



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE BICICLETAS
COMPARTIDAS Y ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE ESTACIONES:
CASO APLICADO A LA CIUDAD DE SANTIAGO**

Por
Katia Denisse González Sanhueza

Profesora Guía:
Lorena Pradenas Rojas

Tesis presentada a la
**DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**



Para optar al grado de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Julio 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Katia Denisse González Sanhueza

© 2023 Katia Denisse González Sanhueza

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

RESUMEN

Los problemas de movilidad en las ciudades han sido tema de interés para investigadores y autoridades que buscan disminuir la congestión vehicular. El crecimiento urbano y en particular la expansión del parque automotriz son las principales causas de este problema y por lo tanto, se busca potenciar medios de transporte como las bicicletas o scooters. Esto debido a que la infraestructura vial no permite satisfacer la alta demanda de lugares de tránsito a pesar de las obras destinadas a incrementar la capacidad de la red de transporte.

Un BSS (Bicycle-Sharing Schemes) se define como un sistema que ofrece bicicletas urbanas de alquiler a corto plazo disponibles en una red de ubicaciones desatendidas en espacios públicos. Los usuarios llegan a las estaciones de alquiler, utilizan la bicicleta durante un tiempo y luego la devuelven a la estación de su elección. Este sistema se ha implementado en grandes urbes del mundo y ha destacado por la ventaja de disminuir la contaminación y reducir el tránsito vehicular.

En esta investigación se busca formular y resolver un modelo de programación matemática que permita optimizar la configuración para un sistema de bicicletas compartidas en la comuna de Santiago y permita tomar decisiones de ubicación de estaciones a partir de un proceso de demanda determinístico.

Los resultados muestran que ha a través del modelo implementado es posible localizar de forma eficiente las estaciones de recogida de bicicleta en puntos donde la demanda de viajes es mayor y permite lograr altos niveles de cobertura de la demanda. Las características de la comuna de Santiago como su extensa red de ciclovías y acceso a todos los servicios valida que sea posible extender los servicios ya implementados en la región Metropolitana y aumentar la disponibilidad de bicicletas para que las personas puedan acceder fácilmente al servicio.

Se destaca que las variables a considerar para la implementación de estos servicios son muchas y deben estudiarse exhaustivamente en base a datos disponibles de tránsito, espacio disponible y caracterización de la población, entre otras.

ABSTRACT

Mobility problems in cities have been a topic of interest for researchers and authorities seeking to reduce traffic congestion. Urban growth and, in particular, the expansion of the automotive fleet are the main causes of this problem and therefore, it seeks to promote means of transport such as bicycles or scooters. This is due to the fact that the road infrastructure does not allow satisfying the high demand for transit places despite the works aimed at increasing the capacity of the transport network.

A BSS (Bicycle-Sharing Schemes) is defined as a system that makes short-term rental city bikes available at a network of underserved locations in public spaces. Users arrive at the rental stations, use the bike for a while and then return it to the station of their choice. This system has been implemented in large cities around the world and has stood out for the advantage of reducing pollution and reducing vehicular traffic.

This research seeks to formulate and solve a mathematical programming model that allows optimizing the configuration for a shared bicycle system in the commune of Santiago and allows station location decisions to be made based on a deterministic demand process.

The results show that through the implemented model it is possible to efficiently locate the bicycle collection stations in points where the demand for trips is greater and allows to achieve high levels of demand coverage. The characteristics of the commune of Santiago, such as its extensive network of bicycle paths and access to all services, validate that it is possible to extend the services already implemented in the Metropolitan region and increase the availability of bicycles so that people can easily access the service.

It should be noted that the variables that must be considered for the implementation of these services are many and must be exhaustively studied based on available traffic data, available space and characterization of the population, among others.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Pregunta de Investigación	11
1.2 Objetivo General.....	11
1.3 Objetivos Específicos	12
1.4 Estructura del Informe.....	12
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	16
3.1 Sistema de bicicletas compartidas.....	16
3.2 Decisiones involucradas en el BSS.....	17
3.3 Metodologías de solución	19
3.4 Brecha del conocimiento.....	23
4. METODOLOGÍA	24
4.1 Demanda de transporte en el Gran Santiago	24
4.2 Formulación de Modelo Matemático	27
4.3 Análisis de capacidad de estaciones	30
4.4 Instancias de prueba	31
5. RESULTADOS.....	33
5.1 Demanda de viajes en la comuna de Santiago	33
5.2 Solución del modelo matemático para distintas instancias.....	39
5.3 Análisis de capacidad de estaciones	44
6. DISCUSIÓN	46
7. CONCLUSIONES	49
8. BIBLIOGRAFÍA	50

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1 Resumen de estudios relacionados a BSS.	22
Tabla 5-1 Potenciales estaciones de bicicletas.....	36
Tabla 5-2 Resultados para p=10.....	39
Tabla 5-3 Resultados para p=20.....	39
Tabla 5-4 Resultados para p=15.....	39
Tabla 5-5 Resultados para p=25.....	39

LISTADO DE FIGURAS

Figura 4-1 Zonificación EOD 2012.....	26
Figura 5-1 Mapa de calor de los viajes en Comuna de Santiago.....	35
Figura 5-2 Ubicación de estaciones potenciales.....	38
Figura 5-3 Ubicación 10 estaciones para instancia SG03.....	41
Figura 5-4 Ubicación 20 estaciones para instancia SG03.....	42
Figura 5-5 Ubicación 25 estaciones para instancia SG03.....	43
Figura 6-1 Ubicación de estaciones actual sistema Bike Santiago.....	48

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento urbano y en particular la expansión del parque automotriz han generado una alta congestión vehicular en distintas ciudades del mundo. Esto debido a que la infraestructura vial no permite satisfacer la alta demanda de lugares de tránsito a pesar de las obras destinadas a incrementar la capacidad de la red de transporte. Es por esto que entre las políticas implementadas por los gobiernos se encuentra incentivar el uso de transporte público y potenciar la movilidad con medios de transportes que operen de forma colaborativa, como bicicletas, trenes, microbuses, entre otros.

Una alternativa al transporte público tradicional y que permitiría reducir el problema de la congestión vehicular, la conforman los sistemas de transporte compartidos, que consisten en el alquiler de vehículos, bicicletas o scooters por un corto plazo, disponibles en distintos espacios públicos para facilitar la movilidad de las personas. Aunque la proliferación de la movilidad compartida se ha producido principalmente en la última década, este no es un fenómeno nuevo. El primer programa de uso compartido de automóviles se estableció en 1948 en Zúrich, Suiza, y el primer programa de uso compartido de bicicletas comenzó en 1965 en Ámsterdam, Países Bajos.

Los servicios de movilidad compartida tienen beneficios y han demostrado tener impactos significativos en el comportamiento de los viajes, el medio ambiente y el desarrollo de las ciudades. Estos sistemas permiten una mayor accesibilidad al transporte público en lugares alejados y por tanto, ayudarían a potenciar su uso. Además, permitirían reducir el uso de vehículos personales. Sin embargo, estos modos de transporte destacan principalmente por el impacto positivo que tienen en el medioambiente, reduciendo notablemente las emisiones de CO². Por esto, la planificación de los sistemas de movilidad compartida ha sido de gran interés en los últimos años, incentivando los estudios aplicados a distintas ciudades y áreas urbanas.

Los resultados del Índice Global de Congestión Vehicular INRIX 2018 muestran que la congestión en América Latina es un problema urbano en aumento. Hay tres ciudades latinoamericanas entre las 5 más congestionadas del mundo que corresponden a Bogotá, Ciudad de México y Sao Paulo. Además, el índice de tráfico de TomTom de 2022 indica que Lima y Bogotá son las ciudades de Sudamérica con peor tráfico en hora punta. Santiago de Chile se encuentra en el puesto N°11 (TomTom, 2022). Por esto, se considera importante analizar la factibilidad de implementar un sistema de bicicletas compartidas, ya que la ciudad ha sido reconocida por su extensa red de ciclovías y también por los problemas de congestión en tramos horarios específicos.

