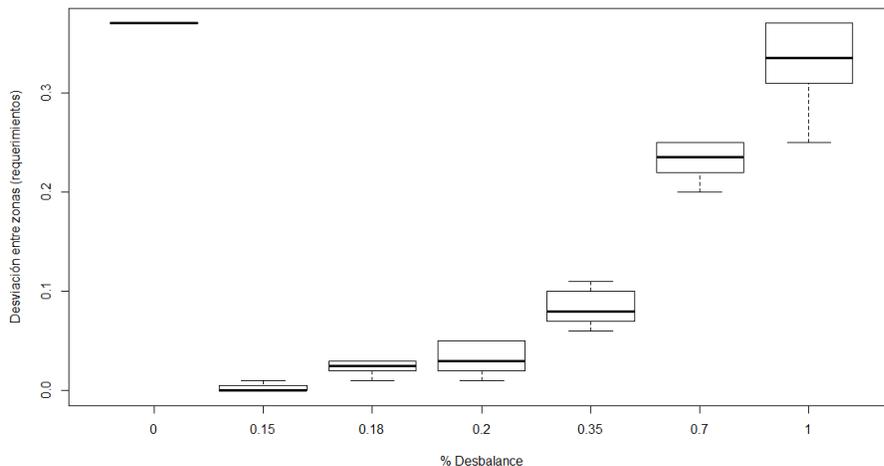


Figura 4-4: Cambio en la desviación del desbalance en los requerimientos

Situación similar a la descrita anteriormente se experimenta con el factor asociado a la prioridad para el reposicionamiento de las estaciones. En el escenario base, frente a la prioridad de reposicionamiento 1 (Alta) hay zonas que cuentan con 8 y hasta 13 estaciones

asignadas cuando teóricamente se espera que en cada una de las quince zonas conformadas se asignen 3 estaciones con dicha prioridad. En la Figura 4-5 puede observarse para cada prioridad (Alta a Baja, de izquierda a derecha) la desviación en número de estaciones asignadas en cada zona y su cambio al modificar los valores asociados a este factor. A partir de valores fijados en 8 (en algunos casos) y en 5 (en todos los casos) se mitiga la desviación en el número de estaciones asignadas por prioridad en cada una de las zonas, promoviendo así zonas equilibradas. Es otras palabras, al permitir que en cada zona se permita una diferencia de 5 estaciones (absoluta) frente al valor teórico se configuran zonas entre las cuales la desviación en el número de estaciones asignadas por prioridad es a lo sumo de 2.

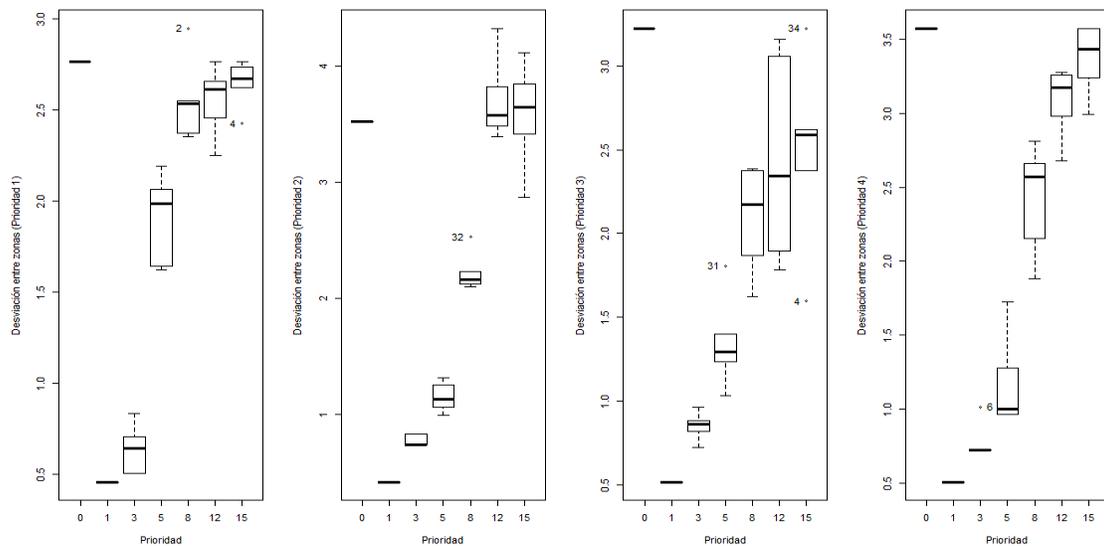


Figura 4-5: Cambio en la desviación del número de estaciones por prioridad

No obstante, es de recordar que el mayor impacto en la función objetivo es causado precisamente por el factor asociado a la prioridad. En aras de causar un efecto positivo en la conformación de zonas de reposicionamiento equilibradas en términos de prioridad para el reposicionamiento y al tiempo causar el menor impacto en la función objetivo, se sugiere fijar el nivel de prioridad en 8 estaciones. La Figura 4-6 ayuda a tomar esta decisión, ya que, al comparar la diferencia de medias entre los niveles del factor de prioridad, no hay diferencias estadísticamente significativas en la función objetivo cuando se toman los valores de 15, 12 u 8. Por lo tanto, en un valor de prioridad de 8, la afectación a la función no es estadísticamente significativa y al tiempo se disminuye la desviación del número de

estaciones por prioridad entre las zonas, teniendo mayor impacto en la prioridad 2 (medio-alta).