El objetivo del estudio es desarrollar una planificación estratégica para la decisión de ubicación de estaciones de bicicletas y asignación de capacidad que permita identificar la configuración para un sistema de bicicletas públicas (SBP) en la comuna de Santiago.

1.1 Pregunta de Investigación

En base a la investigación realizada y las distintas variantes de los problemas de localización de sistemas de bicicletas compartidas, se plantea la siguiente hipótesis:

“La configuración de un sistema de bicicletas compartidas puede modelarse matemáticamente para determinar la localización de estaciones, basándose en niveles de servicio estimados a partir de la demanda de transporte en puntos de gran congestión en una capital de América del Sur tipo Santiago”.

1.2 Objetivo General

Formular y resolver un modelo de programación matemática que permita optimizar la configuración para un sistema de bicicletas compartidas en la comuna de Santiago y tomar decisiones de ubicación de estaciones y asignación de capacidad a partir de un proceso de demanda determinístico.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar revisión de la literatura para identificar brechas de investigación.
- Determinar la situación de la demanda de viajes para la ciudad de Santiago para estimar niveles de servicio.
- Plantear un modelo de optimización para resolver la localización de estaciones de bicicletas en puntos de alta demanda.
- Definir parámetros y variables del modelo en base a información disponible.
- Generar instancias de prueba para resolver el modelo.
- Determinar método y software de solución al modelo.
- Analizar los resultados y entregar conclusiones.

1.4 Estructura del Informe

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera: El Capítulo 2 presenta una descripción del problema de congestión vehicular en Santiago. En el Capítulo 3 se presenta la revisión del marco teórico para los problemas de bicicletas compartidas, destacando las variantes estudiadas por la literatura y los métodos de solución. En el Capítulo 4 se presenta la metodología para alcanzar los objetivos del estudio y el modelo de programación matemática. En el Capítulo 5 se presentan los principales resultados obtenidos y en el Capítulo 6, una discusión respecto a los resultados. Finalmente, el Capítulo 7 presenta las conclusiones de esta investigación y propuestas de futuros estudios.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento urbano, la aglomeración del comercio y el incremento en la demanda espacial y temporal por usos de lugares de tránsito, provocan problemas de congestión en las grandes ciudades. Así la planificación de obras viales es necesaria para promover el uso inteligente de vías y medios de transporte (Beyer Barrientos 2022).

Un estudio de la compañía holandesa TomTom que monitoreó el tráfico de las principales metrópolis del mundo, colocó a la capital de Chile en el lugar 17 de las 390 ciudades más congestionadas del planeta (Emol, 2017). Entre los especialistas se reconoce este fenómeno como “movilidad cotidiana” concepto, que se refiere a los desplazamientos diarios que la población realiza habitualmente.

Una investigación del Ministerio de Transportes (a través de la UOCT) y Waze, analizó el tráfico de los principales ejes troncales de Santiago y reveló que las zonas centro y nororiente de la capital concentran el 84% de la congestión crítica en horario punta (7,30-10:00 hrs. y 17.00- 21.00 hrs.). El estudio de la UOCT y

Waze se realizó con un software que recopila los tiempos de viaje en las 239 principales rutas de Santiago. La investigación reveló que la zona nororiente (48,7%) y centro (30,8%) presentan la mayor congestión en la hora punta de la mañana. Le siguen en orden decreciente: suroriente (10,3%), norte (7,7%) y norponiente (2,6%) (La Tercera, 2018).

En tanto, el mismo informe revela que los ejes de las avenidas Ossa, Vitacura y Pedro de Valdivia, además de Alameda, Manuel Rodríguez y Santa María, están entre los que concentran la menor velocidad de desplazamiento (bajo 14km/h) y saturación por encima del 85% en ese período (La Tercera, 2018).

En Chile, el primer sistema de bicicletas compartidas fue creado en 2013 en el sector oriente de Santiago. Bikesantiago llegó a 14 comunas y en dos años y medio logró alcanzar una estadística de uso de 2,5 millones de viajes (Bicicultura 2016). A pesar de la pandemia por Covid 19 y las cuarentenas en diferentes comunas los medios de transporte sustentables continuaron creciendo en el último año. Según cifras de Tembici (empresa operadora de Bikesantiago) los usuarios activos durante 2021 aumentaron en un 75% en comparación con el 2020. Osea, la pandemia, muchos chilenos decidieron optar por medios de transportes alternativos dada la preocupación por los contagios en el transporte público (El Mostrador 2022). Así, la bicicleta tuvo un aumento significativo de su

uso durante el 2021, por lo que se proyectó que durante el 2022 se mantendrían estas cifras.

Dadas estas características es importante potenciar el diseño de bicicletas compartidas en la comuna de Santiago y que sea más accesible a las personas para aumentar el número de usuarios de forma considerable y pueda motivarse a cambiar el automóvil por la bicicleta. Los estudios de nuevas metodologías de planificación son esenciales para contribuir a analizar más variables que contribuyan en la optimización de éstos sistemas.

3 REVISIÓN DE LA LITERATURA

3.1 Sistema de bicicletas compartidas

Un BSS (Bicycle-Sharing Schemes) se define como un sistema que ofrece bicicletas urbanas de alquiler a corto plazo disponibles en una red de ubicaciones desatendidas en espacios públicos. Los usuarios llegan a las estaciones de alquiler, utilizan la bicicleta durante un tiempo y luego la devuelven a la estación de su elección. Desde su aparición hace unos 60 años, los sistemas de bicicletas compartidas han experimentado evoluciones tecnológicas y operativas y se han multiplicado rápidamente en todo el mundo.

Para viajes extensos, los usuarios pueden unir segmentos en bicicleta con el transporte público. En éste sentido, una bicicleta compartida sirve como una conexión de 'última milla' que mejora la accesibilidad de las alternativas de tránsito, ofrece una mayor elección de hora de salida y reduce los tiempos de viaje en comparación con el acceso a pie.

Con la expansión continua de los BSS, se generan mayores problemas de diseño, operación y gestión del servicio de bicicletas compartidas. Por lo tanto, en la última década, el número de publicaciones que abordan diferentes problemas de planificación de servicios de bicicletas compartidas (BSPP) ha

crecido drásticamente. Determinar cuántas bicicletas y estaciones, así como dónde ubicar las estaciones, son preguntas relevantes para el diseño.

3.2 Decisiones involucradas en el BSS

La mayoría de los modelos de diseño de sistemas de bicicletas compartidas incluyen decisiones de ubicación de estaciones de bicicletas porque su localización determina la cobertura de la demanda de un servicio de bicicletas compartidas, que es un atributo clave del diseño.

El proceso de planificación del BSS suele tener tres objetivos: obtener un trazado de red con cicloestaciones y ciclovías; asignar bicicletas compartidas adecuadas a las estaciones mediante el reposicionamiento de vehículos y los incentivos ofrecidos a los usuarios, y asegurar que el costo final de planificación no supere el presupuesto disponible (Shui y Szeto 2020).

Según Shui et al. (2020) la planificación de sistemas de bicicletas compartidas se puede clasificar de acuerdo al nivel de decisión. El nivel estratégico implica decisiones a largo plazo relacionadas con infraestructuras de servicios de bicicletas compartidas (incluidos ciclovías y estaciones de bicicletas) en una red existente o inexistente y, a veces, inventarios totales de bicicletas. El nivel táctico se enfoca en decisiones a mediano plazo que ayudan a mantener el desempeño de un servicio de bicicletas compartidas comúnmente mediante el

uso eficiente de los recursos existentes. El nivel operativo involucra decisiones a corto plazo decisiones tomadas de vez en cuando para responder a la operación diaria de un BSS en general (Shui y Szeto 2020).

Las decisiones estratégicas son las más abordadas por la literatura y se pueden subdividir en cuatro tipos de problemas de acuerdo con la infraestructura para bicicletas involucrada: problemas de diseño de ciclovías, problemas de diseño de estaciones para bicicletas, problemas de diseño de tamaño de flota y problemas de diseño de ciclovías y estaciones para bicicletas (Morency y Bourdeau 2021).

Algunos autores abordan las decisiones estratégicas en cuanto a capacidades y ubicación de las estaciones. Shu et al. (2010) abordan los problemas de las ubicaciones y las capacidades de las estaciones. Desarrollan un modelo para predecir el flujo de bicicletas y estimar el número de viajes soportados por el sistema dada una asignación inicial de bicicletas y el número de puntos de conexión necesarios para cada estación. Lin y Yang (2010) desarrollan un modelo para identificar el número de ciclo estaciones y sus ubicaciones, así como la red de ciclovías. Su modelo tiene en cuenta el interés tanto de los usuarios como de los proveedores de servicios. En su estudio ampliado, Lin, Yang, y Chang (2013) abordan un diseño estratégico para BSS y toman en cuenta las decisiones sobre las existencias de bicicletas en las estaciones. Martínez et al.

(2012) abordan los problemas de ubicación y capacidad. Proponen un programa entero mixto para determinar las ubicaciones y el número requerido de bicicletas.

Otros estudios analizan patrones temporales y geográficos de uso de bicicletas o características del sistema y patrones de uso como Nair et al. (2013), donde proponen un MIP para la configuración óptima de los sistemas de movilidad compartida mediante la determinación de las ubicaciones y capacidades de las estaciones, así como los inventarios de vehículos.

3.3 Metodologías de solución

Son numerosos los modelos matemáticos adoptados por los estudios para resolver el problema de BSS. Además, se ha empleado el sistema de información geográfica (SIG) para obtener un diseño de red de cicloestaciones (p. ej., García-Palomares et al., 2012, Wang et al., 2016) que permite identificar las posibles ubicaciones candidatas para una estación de bicicletas, que posteriormente se pueden utilizar para la selección de ubicaciones. En comparación con el uso de solo modelos matemáticos, la inclusión de SIG implica una mayor carga de recopilación y procesamiento de datos y una mayor complejidad del modelo de diseño.

Abdelmoumene, Kacem, y Labadi (2016) buscaron minimizar el objetivo ponderado consistente en la suma de los tiempos de espera de las estaciones

en estado de desequilibrio hasta la llegada del vehículo. Propusieron un enfoque branch-and-bound (B&B) para resolver el problema.

Cintrano, Chicano, y Alba (2020) proponen como problema encontrar las posiciones óptimas de las estaciones de bicicletas públicas para que los ciudadanos tengan que caminar lo menos posible para acceder a ellas. Para hacer esto, modela el problema como el problema de la p -mediana. Los autores utilizan un algoritmo genético, búsqueda local iterada, optimización de enjambre de partículas, recocido simulado y búsqueda de vecindad variable para encontrar las mejores ubicaciones para las estaciones de bicicletas y estudiar sus ventajas comparativas. GA fue el algoritmo que mejores resultados presentó al resolver el problema (Cintrano, Chicano, y Alba 2020).

Schuijbroek, Hampshire, y Van Hove (2017) propusieron un enfoque basado en límites de inventario objetivo en cada estación de bicicletas que representan los requisitos de nivel de servicio. Modelaron la demanda estocástica al ver el inventario en cada estación como un sistema de colas no estacionario con capacidad finita y derivaron los requisitos de nivel de servicio usando la distribución transitoria de la disponibilidad de bicicletas y muelles. La metodología usada para resolver el modelo consiste en una heurística de agrupamiento que procede agrupando estaciones de bicicletas de manera que cada grupo sea

autosuficiente, es decir, los límites del inventario objetivo pueden satisfacerse realizando únicamente recogidas y entregas dentro del grupo.

También hay autores que involucran decisiones de carácter ecológico. Shui y Szeto (2018) presentan un problema dinámico de reposicionamiento de bicicletas ecológicas (DGBRP) que minimiza simultáneamente la demanda total insatisfecha del sistema de bicicletas compartidas y el CO₂. El problema determina la ruta y el número de bicicletas cargadas y descargadas en cada nodo visitado durante un horizonte operativo de varios períodos durante el cual la demanda de ciclismo en cada nodo varía. El estudio tiene un enfoque de horizonte rodante para dividir el problema propuesto en un conjunto de etapas, en las que se resuelve un subproblema de reposicionamiento de bicicletas estáticas en cada etapa. Un algoritmo mejorado de colonia artificial de abejas (EABC) y una heurística de truncamiento de ruta se usan conjuntamente para optimizar el diseño de la ruta en cada etapa, y la heurística de carga y descarga se usa para abordar el subproblema de carga y descarga a lo largo de la ruta en una etapa determinada.

Tabla 3-1 Resumen de estudios relacionados a BSS.

Autores y título de la investigación	Método solución	Objetivo	Naturaleza de la demanda	Zona de aplicación
J. García Gutiérrez, J. Romero-Torres, J. Gaytan-Iniestra (2014) Dimensioning of a bike sharing system: A study case in Netzahualcoyotl, Mexico	Proceso de dimensionamiento y algoritmo de Hook-Jeeves	Determinar ubicación óptima de estaciones, n° ideal de bicicletas y el número de estacionamientos por estación.	Determinística	Netzahualcoyotl, Mexico
C. Rojas González (2021) Estudio general sobre el uso y relocalización de vehículos compartidos urbanos. Una aplicación para el caso de la ciudad de Concepción	Metaheurística, Método exacto Cplex	Minimizar la suma de distancias que existe entre cada nodo de demanda que se dirige hacia estas estaciones	Determinística	Concepción, Chile
D. Çelebi, A. Yörüsün, H. Işık (2018) Bicycle sharing system design with capacity allocations	Programación Dinámica	Determinar el número de estaciones que minimiza la demanda insatisfecha.	Estocástica	Campus de Ayazağa de la Universidad Técnica de Estambul
Lin J.-R. , Yang T.-H. (2011) Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints	Solo se propone el modelo	Minimizar costos del servicio para el usuario e inversionista	Estocástica	Sin zona aplicación, ejemplo ilustrativo
Lin J.-R., Yang T.-H., Chang Y.-C. (2013) A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution	Heurística Greedy-drop	Minimizar la suma de los costes de viaje determinando la ubicación de estaciones, ciclovías e inventario disponible.	Estocástica	Sin zona aplicación, ejemplo ilustrativo
R. Nair , E. Miller-Hooks (2016) Equilibrium design of bicycle sharing systems: the case of Washington D.C.	Metaheurística Algoritmo Genético	Maximizar utilización del sistema determinando ubicación de estaciones de bicicletas.	Determinística	Washington D.C., USA
J. Schuijbroek, R.C. Hampshire, W.J. Van Hoesve (2017) Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems	Heurística de agrupación en clústeres	Determinar los requisitos de nivel de servicio en cada estación de bicicletas y diseñar rutas de vehículos.	Estocástica	Hubway (Boston, MA)
C. Cintrano F. Chicano E. Alba (2020) Using metaheuristics for the location of bicycle stations	Metaheurísticas GA, ILS , PSO , SA y VNS .	Ubicar un conjunto de estaciones que minimice la distancia entre un conjunto de clientes y su estación.	Determinística	Málaga, España
K. González Sanhueza (2023) Propuesta de sistema de bicicletas compartidas con análisis de capacidad: caso aplicado a la ciudad de Santiago	Metaheurística	Determinar ubicaciones de estaciones que minimicen las distancias entre puntos de demanda.	Determinística	Santiago, Chile

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Brecha del conocimiento

Resulta interesante indagar acerca de la implementación y diseño de sistemas de bicicletas compartidas, y cómo hacerlo de la forma más eficiente en base a la caracterización de la población y los viajes realizados. A pesar de existir este tipo de sistemas en la ciudad de Santiago estos se concentran en el sector oriente de la capital, por lo que es de interés analizar un área más céntrica como la comuna de Santiago que presenta buenas características para este sistema dada su: geografía, características demográficas y la concentración de puntos de un alto arribo de personas. Además, son escasos los estudios que aplican la modelación matemática para analizar estos problemas, destacando la forma de implementarlo como un análisis cualitativo basado en encuestas y análisis de datos.