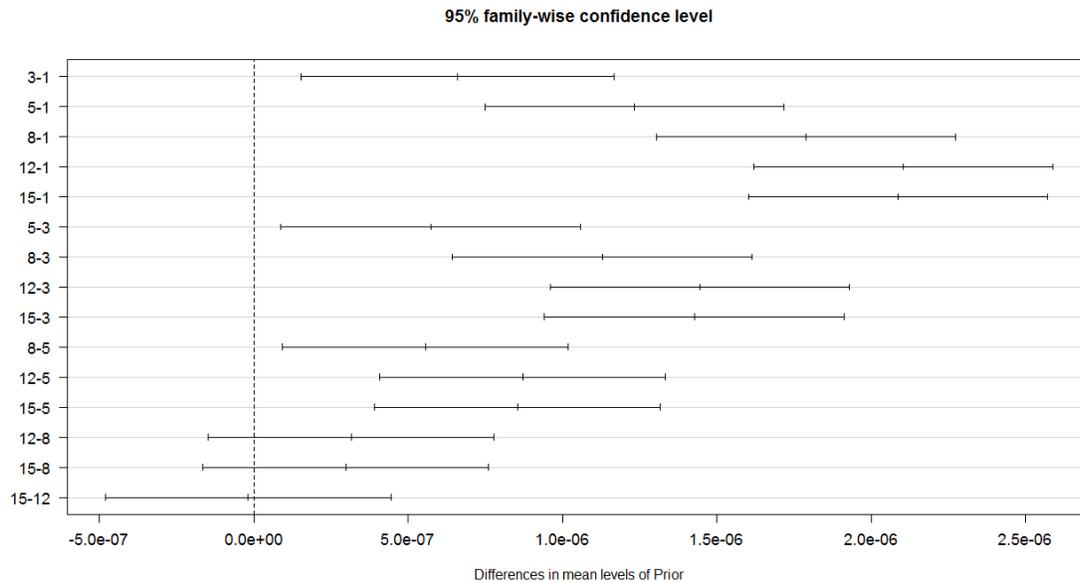


Figura 4-6: Comparación de medias entre los niveles del factor de prioridad

Adicional a los análisis realizados, es importante mostrar un componente gráfico que permita evidenciar el impacto geográfico generado al incluir estos dos conjuntos de restricciones en la decisión a tomar. En la Figura 4-7 se observan los casos extremos, es decir, el escenario base (izquierda) donde no se tiene en cuenta restricciones de requerimientos ni prioridades, y la corrida experimental más estricta que se pudo realizar de acuerdo con los criterios de parada (derecha). Es evidente que en el caso base, las zonas de reposicionamiento formadas son compactas y por tanto las distancias son cortas entre cada par de estaciones perteneciente a una misma zona. Por otro lado, en el caso en que se permite máximo una diferencia entre los requerimientos del 15% y de prioridad de 5 estaciones, las zonas de reposicionamiento configuradas son difusas y dispersas.

incluyan los conjuntos de restricciones planteadas teniendo la menor pérdida de compacidad de las zonas de reposicionamiento. Teniendo este costo de oportunidad presente junto a los análisis estadísticos realizados, en la Figura 4-8 se puede observar gráficamente la configuración de las zonas de reposicionamiento considerando una diferencia entre los requerimientos en cada una de las zonas máximo del 20% y diferentes valores (3, 5 y 8) en el número de estaciones asignadas por prioridad a cada zona de acuerdo a un valor teórico. Gráficamente se nota el impacto de las restricciones que involucran la prioridad para el reposicionamiento, ya que, para un valor de 8, se pueden observar zonas de reposicionamiento compactas; mientras con un valor de 3 se configuran zonas más difusas y con una forma más alargada lo que dificulta las posteriores labores de reposicionamiento que realicen los vehículos.

Por lo tanto, dada la información con que se cuenta, se recomienda fijar los valores de los conjuntos de restricciones que involucran los requerimientos y las prioridades en 20% y 8, respectivamente.

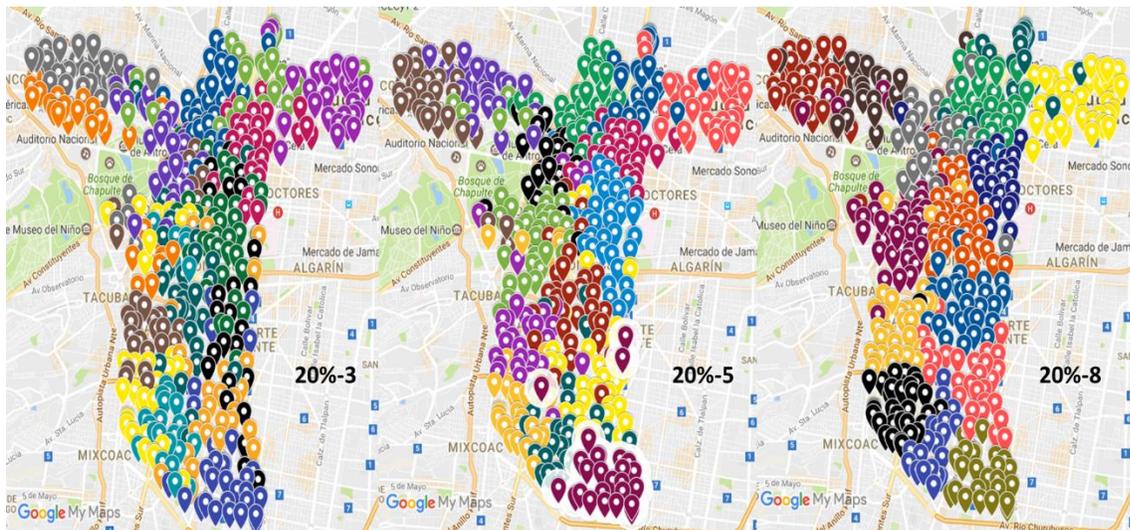


Figura 4-8: Configuración de zonas de reposicionamiento recomendada.

4.3 Hipótesis 2: Robustez de las zonas de reposicionamiento

A través del desarrollo de la hipótesis anterior, se recomiendan unos valores en los cuales fijar el conjunto de restricciones de requerimientos (20%) y de prioridad para el reposicionamiento (8), teniendo como base la instancia asociada al pico de la tarde. Para

hacer frente a la segunda hipótesis planteada, se busca observar las zonas de reposicionamiento configuradas para los picos de la mañana y el de la noche con los valores sugeridos anteriormente para luego realizar una comparación referente a la similitud de las zonas conformadas.

Es preciso aclarar que para evaluar la robustez en este contexto no se cuenta con un indicador de referencia que pueda utilizarse. Es decir, no se cuenta con un valor que pueda tomarse como benchmarking para determinar el grado de robustez de las zonas configuradas. Por lo tanto, el análisis está orientado hacia utilizar diferentes formas de evaluar las zonas conformadas en los diferentes horarios y establecer una referencia.

Específicamente, se utilizan dos formas para evaluar la robustez. La primera, es a través del número de estaciones en común que tienen las zonas configuradas en los diferentes picos horarios, es decir, se realizará una comparación entre las zonas de reposicionamiento conformadas. La segunda, sugiere una comparación estación por estación, donde se identifican las estaciones vecinas dentro de la zona de reposicionamiento para cada estación en los diferentes horarios.