La gran mayoría de los estudios sobre BSS se centran en países del Norte Global con gobiernos urbanos bien financiados capaces de gestionar y supervisar asuntos de planificación urbana relacionados con los esquemas de bicicletas compartidas. Sin embargo, este no es el caso en ciudades como Santiago y otras de América Latina. Estos casos generalmente carecen de una institución gubernamental enfocada en planificación vial y las operaciones se dejan en manos de unidades autónomas a nivel de comuna, con diferencias significativas en sus capacidades financieras (Mora & Moran, 2022). Por esto, se considera que extender los estudios a Latinoamérica es un aporte en la investigación de los sistemas de bicicletas compartidas.

4 METODOLOGÍA

4.1 Demanda de transporte en el Gran Santiago

La demanda fue determinada a partir de los datos de la Encuesta de Origen y Destino (EOD) de 2012 para la región Metropolitana, realizada por SECTRA, organismo perteneciente al Ministerio de Transportes del Gobierno de Chile. La Encuesta hace un levantamiento de información sobre los viajes que realizan los ciudadanos por medio de entrevistas a hogares, con lo que se obtienen datos de una muestra representativa que luego, por medio de un algoritmo, se transforma en información representativa de los viajes de la población.

El proceso de georreferenciación de direcciones de la EOD 2012 se realiza principalmente a través de diferentes métodos de geocodificación utilizando el apoyo tecnológico de Stata y ArcGIS, este último se incorpora gradualmente con datos según planimetría de calles de SECTRA. El proceso se realiza utilizando una secuencia de criterios encuestados que permiten obtener las coordenadas geográficas y UTM origen de cada viaje, destino de cada viaje e inicio y fin de etapas dentro de cada viaje registrado según medio de transporte. Este es el principal dato de entrada que se utilizará para modelar el problema y determinar los puntos de mayor demanda.

En esta tesis la propuesta de diseño para el sistema de bicicletas compartidas se centrará en la comuna de Santiago que corresponde a la macrozona centro de acuerdo a la zonificación planteada en la EOD (Figura 4.1). La comuna de Santiago concentra la mayor cantidad de viajes por unidad de área de acuerdo a la encuesta con 1.881.063 viajes que representan el 10,2% de la muestra. Además, es la comuna que cuenta con más ciclovías en el Gran Santiago, son 59 y equivalen a alrededor de 64 kms. Después se encuentran Las Condes con más de 42 kms. y Providencia con 35 kms. construidos. La ciclovía más extensa de Santiago es la que abarca desde Maipú hasta Santiago, por Av. Pajaritos y Lib. Bernardo O'Higgins, más conocida como La Alameda. Esta alcanza los 10.45 km. y pasa por 12 estaciones de metro. Dadas estas características resulta ser una zona atractiva para realizar el estudio.



Figura 4-1 Zonificación EOD 2012

Fuente: Informe Final EOD 2012

Se comienza normalizando la base de datos y se eliminan valores nulos. Las columnas seleccionadas corresponden a la latitud, longitud, comuna de origen, comuna destino, hora de salida y hora de llegada. Se filtran los datos limitándolos solo a los viajes comprendidos dentro de la comuna de Santiago, obteniendo un tamaño de muestra de 3977 viajes.

El problema de localización de estaciones de bicicletas compartidas busca determinar la mejor ubicación de los vehículos para satisfacer de forma eficiente la demanda de transporte. Por esto, con los datos de demanda se procede a determinar la mejor localización para situar las estaciones de recogida dentro de la ciudad en base a los puntos con la mayor cantidad de solicitudes de transporte. Para esto se mapean las demandas individuales de transporte en un mapa de calor de manera de identificar claramente la concentración de puntos de demanda. Además, la base de datos contiene la descripción de horarios de llegada y salida por lo que se puede determinar los peak de tránsito de personas para generar instancias que permitirán ejecutar el modelo propuesto.

4.2 Formulación del Modelo y Programación Matemática

Para la propuesta de sistema de bicicletas compartidas se plantea un modelo que busca minimizar la suma de distancias que existe entre cada nodo de demanda y las estaciones de recogida de bicicletas. Este modelo está basado en el problema de las p -medianas (Revelle, 1987).

Sean $N = \{1, \dots, n\}$ el conjunto de índices para los puntos de demanda i , y $M = \{1, \dots, m\}$ el conjunto de índices para la localización de las potenciales estaciones j . Para cada (i, j) sea d_{ij} la distancia entre el punto de demanda i y la potencial estación de bicicletas j y P el número total de estaciones que serán asignadas. Se definen las siguientes variables de decisión

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el punto de demanda } i \text{ es asignado a la estación } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Considerando lo anterior, la formulación del modelo es la siguiente:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s. a} \quad \sum_{j \in M} x_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in M} x_{ij} = P \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (4)$$

La función objetivo (1) minimiza la sumatoria de distancias entre todos los nodos de demanda y las estaciones propuestas. Las restricciones (2) aseguran que cada nodo se asigna a una única estación. Las restricciones (3) limitan el número de estaciones que serán asignadas. Finalmente, las restricciones (4) determinan que la variable solo tome valores enteros binarios 0 o 1.

Este problema de localización es descrito en la literatura como el problema de la p-mediana y fue planteado por Hakimi a principios de la década de 1960, quien lo definió mediante una red de arcos y nodos, en la cual asumió que cada nodo era un punto de demanda y a su vez una posible instalación. Kariv y Hakimi

(1979), determinaron que este problema pertenece a la clase NP-hard. Este problema es un modelo básico de localización sobre redes donde las longitudes de los arcos (distancias) y los pesos de los nodos (demandas) son conocidos y consiste en encontrar p puntos de la red de tal modo que se minimice la distancia total (o media) ponderada entre estos puntos y los vértices. Desde que Hakimi realizó su planteamiento, el problema de la p -mediana ha tenido diversas variaciones y extensiones que se han utilizado para ubicar gran variedad de instalaciones del sector público, por ejemplo, los servicios públicos en una ciudad, tales como escuelas, hospitales, etc., y en el ámbito empresarial tales como almacenes, fábricas, sucursales, etc., (Revelle, 1987). La mayoría de estas aplicaciones parten de modelos determinísticos, en los cuales se considera que todos los datos del problema son conocidos. Los datos principales que se deben considerar para la resolución de un problema en particular, son las distancias y los costos, el número de instalaciones (centros de servicio o de distribución) que se desean localizar es una elección a priori del equipo decisor.

El modelo se implementó en lenguaje Python, utilizando el solucionador LocalSolver versión 11.5, que permite resolver modelos de optimización matemática mediante distintas heurísticas de forma eficiente, para lo cual se debe solicitar licencia académica. LocalSolver combina diferentes tecnologías de optimización para resolver problemas grandes, de la vida real, discretos, numéricos o incluso de caja negra en forma de modelo y ejecución sin ningún

tipo de ajuste. Resolver un problema con LocalSolver significa escribir un modelo matemático que defina:

- Las variables de decisión,
- Las restricciones que deben satisfacerse para que una solución se considere válida,
- Las funciones objetivo a minimizar o maximizar.

Código de programación fue desarrollado en base a propuesta de Rojas. C (2021) quien basó su estudio en modelo resuelto con una metaheurística implementada en lenguaje de programación Python y su funcionalidad fue validada mediante instancias construidas a partir de datos reales de demanda de viajes, solicitados sobre el área urbana de Concepción.

4.3 Análisis de capacidad de estaciones

Determinar la capacidad de la estación de bicicletas implica considerar varios factores, como la demanda, el espacio disponible y las consideraciones operativas. A partir de las soluciones entregadas por la implementación del modelo en Python se plantea que por medio de un análisis cualitativo de la información se pueda determinar la cantidad de bicicletas que sería adecuado implementar por estación.

Se debe considerar que para determinar la capacidad de la estación de bicicletas se requiere un equilibrio entre proporcionar suficientes bicicletas para satisfacer la demanda y garantizar que la estación siga siendo manejable y eficiente. La evaluación y los ajustes periódicos son esenciales para mantener un sistema eficaz de bicicletas compartidas.

4.4 Instancias de prueba

Para ejecutar el modelo propuesto anteriormente se definieron tres instancias de prueba, las cuales se describen a continuación:

SG01: Corresponde a una muestra aleatoria del 70% de los datos de demanda de viaje para la comuna de Santiago. Su tamaño es de 2.353 entradas.

SG02: Corresponde a los datos de demanda de viajes registrados en el horario peak es decir entre las 17:00 y 20:00 horas. El tamaño de la instancia es de 1.249 datos.

SG03: Corresponde a una muestra del 50% de los datos de demanda de viajes registrados después de las 18:00 horas en la comuna de Santiago. El tamaño de la instancia es de 1.662.

Cada instancia se corrió en el modelo durante 300 segundos, sin límite de iteraciones y considerando distinto número de estaciones a ser localizadas (10,15, 20 y 25 estaciones).

5 RESULTADOS

5.1 Demanda de viajes en la comuna de Santiago

Los datos obtenidos de la Encuesta Origen Destino 2012 fueron analizados y se observó que el horario peak corresponde principalmente al comprendido entre las 17:00 y 21:00 horas, con un notorio aumento de viajes a las 18:00 horas. De un total de 3922 entradas que contiene la muestra posterior a eliminar los valores nulos y filtrar solo la comuna objetivo que corresponde a Santiago, se tiene que 1249 viajes se realizan en el horario peak. Además, posterior a las 18:00 horas hay un total de 1662 viajes (hasta las 23:59). Esto corresponde a registros de lunes a viernes. A las 18:00 horas se registra un total de 443 viajes lo cual equivale al 11,3% del total de la muestra. Por otra parte, para el horario AM (entre las 07:00 y 10:00) se tiene solo un total de 76 viajes. Dados estos valores se considera que el mejor escenario sería generar instancias para horarios PM, ya que la demanda del área de interés es mayor.

Los viajes se graficaron en un mapa de calor que se muestra en la Figura 5.1 donde en color naranja se ven las zonas con mayor demanda de viajes. A partir de este mapa se analizan los 25 puntos que podrían ser candidatos a estaciones de bicicletas compartidas. Se estudia su ubicación y proximidad con sectores de alto interés y con conexiones a distintos puntos de la ciudad. Se observa que la demanda se concentra en puntos cercanos a plaza de armas, universidades y

Alameda, a los cuales las personas frecuentan por temas de estudios y trabajo. Esto sustentaría la factibilidad para instalar las estaciones en estos sectores, sumado además a que, la ciclovía más extensa de Santiago se encuentra en este sector. En la Tabla 5.1 se indica la descripción de la estación y coordenada geográfica.

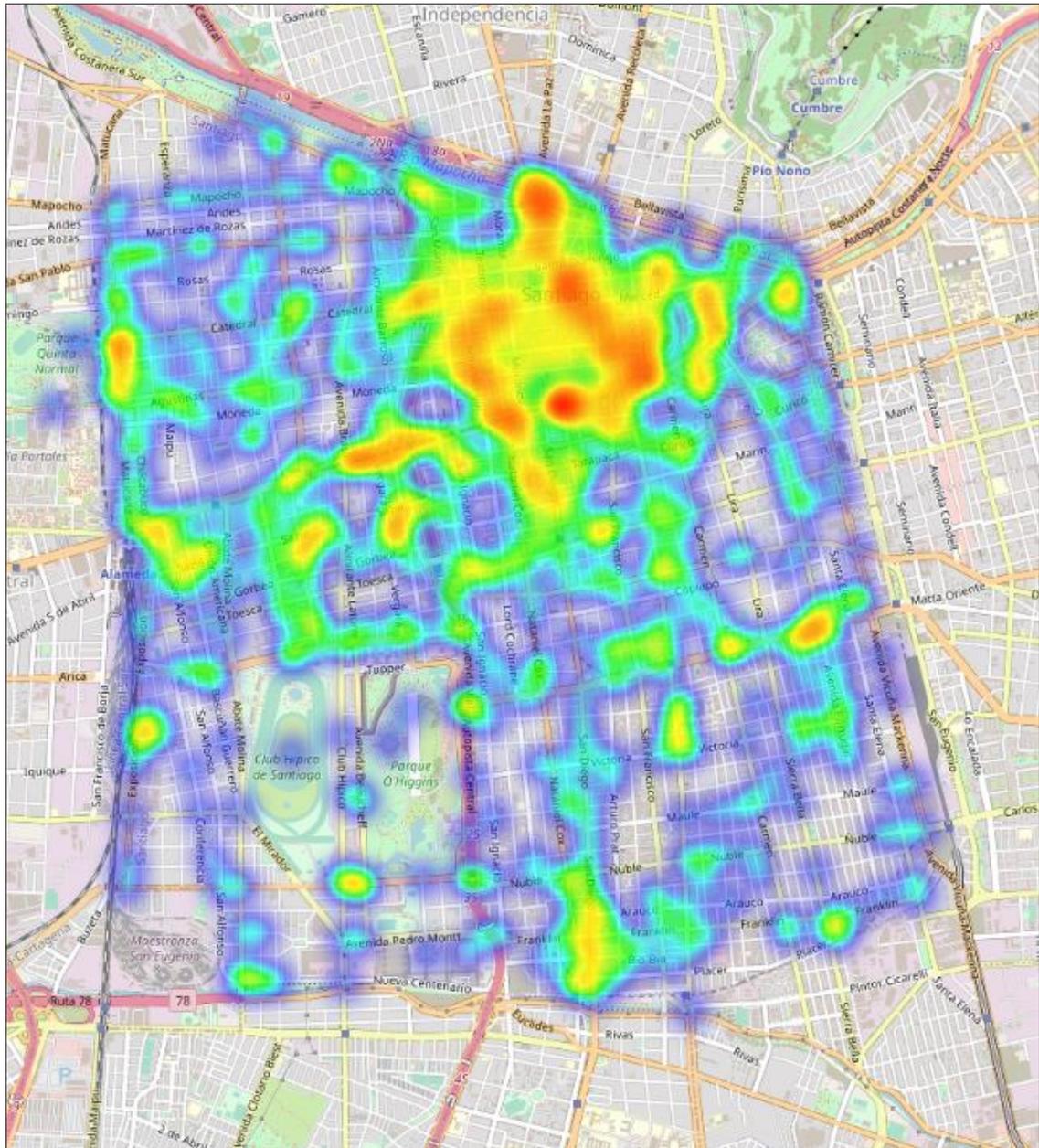


Figura 5-1 Mapa de calor de los viajes en Comuna de Santiago

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-1 Potenciales estaciones de bicicletas