La Tabla 4-2 resume la comparación entre las zonas de reposicionamiento conformadas. Se empieza comparando la configuración de zonas del pico de la tarde, posteriormente el pico de la mañana y, por último, el pico de la noche. Por cada una de estas zonas se compara la zona que presenta mayor similitud en cada uno de los otros horarios. Así, a modo de ejemplo, la zona de reposicionamiento 11 en el horario de la tarde (PT11) tiene 30 estaciones, la zona más similar en el horario de la mañana (PM11) contiene 26 de las 30 estaciones (87%); mientras que la zona más similar en el horario de la noche (PN6) contiene 18 de las 30 estaciones (60%). En resumen, teniendo en cuenta todas las zonas de reposicionamiento, se tiene en promedio una coincidencia del 61% entre las zonas, siendo la mínima del 34% y máxima del 91%.

Una debilidad de esta forma de comparación es que una zona en un horario determinado puede ser afín a más de una zona en otro horario. Por ejemplo, al comparar las zonas conformada en la tarde frente a las del horario de la mañana, se evidencia que dos zonas (PT8 y PT11) de la mañana presentan su mayor similitud con una misma zona conformada en la mañana (PM11). Es decir, esta zona de la mañana en mención corresponde a una

combinación lineal de dos o más zonas del horario de la tarde. Por lo tanto, podría presentarse el caso donde hay zonas que contienen un gran número de estaciones asignadas, que al compararse con otros horarios se pueden presentar elevados porcentajes de coincidencia. Consecuentemente, se pueden estar obteniendo coincidencias sobreestimadas, ya que, si bien gran cantidad de elementos coinciden, cuando se hace una simple comparación gráfica de la forma geométrica de las zonas posiblemente no coincidan.

Tabla 4-2: Comparación zonas de reposicionamiento en diferentes horarios.

Zona comparada	Estaciones	comparación 1	Estaciones en Común		comparación 2	Estaciones en Común	
			Núm	%		Núm	%
PT1	32	PM2	17	53%	PN5	13	41%
PT2	38	PM4	13	34%	PN4	17	45%
PT3	25	PM5	12	48%	PN3	10	40%
PT4	40	PM8	24	60%	PN8	25	63%
PT5	34	PM6	25	74%	PN9	23	68%
PT6	33	PM7	21	64%	PN2	24	73%
PT7	31	PM12	23	74%	PN7	15	48%
PT8	24	PM11	11	46%	PN10	16	67%
PT9	25	PM3	20	80%	PN5	15	60%
PT10	31	PM10	24	77%	PN11	21	68%
PT11	30	PM11	26	87%	PN6	18	60%
PT12	31	PM9	23	74%	PN13	17	55%
PT13	34	PM14	27	79%	PN14	20	59%
PT14	20	PM15	10	50%	PN13	7	35%
PT15	24	PM13	13	54%	PN15	20	83%
PM1	30	PT8	11	37%	PN10	13	43%
PM2	22	PT1	17	77%	PN3	11	50%
PM3	41	PT9	20	49%	PN5	26	63%
PM4	33	PT2	13	39%	PN4	19	58%
PM5	29	PT3	12	41%	PN3	11	38%
PM6	40	PT5	25	63%	PN9	27	68%

PM7	23	PT6	21	91%	PN2	18	78%
PM8	30	PT4	24	80%	PN8	22	73%
PM9	33	PT12	23	70%	PN13	20	61%
PM10	29	PT10	24	83%	PN11	19	66%
PM11	39	PT11	26	67%	PN6	22	56%
PM12	29	PT7	23	79%	PN7	15	52%
PM13	18	PT15	13	72%	PN15	13	72%
PM14	33	PT13	27	82%	PN14	20	61%
PM15	23	PT15	11	48%	PN15	12	52%
PN1	31	PT2	15	48%	PM1	11	35%
PN2	27	PT6	24	89%	PM7	18	67%
PN3	27	PT1	12	44%	PM5	11	41%
PN4	32	PT2	17	53%	PM4	19	59%
PN5	39	PT9	15	38%	PM3	26	67%
PN6	28	PT11	18	64%	PM11	22	79%
PN7	27	PT7	15	56%	PM12	15	56%
PN8	34	PT4	25	74%	PM8	22	65%
PN9	33	PT5	23	70%	PM6	27	82%
PN10	34	PT8	16	47%	PM11	15	44%
PN11	24	PT10	21	88%	PM10	19	79%
PN12	31	PT7	12	39%	PM12	14	45%
PN13	29	PT12	17	59%	PM9	20	69%
PN14	27	PT13	20	74%	PM14	20	74%
PN15	29	PT15	20	69%	PM13	13	45%

Por ello, es pertinente observar gráficamente las zonas formadas en cada uno de los picos horarios. En la Figura 4-9 se muestran las zonas conformadas en cada uno de los periodos elegidos, resaltando aquellas donde se presenta mayor coincidencia. De allí, se evidencia que, en todos los casos de comparación hay similitud entre las zonas conformadas. Es una similitud que puede estar cercana a lo calculado numéricamente (61%), por lo tanto, se sugiere que una sobreestimación de coincidencias, que se menciona anteriormente, no se evidencia en el caso estudiado.



Figura 4-9: Comparación zonas de reposicionamiento en diferentes picos horarios.

La otra forma sugerida para medir la robustez de las zonas conformadas es a nivel de estación. La idea es identificar para cada estación los vecinos de zona de reposicionamiento en los diferentes horarios y verificar las coincidencias. La Figura 4-10 resume los cálculos realizados para hallar los vecinos que permanecen en los diferentes horarios para cada estación. A modo de ejemplo, se desea determinar cuáles de los vecinos de la estación 9 que se encuentran en el pico de la mañana (PM) perduran en el pico de la noche (PN). Así, 5 de los vecinos que inicialmente comparten zona de

reposicionamiento en el horario de la mañana permanecen en el horario de la noche, es decir, únicamente el 12.5% de estaciones vecinas. En promedio, se halla que el 44.7% de los vecinos de las estaciones permanecen en los diferentes horarios comparados, siendo el mínimo 0% y el máximo 91%, teniendo mayor coincidencia al comparar el horario de la mañana con el de la tarde (49.2%).

Sin embargo, así como se señala la posibilidad de una sobreestimación de coincidencias en el caso anterior, es pertinente señalar que a través de este método de analizar los vecinos de cada estación se puede presentar una subestimación. Es frecuente (12%) observar que el número de vecinos por estación que permanecen entre los diferentes horarios es de 0, 1 o 2, lo cual afecta el promedio de coincidencias, que brinda un indicio de la robustez de las zonas conformadas. La subestimación, puede generarse en un caso donde para una estación en particular, únicamente esta estación queda asignada en un horario distinto, pero sus vecinos iniciales quedan juntos, revelando así que la coincidencia es del 0%. Un ejemplo es la estación 14 cuando se compara entre los picos de la mañana y los picos de la tarde, donde los vecinos en común son 0, pero al hacer un análisis detallado, efectivamente los vecinos que tiene esta estación en la mañana permanecen asignados a una misma zona en la tarde, mientras la estación en mención es situada en otra.