Número	Nombre	Latitud	Longitud
1	Barrio Pedro Montt	-33.47102	-70.654388
2	Barrio Franklin	-33.47284	-70.648351
3	Persa Biobío	-33.47325474	-70.63931952
4	Parque O'Higgins	-33.4606119	-70.65633428
5	Barrio Meiggs	-33.452034	-70.676906
6	Estación Central	-33.450646	-70.678919
7	Quinta Normal	-33.440165	-70.679922
8	Colegio Salesianos	-33.447562	-70.66789
9	Estación Los Héroes	-33.44603973	-70.66041076
10	Av. Santa Rosa con Av. Matta	33.45848	-70.643264
11	Universidad Andrés Bello	-33.450653	-70.6664
12	Av. Portugal con Av. Matta	-33.455962	-70.633278
13	La Moneda	-33.444842	-70.654493
14	Universidad de Chile	-33.444073	-70.650502
15	Santa Lucía	-33.442217	-70.64474
16	Agustinas con Ahumada	-33.440602	-70.65082
17	Universidad Católica	-33.440337	-70.640671
18	Barrio San Isidro	-33.44713688	-70.64366884
19	Barrio San Borja	-33.44031394	-70.63760086
20	Estado con Huérfanos	-33.43943454	-70.64957339
21	Plaza de Armas	-33.43755462	-70.65057702
22	Barrio Bellas Artes	-33.43629118	-70.64423628
23	Mercado Central	-33.43323527	-70.65120267
24	Mapocho con San Martín	-33.43177581	-70.65904392
25	Santa Ana	-33.43791523	-70.65991333

Fuente. Elaboración Propia

Si se grafican los viajes registrados en el horario peak y se genera la intersección con los puntos de estaciones potenciales en un radio de 300 metros se tiene que la demanda cubierta por las 25 estaciones presentadas anteriormente cubren un

total de 69,86%, y el 30,14% restante no sería atendida por este servicio. Acá radica la importancia de analizar periódicamente la operación del sistema e identificar patrones de comportamiento que permitan sustentar la reubicación de estaciones y llegar a más usuarios. En la Figura 5.2 se muestra la ubicación de las estaciones y la demanda satisfecha. En base a esto, se nota que las estaciones más cercanas a la Moneda tendrían una mayor demanda y por lo tanto, la capacidad de estas estaciones debería ser superior a aquellas que se encuentran en sectores de la periferia de la comuna.

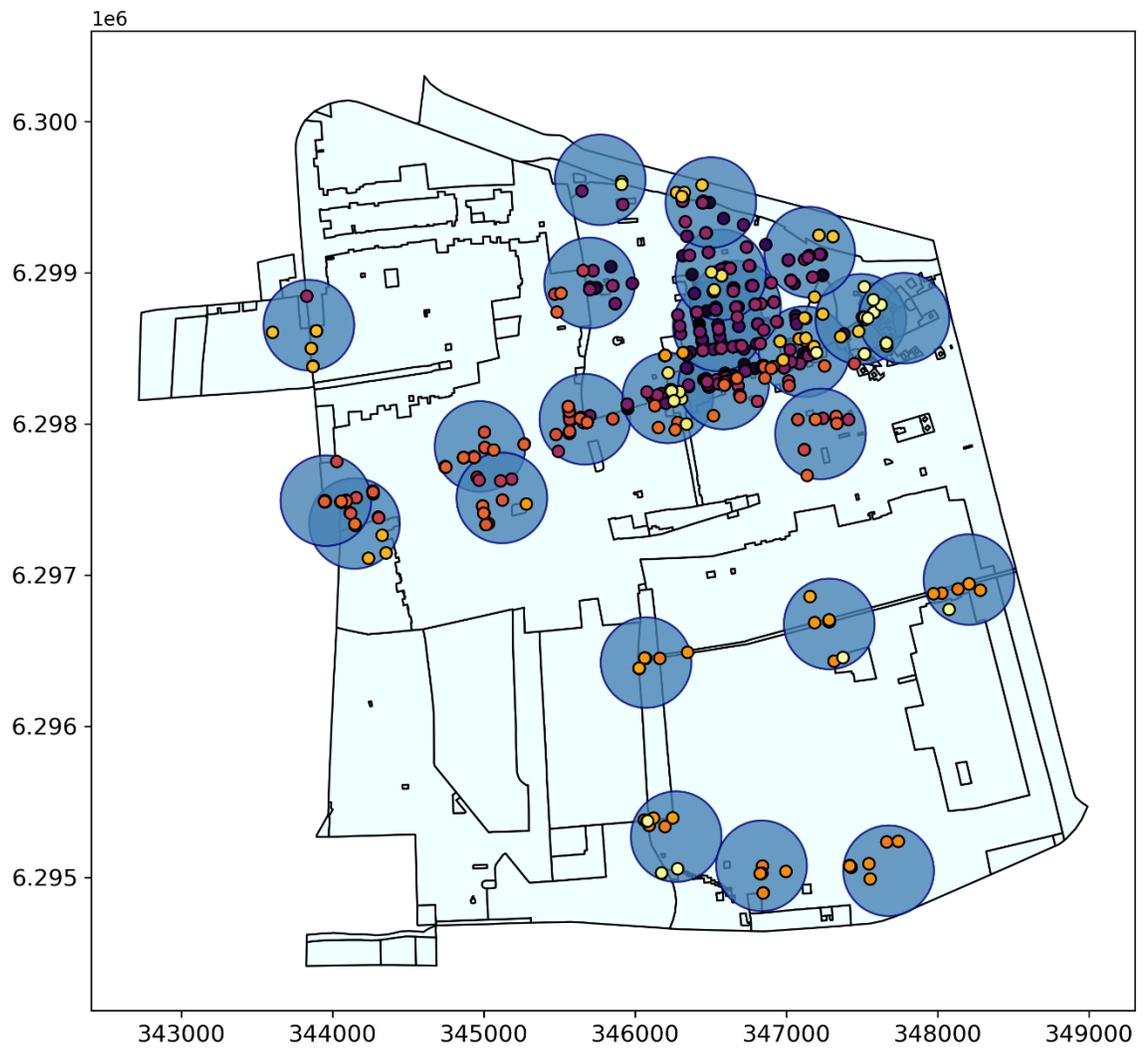


Figura 5-2 Ubicación de estaciones potenciales

Fuente: Elaboración propia

5.2 Solución del modelo matemático para distintas instancias

Tras resolver el modelo matemático para cada instancia, se obtuvo un conjunto de índices que definen la posición eficiente de potenciales estaciones de recogida para un sistema de bicicletas compartidas a disponer en la comuna de Santiago. Se grafican las ubicaciones de las estaciones que proporciona el modelo y asignan los puntos de demanda cercanos para determinar el porcentaje de demanda que es posible cubrir con esta disposición de los puntos de recogida y llegada del sistema. En las siguientes tablas se muestra el resumen de los resultados obtenidos para cada una de las instancias y considerando distinto número de estaciones a localizar (p).

Tabla 5-2 Resultados para $p=10$

Instancia	Función objetivo	% demanda cubierta
SG01	830.107	67,86%
SG02	311.871	66,79%
SGO3	650.194	66,37%

Fuente Elaboración propia

Tabla 5-4 Resultados para $p=15$

Instancia	Función objetivo	% demanda cubierta
SG01	620.017	78,24%
SG02	233.907	77,90%
SGO3	492.335	79,06%

Fuente Elaboración propia

Tabla 5-3 Resultados para $p=20$

Instancia	Función objetivo	% demanda cubierta
SG01	410.040	86,63%
SG02	189.961	84,77%
SGO3	389.686	85,62%

Fuente Elaboración propia

Tabla 5-5 Resultados para $p=25$

Instancia	Función objetivo	% demanda cubierta
SG01	347.675	91,33%
SG02	156.651	88,76%
SGO3	332.979	89,23%

Fuente Elaboración propia

Se puede observar que todas las instancias presentan un comportamiento similar en relación a porcentaje de demanda cubierta por las estaciones ubicadas, satisfaciendo alrededor de un 67% de las demanda si se localizan 10 estaciones

y cerca de un 90% si se ubican 25 estaciones de bicicletas, lo cual representa que el sistema podría llegar a gran parte de los usuarios en los distintos puntos de la ciudad. En cuanto a las distancias totales entre los nodos se muestra que un sistema de 25 estaciones permite reducir casi en un 50% la distancia de viaje.

A continuación se muestra la distribución de las estaciones para distintos valores de p que entregó el modelo para la instancia SG03, que corresponde a una muestra del 50% de los datos de demanda de viajes registrados después de las 18:00 horas en la comuna de Santiago. En general se observó que para el resto de las instancias la distribución se mantenía muy similar, por lo que solo se elige esta instancia para representar gráficamente en este informe.

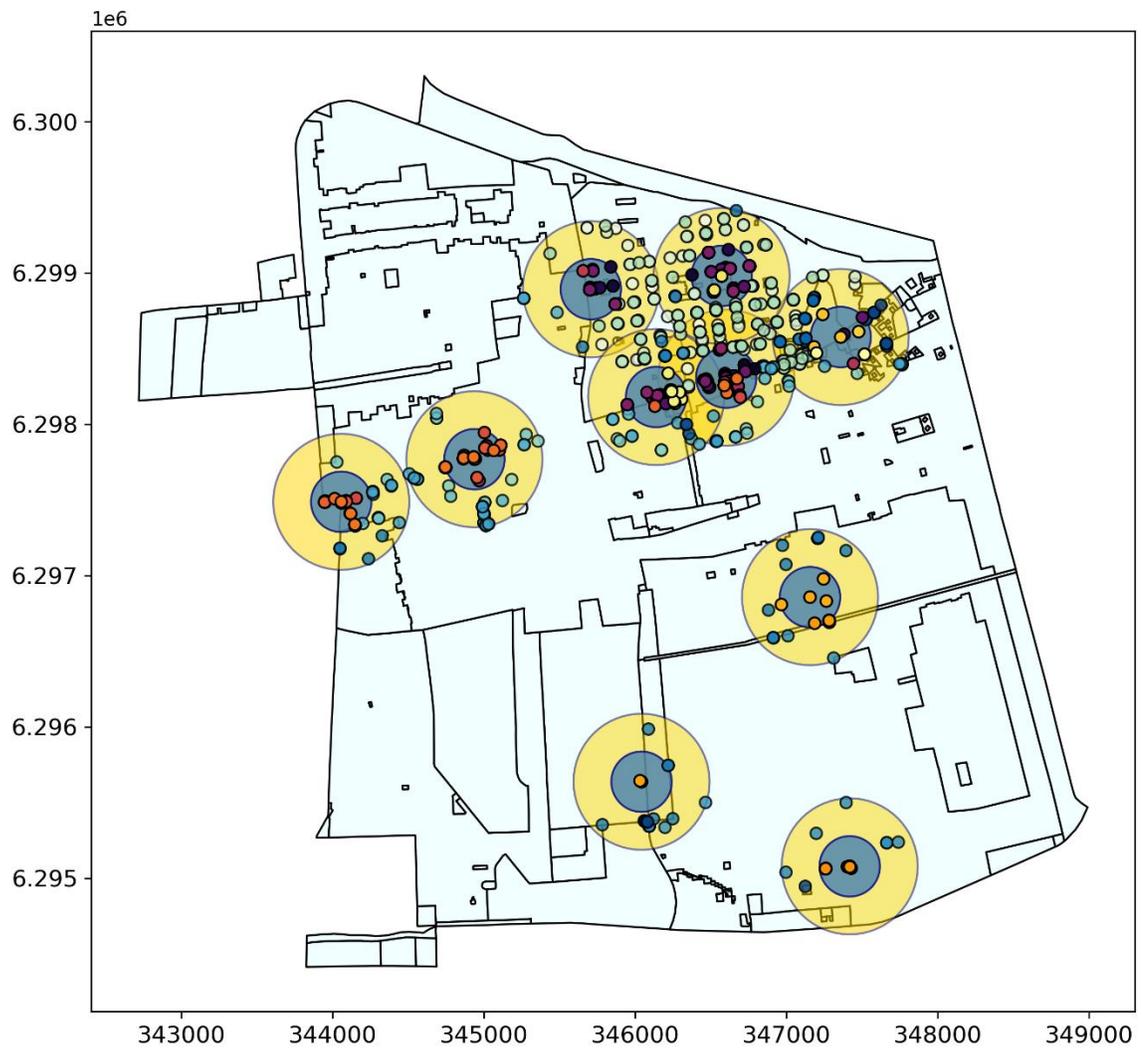


Figura 5-3 Ubicación 10 estaciones para instancia SG03

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que para 10 nodos de estaciones un total de 1103 solicitudes son cubiertas con esta solución lo cual representa el 66,37% de cobertura del sistema de bicicletas compartidas. Las estaciones se ubican principalmente a lo largo de la Alameda, siendo además aquellas que captan la mayor cantidad de

la demanda de viajes y facilitando el acceso a lugares céntricos, universidades y trabajos.

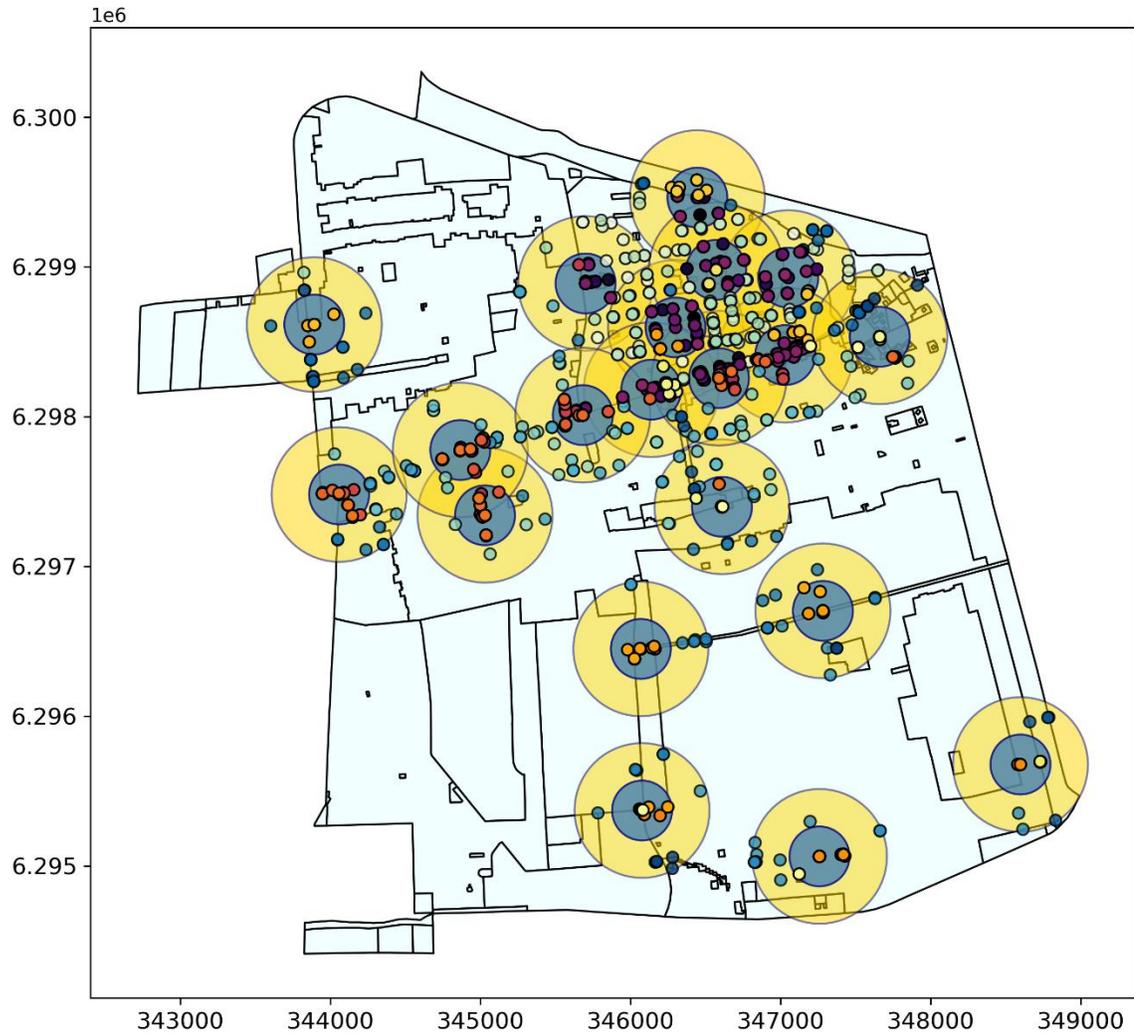


Figura 5-4 Ubicación 20 estaciones para instancia SG03

Fuente: Elaboración propia

La solución para 20 nodos indicaría que el 50% de las estaciones debería estar ubicada en Santiago centro con algunos nodos de recogida de bicicletas en

Avenida Matta, cercanos a barrio Franklin, barrio Meiggs y Quinta Normal. Esta solución cubre un total de 1423 viajes de un total de 1662 que contiene la muestra para la instancia SG03.