Estación				PMvsPT	Estación				PMvsPN	Estación				PTvsPN
PM	PT	Común	%Común		PM	PN	Común	%Común		PT	PN	Común	%Común	
1	1	7	24.1%	49.2%	1	1	10	34.5%	42.9%	1	1	14	37.8%	42.1%
2	2	7	24.1%		2	2	10	34.5%		2	2	14	37.8%	
3	3	16	76.2%		3	3	1	4.8%		3	3	2	6.5%	
4	4	9	22.5%		4	4	5	12.5%		4	4	14	37.8%	
5	5	16	76.2%		5	5	1	4.8%		5	5	2	6.5%	
6	6	5	12.5%		6	6	5	12.5%		6	6	2	6.5%	
7	7	12	37.5%		7	7	1	3.1%		7	7	14	37.8%	
8	8	16	76.2%		8	8	10	47.6%		8	8	11	35.5%	
9	9	1	2.5%		9	9	5	12.5%		9	9	4	16.7%	
10	10	11	39.3%		10	10	10	35.7%		10	10	9	37.5%	
11	11	16	76.2%		11	11	1	4.8%		11	11	2	6.5%	
12	12	16	76.2%		12	12	10	47.6%		12	12	11	35.5%	
13	13	4	10.3%		13	13	5	12.8%		13	13	16	43.2%	
14	14	0	0.0%		14	14	1	2.6%		14	14	1	2.6%	

Figura 4-10: Comparación vecinos por estación en diferentes picos horarios.

A modo de conclusión sobre la capacidad del modelo de ofrecer zonas de reposicionamiento robustas, se debe mencionar que a través de dos métodos distintos se hallan unas cotas que sitúan la conformación de zonas similares entre un 44.7% y un 61%

(los valores medios hallados con los dos métodos utilizados). Adicionalmente, gráficamente se observa que las zonas conformadas entre los diferentes picos horarios tienen similitud.

4.4 Hipótesis 3: La posibilidad de reposicionar por puntos de demanda

Desarrollar esta hipótesis busca revelar si hay diferencias al proponer zonas de reposicionamiento basadas en estaciones o por puntos de demanda, o si, por el contrario, es indiferente a la unidad básica que se está tomando. Inicialmente se debe establecer la factibilidad del sistema para un reposicionamiento por puntos de demanda. Es de aclarar que un sistema que sea factible de reposicionar por puntos de demanda no significa que todo el sistema se pueda abordar de esta manera, es decir, habrá áreas del sistema que se prestan para hacerlo por puntos de demanda mientras en otras áreas no será posible. Posteriormente, se establecen los criterios para la conformación de puntos de demanda para darle paso a la configuración de zonas de reposicionamiento y, por último, realizar una comparación entre las zonas sugeridas cuando se realiza a través de estaciones o a través de puntos de demanda. Esta última hipótesis es realizada con la instancia correspondiente al pico de la tarde con los valores sugeridos en la primera hipótesis.

Para definir si el reposicionamiento en un SPB puede ser factible de abordarse a través de puntos de demanda, debe considerarse la densidad de la red de estaciones del sistema. Según el ITDP, la red de un SPB se considera densa cuando el número de estaciones por kilómetro cuadrado es superior a 10 [56]. El sistema ECOBICI cuenta con 452 estaciones en un polígono de operación de 35 Km², es decir, tiene una densidad de 12.9 estaciones/km², siendo así factible considerar un reposicionamiento por puntos de demanda.

Recordar que se considera un punto de demanda como un conjunto de estaciones que tienen ciertos criterios en común, por lo que pueden ser agrupadas y abordadas como un solo elemento para su tratamiento, en este caso para la conformación de zonas de reposicionamiento. Para identificar las potenciales estaciones que pueden ser abordadas como puntos de demanda se tienen en cuenta tres criterios:

- La distancia entre cada par de estaciones debe ser inferior a 300 m.
- No debe existir ninguna barrera física entre cada par de estaciones, es decir, todas las estaciones de un mismo punto deben ser accesibles entre sí.
- Las estaciones que conforman un punto de demanda deben tener requerimientos similares (bicicletas/puntos de anclajes) o ser estaciones que no requieren ser balanceadas.

La Figura 4-11 resume las potenciales estaciones que pueden constituir puntos de demanda. Aproximadamente el 75% de las 452 estaciones de ECOBICI cumplen las condiciones para formar puntos de demanda. Se ubican geográficamente las estaciones y se indican cifras de acuerdo a las necesidades de las estaciones.



Figura 4-11: Estaciones que pueden ser abordadas como puntos de demanda.

Las 337 estaciones resultantes que pueden ser abordadas como puntos de demanda son agrupadas en 100 puntos. En la Figura 4-12 se observan geográficamente los puntos de demanda conformados discriminados por el tipo de necesidad o requerimiento del punto conformado. De acuerdo con uno de los criterios establecidos, se pueden tener puntos de demanda de bicicletas o de puntos de anclaje. Adicionalmente, en cualquiera de los dos casos se pueden incluir estaciones que no tengan requerimientos, es decir, estaciones que se encuentran balanceadas. En promedio, los puntos de demanda están formados por 3.37 estaciones, siendo los más pequeños de 2 y los más grandes de 6.

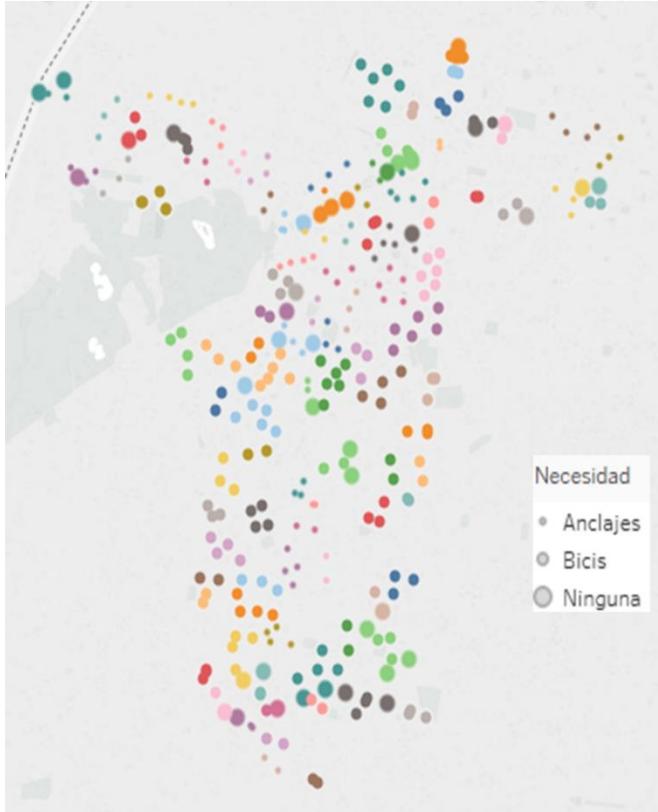


Figura 4-12: Puntos de demanda configurados por tipo de necesidad.

Una vez se tienen los 100 puntos de demanda (337 estaciones) junto a las 115 estaciones que no cumplían las condiciones para ser consideradas para formar puntos de demanda, se corre el modelo para configurar zonas de reposicionamiento en el SPB propuesto. En la Figura 4-13 se observan las quince zonas de reposicionamiento configuradas

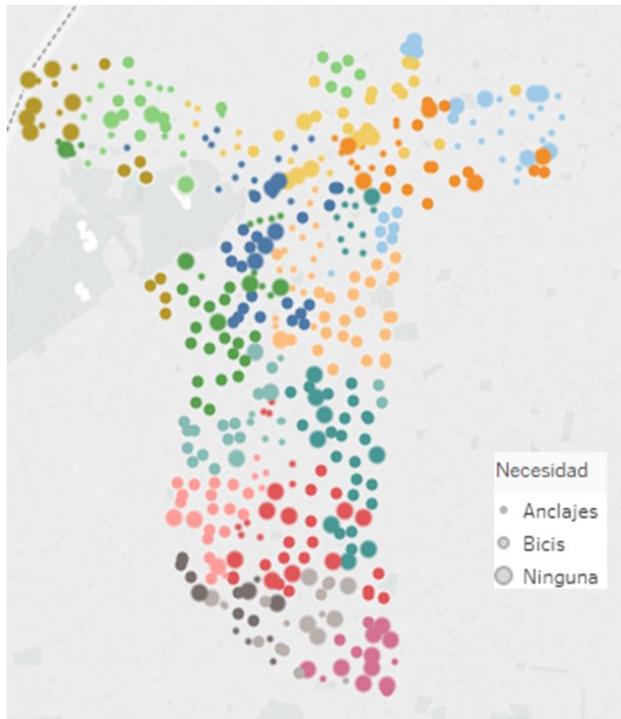


Figura 4-13: Configuración zonas de reposicionamiento a través de puntos de demanda.

Para determinar si hay diferencias entre abordar el balanceo de SPB a través de estaciones o de puntos de demanda, en cuanto a la configuración de las zonas de reposicionamiento, se realiza una comparación entre las zonas determinadas en la hipótesis 1 y la hipótesis 3. La Tabla 4-3 muestra las coincidencias entre las zonas de reposicionamiento al abordarlo por las dos estrategias propuestas. En promedio, se tiene una coincidencia entre ambas estrategias del 52%, siendo las zonas que presentaron mayor coincidencia en un 74% y la de menor coincidencia en un 35%. Adicionalmente, la Figura 4-14 permite realizar la comparación geográfica de las zonas configuradas (los colores son referenciales únicamente).

Tabla 4-3: Comparación zonas de reposicionamiento por estación y por puntos de demanda.

Cluster Estaciones	Cluster Est	Cluster Pto Dda	Común	
			Est	%
PT1	32	PT_Pda1	14	44%
PT2	38	PT_Pda2	22	58%
PT3	25	PT_Pda6	10	40%
PT4	40	PT_Pda5	23	58%
PT5	34	PT_Pda4	25	74%
PT6	33	PT_Pda6	20	61%
PT7	31	PT_Pda9	15	48%
PT8	24	PT_Pda7	16	67%
PT9	25	PT_Pda4	9	36%
PT10	31	PT_Pda8	19	61%
PT11	30	PT_Pda10	16	53%
PT12	31	PT_Pda11	14	45%
PT13	34	PT_Pda12	12	35%
PT14	20	PT_Pda11	7	35%
PT15	24	PT_Pda15	15	63%

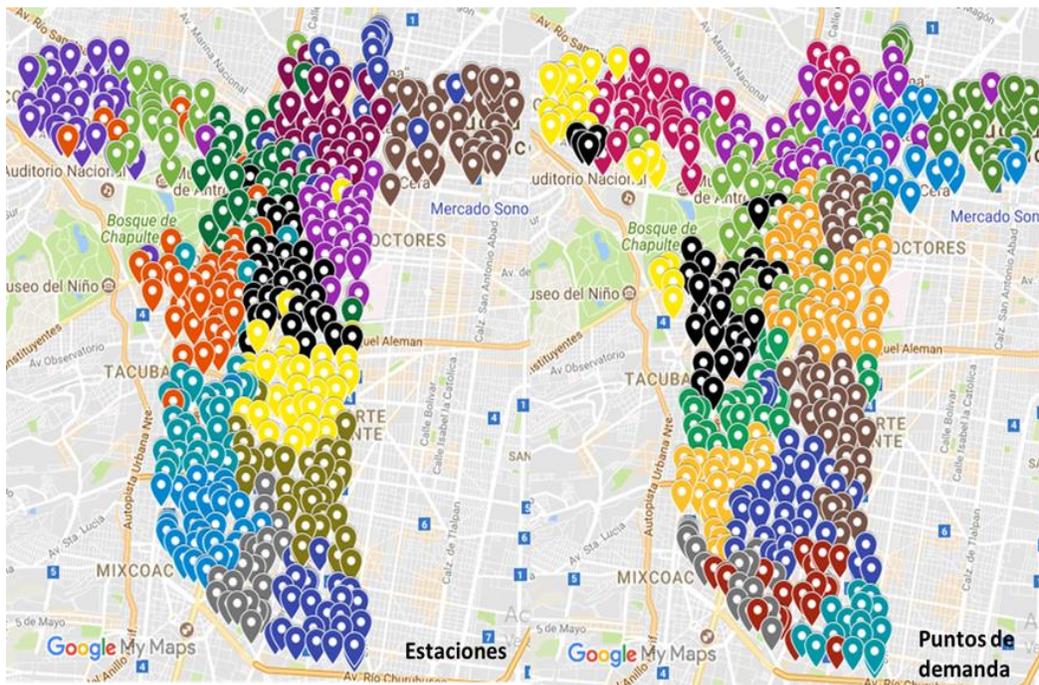


Figura 4-14: Zonas de reposicionamiento por estación y por puntos de demanda.

De acuerdo con los hallazgos, se concluye que hay diferencias en cuanto a la configuración de zonas de reposicionamiento en SPB cuando es abordada a través de estaciones o de

puntos de demanda. Si bien no se cuenta con un valor de referencia, es fácil inferir que, al correr el modelo con la misma instancia y parámetros, variando únicamente la forma de abordar la unidad básica de interés (estación o punto de demanda), y obtener una coincidencia de aproximadamente la mitad (52%), es baja, justificando así la conclusión sugerida.

5. Conclusiones y trabajo futuro

De la revisión del Estado del Arte en el reposicionamiento de bicicletas se revela la necesidad de explorar decisiones a un nivel más agregado como involucrar niveles de servicio, configurar zonas de reposicionamiento, asignación de recursos, entre otros. El reposicionamiento de bicicletas no es únicamente diseñar rutas que deben seguir los vehículos, que es donde se ha enfocado la mayor parte de la investigación académica. Esta necesidad tiene soporte por parte de los operadores de SPB que la viven a diario y expresan lo voluble e incluso impráctico de planear rutas en ciertos horarios dado el contexto dinámico de estos sistemas.

Adicional al reposicionamiento realizado por personal del sistema a través de vehículos, la investigación académica ha empezado a incursionar en el reposicionamiento colaborativo, en el cual se involucra a los usuarios a través del ofrecimiento de incentivos. Es un campo en el que existe amplio margen de puntos de intervención que pueden aportar al estado del arte. A modo de ejemplo, contribuciones que agregarían valor al reposicionamiento colaborativo pueden estar relacionadas con la medición del impacto que tendría adoptar una política para incentivar a los usuarios a realizar tareas de reposicionamiento de bicicletas o la factibilidad y el tipo de incentivo a ofrecer en SPB que sean de acceso gratuito. De las experiencias recogidas de los operadores, se observa que previo a planear o implementar programas de incentivos se debe dar prioridad a medir el impacto financiero, operativo y ambiental que tendría involucrar a los usuarios en tareas de reposicionamiento. Considerar las experiencias de operadores de SPB en América Latina frente a la gestión de la demanda y el balanceo del sistema es un elemento diferenciador del trabajo realizado puesto que no muchos autores han abordado sus investigaciones basados en información proveniente de fuentes primarias. Se pudo establecer un panorama sobre cómo se planea la determinación del número de bicicletas/ puntos de anclaje a mantener en las estaciones, las estrategias utilizadas para balancear el sistema y cómo medir el desempeño de la tarea

de reposicionamiento realizada por el personal de apoyo. En las entrevistas también se pudo establecer los principales desafíos en la operación que sirven como guía para futuras investigaciones. Así mismo, existen puntos a intervenir en las estrategias seguidas para el balanceo, como es el caso de los pulmones o corrales donde la acumulación de bicicletas en las estaciones lleva a una invasión del espacio público y puede a futuro generar una problemática.

A partir de la información acumulada del Estado del Arte y de las entrevistas con los operadores se propuso un modelo matemático de programación binaria para la configuración de zonas de reposicionamiento y brindar un soporte cuantitativo a la toma de decisiones. El modelo propuesto considera aspectos geográficos, requerimientos y prioridad para el reposicionamiento de las estaciones para proponer una configuración. Dado que el modelo se soluciona de forma exacta, la primera línea de acción futura puede estar dirigida a un enfoque de solución aproximado. Abordar el problema desde una perspectiva heurística puede ofrecer ventajas para la función objetivo y el conjunto de restricciones relacionadas con la prioridad. Por un lado, se puede redireccionar la función objetivo hacia minimizar la distancia entre cada par de estaciones pertenecientes a la misma zona, lo que permitiría promover zonas más compactas. Por el otro lado, una estrategia heurística podría permitir fijar y abordar valores específicos para cada tipo de prioridad y no un valor global como está actualmente. También se podría redefinir el conjunto de restricciones relacionadas a la prioridad, permitiendo una comparación pareada entre estaciones por tipo de prioridad y entre las diferentes zonas que se configuren.

Luego, a partir del modelo matemático se desarrollaron tres hipótesis con información pública proveniente del sistema ECOBICI cuyo propósito fue evaluar si la información generada es de utilidad en un ambiente real de aplicación. De manera general, se pudo comprobar que el modelo propuesto sirve como soporte cuantitativo a la configuración de zonas de reposicionamiento. Se halló la pertinencia de incluir los requerimientos y la prioridad para el reposicionamiento, y hallando valores idóneos para estos, se pueden determinar zonas equilibradas. Adicionalmente, el modelo puede ser utilizado para comparar la similitud entre las zonas conformadas en diferentes horarios de operación y así determinar la robustez o si es pertinente tener zonas de reposicionamiento dinámicas.

Por último, se comprueba que hay diferencia entre realizar la configuración de zonas a partir de estaciones o de puntos de demanda. Hacerlo a través de puntos de demanda tiene ventajas desde el punto de vista operativo, ya que estos funcionan como amortiguadores mientras se realiza el reposicionamiento. Es decir, si el usuario no puede acceder a una estación (prestar o dejar bicicleta) puede desplazarse a una estación cercana que puede suplir la necesidad. Sin embargo, la decisión de realizar la operación de reposicionamiento a través de puntos de demanda está sujeta a que se cuente con un SPB denso y que se cumplan ciertas condiciones entre las estaciones como proximidad geográfica, accesibilidad y requerimientos similares.

En detalle sobre las hipótesis abordadas para evaluar el modelo propuesto, inicialmente se propuso estudiar la relevancia o no de incluir aspectos más allá de los geográficos para configurar las zonas. Allí, se revela que hay un costo de oportunidad al incluir los requerimientos y las prioridades de las estaciones, pues se forman zonas cuyas áreas son más amplias, pero a la vez más equilibradas en cuanto a evitar que haya configuraciones donde todas las estaciones sean generadoras/receptoras de viajes. Por ello es pertinente realizar un análisis sobre los niveles en los cuales fijar los valores de los conjuntos de restricciones propuestas, ya que, se pueden configurar zonas difusas y dispersas. A partir de observar geográficamente las zonas propuestas, se evidenció una limitación del modelo relacionado con la compacidad de las zonas cuando se fijan niveles más apretados en las restricciones, por lo que a futuro sería pertinente garantizar que cada par de estaciones de una misma zona sean adyacentes sin barreras (estaciones de otras zonas) de por medio. Posteriormente, se evaluó si el modelo era capaz de proveer zonas robustas frente a los diferentes horarios picos que normalmente poseen los SPB. Debido a la carencia de un indicador o metodología estandarizada que permita medir con certeza el grado de robustez de las zonas configuradas se proponen dos métodos diferentes para medirla. Se resaltan debilidades de los métodos propuestos en los cuales se pueden obtener casos de subestimación o sobreestimación. Por tal motivo, para el caso específico de las instancias creadas basadas en información de ECOBICI se establece un rango de robustez entre el 44.7% y el 67%, el cual sirve como suministro al operador del sistema para decidir si se configuran zonas de reposicionamiento estáticas, es decir, fijas en todo el periodo de operación; o si es pertinente configurar zonas de reposicionamiento dinámicas que varíen durante el horario de operación del sistema.

Finalmente, es necesario establecer una metodología para abordar la evaluación y el desempeño de las estrategias seguidas por los SPB para realizar el balanceo. En el trabajo realizado, únicamente se plantean las estrategias sin ahondar en el desempeño de cada una de ellas. Por lo tanto, ofrecer un mayor soporte cuantitativo para tomar la decisión de realizar un balanceo por estaciones o por puntos de demanda es beneficioso para los operadores de SPB, ya que tiene repercusión en la configuración de las zonas de reposicionamiento y en la planeación de las rutas.

Bibliografía

- [1] M. Dell'Amico, E. Hadjicostantinou, M. Iori, and S. Novellani, "The bike sharing rebalancing problem: Mathematical formulations and benchmark instances," *Omega*, vol. 45, pp. 7–19, Jun. 2014.
- [2] P. Midgley, "BICYCLE-SHARING SCHEMES : ENHANCING SUSTAINABLE MOBILITY," 2011.
- [3] OBIS, "Optimising Bike Sharing in European Cities," 2011.
- [4] J. Y. J. Chow and H. R. Sayarshad, "Symbiotic network design strategies in the presence of coexisting transportation networks," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 62, pp. 13–34, 2014.
- [5] J. P. Romero, J. L. Moura, A. Ibeas, and B. Alonso, "A simulation tool for bicycle sharing systems in multimodal networks.," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 38, no. 6, pp. 646–663, 2015.
- [6] J.-R. Lin and T.-H. Yang, "Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 47, no. 2, pp. 284–294, Mar. 2011.
- [7] Y. C. Lin, J. R., Yang, T. H., & Chang, "A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 65, no. 1, pp. 77–86, May 2013.
- [8] R. Nair and E. Miller-Hooks, "Equilibrium network design of shared-vehicle systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 235, no. 1, pp. 47–61, May 2014.
- [9] J. Garcia-Gutierrez, J. Romero-Torres, and J. Gaytan-Iniestra, "Dimensioning of a Bike Sharing System (BSS): A Study Case in Nezahualcoyotl, Mexico," in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014, vol. 162, pp. 253–262.
- [10] J. Schuijbroek, R. Hampshire, and W.-J. van Hoesve, "Inventory Rebalancing and Vehicle Routing in Bike Sharing Systems," 2013.

- [11] C. Fricker and N. Gast, "Incentives and redistribution in homogeneous bike-sharing systems with stations of finite capacity," *EURO J. Transp. Logist.*, pp. 1–31, 2015.
- [12] J. Shu, M. C. Chou, Q. Liu, C. Teo, and I. Wang, "Models for Effective Deployment and Redistribution of Bicycles Within Public Bicycle-Sharing Systems," *Oper. Res.*, vol. 61, no. 6, pp. 1346–1359, 2013.
- [13] T. Raviv and O. Kolka, "Optimal inventory management of a bike-sharing station," *IIE Trans.*, vol. 45, pp. 1077–1093, 2013.
- [14] R. Nair and E. Miller-Hooks, "Fleet management for vehicle sharing operations," *Transportation Science*, vol. 45, pp. 524–540, 2011.
- [15] P. Vogel, T. Greiser, and D. C. Mattfeld, "Understanding Bike-Sharing Systems using Data Mining: Exploring Activity Patterns," in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2011, vol. 20, pp. 514–523.
- [16] A. Faghih-Imani, N. Eluru, A. M. El-Geneidy, M. Rabbat, and U. Haq, "How land-use and urban form impact bicycle flows: evidence from the bicycle-sharing system (BIXI) in Montreal," *J. Transp. Geogr.*, Feb. 2014.
- [17] O. O'Brien, J. Cheshire, and M. Batty, "Mining bicycle sharing data for generating insights into sustainable transport systems," *J. Transp. Geogr.*, vol. 34, pp. 262–273, Jan. 2014.
- [18] D. Singhvi *et al.*, "Predicting Bike Usage for New York City 's Bike Sharing System," in *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015.
- [19] H. H. Hochmair, "Assessment of Latent Bicycle Demand in Street Networks Modeling approach," in *Proceedings of the Geoinformatics Forum Salzburg. Heidelberg: Wichmann.*, 2009.
- [20] I. Frade and A. Ribeiro, "Bicycle Sharing Systems Demand," in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014, vol. 111, pp. 518–527.
- [21] A. Faghih-Imani and N. Eluru, "Analysing bicycle-sharing system user destination choice preferences: Chicago's Divvy system," *J. Transp. Geogr.*, vol. 44, pp. 53–64, 2015.
- [22] S. Turner, A. Hottenstein, and G. Shunk, "BICYCLE AND PEDESTRIAN TRAVEL DEMAND FORECASTING: LITERATURE REVIEW," 1997.
- [23] R. Alvarez-Valdes *et al.*, "Optimizing the level of service quality of a bike-sharing system," *Omega*, pp. 1–13, 2015.
- [24] M. Ricci, "Bike sharing: A review of evidence on impacts and processes of

- implementation and operation,” *Res. Transp. Bus. Manag.*, Apr. 2015.
- [25] R. Montezuma, *Sistemas Públicos de Bicicletas para América Latina. Guía práctica para implementación*. 2015.
- [26] G. Laporte, F. Meunier, and R. Wolfler Calvo, “Shared mobility systems,” *4or*, vol. 13, pp. 341–360, 2015.
- [27] T. Raviv, M. Tzur, and I. a. Forma, “Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches,” *EURO J. Transp. Logist.*, vol. 2, no. 3, pp. 187–229, Jan. 2013.
- [28] C. Contardo, C. Morency, and L. Rousseau, “Balancing a Dynamic Public Bike-Sharing System,” 2012.
- [29] G. Erdoğan, G. Laporte, and R. Wolfler Calvo, “The static bicycle relocation problem with demand intervals,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 238, no. 2, pp. 451–457, Oct. 2014.
- [30] C. Kloimullner, P. Papazek, B. Hu, and G. R. Raidl, “Balancing Bicycle Sharing Systems : An Approach for the Dynamic Case,” in *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimisation 14th European Conference, EvoCOP 2014, Granada, Spain, April 23-25, 2014, Revised Selected Papers*, 2014, pp. 73–84.
- [31] M. Rainer-Harbach, P. Papazek, G. R. Raidl, B. Hu, and C. Kloimüller, “PILOT, GRASP, and VNS approaches for the static balancing of bicycle sharing systems,” *J. Glob. Optim.*, vol. 63, no. 3, pp. 597–629, 2015.
- [32] L. Di Gaspero, A. Rendl, and T. Urli, “A hybrid ACO+ CP for balancing bicycle sharing systems,” in *Hybrid Metaheuristics 8th International Workshop, HM 2013, Ischia, Italy, May 23-25, 2013*, 2013, pp. 198–212.
- [33] L. Di Gaspero, A. Rendl, and T. Urli, “Constraint-based approaches for balancing bike sharing systems,” in *In Principles and Practice of Constraint Programming*, vol. 8124 LNCS, 2013, pp. 758–773.
- [34] C. Chira, J. Sedano, J. R. Villar, M. Cámara, and E. Corchado, “Urban bicycles renting systems: Modelling and optimization using nature-inspired search methods,” *Neurocomputing*, vol. 135, pp. 98–106, Jul. 2014.
- [35] I. A. Forma, T. Raviv, and M. Tzur, “A 3-step math heuristic for the static repositioning problem in bike-sharing systems,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 71, pp. 230–247, 2015.
- [36] J. Brinkmann, M. W. Ulmer, and D. C. Mattfeld, “Inventory Routing for Bike Sharing

- Systems,” 2015.
- [37] A. A. Kadri, I. Kacem, and K. Labadi, “A branch-and-bound algorithm for solving the static rebalancing problem in bicycle-sharing systems,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 95, pp. 41–52, 2016.
- [38] M. Benchimol *et al.*, “Balancing the stations of a self service ‘bike hire’ system,” *RAIRO - Oper. Res.*, vol. 45, pp. 37–61, 2011.
- [39] D. Chemla, F. Meunier, and R. Wolfler Calvo, “Bike sharing systems: Solving the static rebalancing problem,” *Discret. Optim.*, vol. 10, no. 2, pp. 120–146, May 2013.
- [40] P. Angeloudis, J. Hu, and M. G. H. Bell, “A strategic repositioning algorithm for bicycle-sharing schemes,” *Transp. A Transp. Sci.*, vol. 10, no. 8, pp. 759–774, 2014.
- [41] R. Linfati, J. Willmer Escobar, and B. Cuevas, “An algorithm based on granular tabu search for the problem of balancing public bikes by using multiple vehicles,” *Dyna*, vol. 81, pp. 284–294, 2014.
- [42] G. Erdoğan, M. Battarra, and R. Wolfler Calvo, “An exact algorithm for the static rebalancing problem arising in bicycle sharing systems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 245, no. 3, pp. 667–679, Sep. 2015.
- [43] M. Dell’Amico, M. Iori, S. Novellani, and T. Stütze, “A destroy and repair algorithm for the Bike sharing Rebalancing Problem,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 71, pp. 149–162, 2016.
- [44] S. C. Ho and W. Y. Szeto, “Solving a static repositioning problem in bike-sharing systems using iterated tabu search,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 69, pp. 180–198, Sep. 2014.
- [45] L. Caggiani and M. Ottomanelli, “A Dynamic Simulation based Model for Optimal Fleet Repositioning in Bike-sharing Systems,” in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013, vol. 87, pp. 203–210.
- [46] L. Caggiani and M. Ottomanelli, “A Modular Soft Computing based Method for Vehicles Repositioning in Bike-sharing Systems,” in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, vol. 54, pp. 675–684.
- [47] P. Papazek, G. R. Raidl, M. Rainer-Harbach, and B. Hu, “A PILOT/VND/GRASP hybrid for the static balancing of public bicycle sharing systems,” in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8111, no. PART 1, 2013, pp. 372–379.
- [48] M. T. Adham and P. J. Bentley, “Evaluating Clustering Methods within the Artificial

- Ecosystem Algorithm and their Application to Bike Redistribution in London,” *Biosystems*, 2016.
- [49] I. L. Wang and C. W. Wang, “Analyzing bike repositioning strategies based on simulations for public bike sharing systems: Simulating bike repositioning strategies for bike sharing systems,” in *2nd IIAI International Conference on Advanced Applied Informatics, IIAI-AAI 2013*, 2013, pp. 306–311.
- [50] Z. Haider, A. Nikolaev, J. E. Kang, and C. Kwon, “Inventory Rebalancing through Pricing in Public Bike Sharing Systems,” 2014.
- [51] D. Chemla, T. Pradeau, and R. W. Calvo, “Self-service bike sharing systems : simulation , repositioning , pricing,” 2013.
- [52] J. Pfrommer, J. Warrington, G. Schildbach, and M. Morari, “Dynamic vehicle redistribution and online price incentives in shared mobility systems,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 99, pp. 1–12, 2014.
- [53] A. Singla, M. Santoni, M. Meenen, and A. Krause, “Incentivizing Users for Balancing Bike Sharing Systems,” in *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015.
- [54] R. Nair, E. Miller-Hooks, R. C. Hampshire, and A. Bušić, “Large-Scale Vehicle Sharing Systems: Analysis of Vélib’.,” *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 7, no. 1, pp. 85–106, 2013.
- [55] C. Médard, D. Chardon, G. Caruso, and I. Thomas, “Bike-share rebalancing strategies , patterns , and purpose,” *JTRG*, vol. 55, pp. 22–39, 2016.
- [56] ITDP, “The Bike-Sharing Planning Guide,” 2013.
- [57] Y. A. Koskosidis and W. B. Powell, “Clustering algorithms for consolidation of customer orders into vehicle shipments,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 26, no. 5, pp. 365–379, 1992.
- [58] B. A. Gaviria Garzón, M. L. Gómez Martínez, and M. Rodríguez Cespedes, “Caracterización de la demanda del sistema de bicicletas públicas ‘EnCicla’ que opera en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá,” Universidad de Antioquia, 2016.