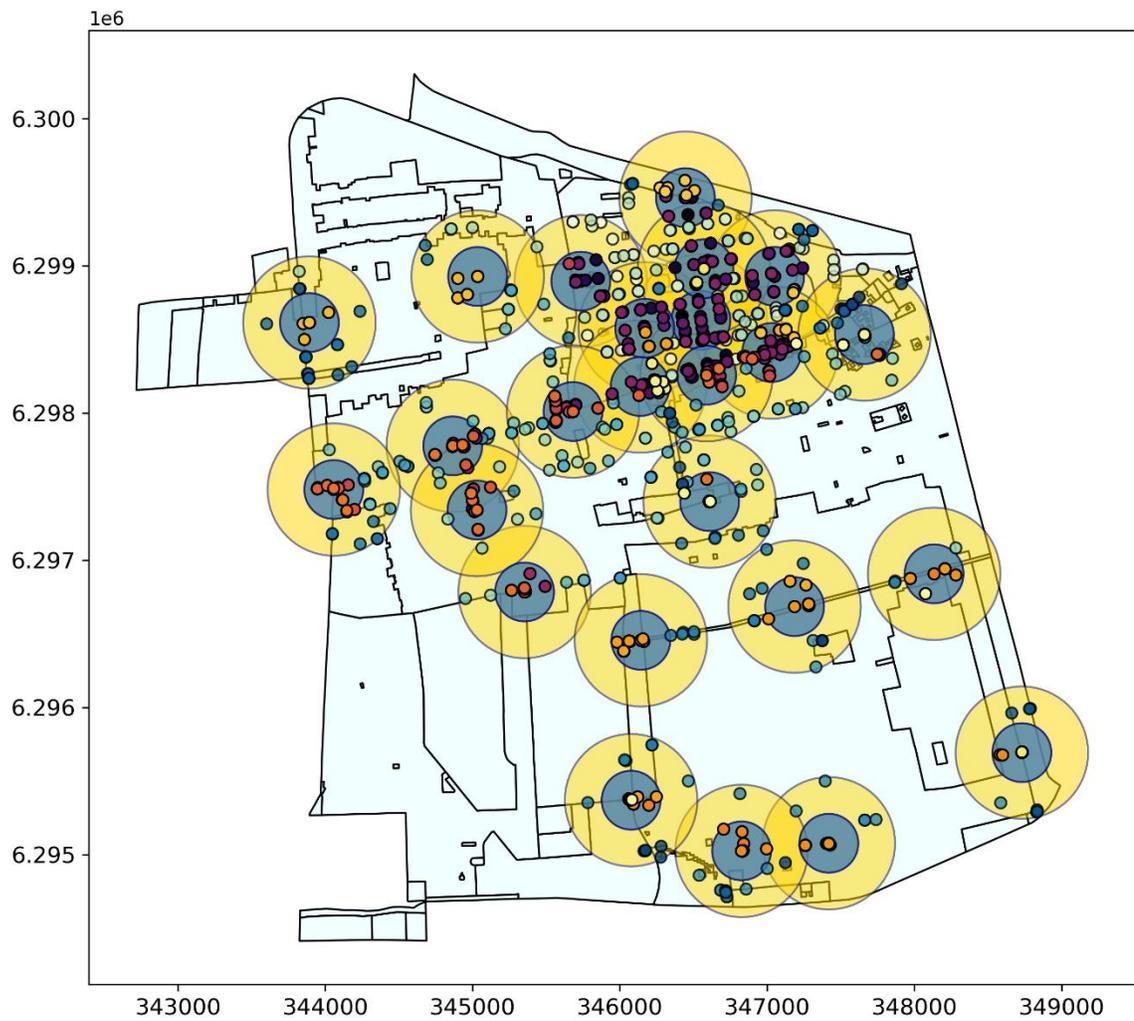


Figura 5-5 Ubicación 25 estaciones para instancia SG03

Fuente: Elaboración propia

La solución del modelo para 25 estaciones refleja que es posible cubrir el 89,23% de la demanda (1483 viajes), lo cual es muy superior a lo que se pudo obtener definiendo la localización de estaciones solo con el análisis del mapa de calor de los viajes. A partir de esto, se podría indicar que la propuesta de aplicar un modelo matemático permite obtener resultados mucho mejores si se evalúa en base a la demanda que puede ser captada.

En general la metaheurística alcanza el valor mínimo de la función objetivo en los primeros segundos de la iteración, por lo que se podría indicar que el modelo resuelto en Localsolver es bastante eficiente y permite obtener buenas soluciones.

5.3 Análisis de capacidad de estaciones

De acuerdo a la Guía de planeación del sistema de bicicletas compartidas ITDP (2018) la cantidad de bicicletas que debe tener un sistema de este tipo depende del número de usuarias y usuarios potenciales en el área de servicio para asegurar que haya suficientes bicicletas para satisfacer la demanda. Con base en esto, las ciudades grandes y densas o las áreas con un alto número de viajeros pendulares y/o turistas probablemente requerirán de 10 a 30 bicicletas por cada 1,000 residentes para satisfacer la demanda.

Según los datos recolectados en el Censo del Instituto Nacional de Estadísticas de 2017, la comuna de Santiago tiene una superficie de 22,4 km² y una población de 404 495 habitantes. Sin embargo, solo 325.176 habitantes pertenecen al grupo etario comprendido entre los 15 y 64 años. Además, de acuerdo a encuesta realizada en estudio de Sapag&Sapag Consultores (2012) el 68% de la población que usa el transporte público estaría dispuesto a usar un sistema de bicicletas compartidas y de acuerdo a la encuesta de Origen Destino 2012 quienes usan esta modalidad de transporte corresponden al 29,1% de la población. De esta forma el universo o población de interés de este estudio corresponde a todos aquellas personas usuarias potenciales del sistema, hombres y mujeres, de todos los estratos socioeconómicos entre 15 y 64 años residentes de la comuna de Santiago y usuarios intensivos del sistema de transporte público. Dados los datos anteriores la población objetivo sería de alrededor de 67 mil habitantes.

Considerando lo indicado por la Guía de planeación del sistema de bicicletas compartidas el número de bicicletas que debería tener el sistema estaría entre las 670 y 2.010 bicicletas. Dado que con 25 estaciones se puede cubrir alrededor del 90% de la demanda si se estableciera un número homogéneo de capacidad por estación, habría que ubicar alrededor de 27 bicicletas por estación. Se considera que este sería un valor apropiado considerando los espacios que ocupa disponer las estaciones en distintos puntos de la comuna.

6 DISCUSIÓN

Los datos levantados por Encuesta de Movilidad de SECTRA son de gran utilidad para analizar la demanda de viajes que existe en distintas ciudades. En este estudio se analizó los resultados del año 2012, ya que corresponde a la última base de datos disponible. Por lo que sería de interés contar con datos más actualizados y también de otras comunas del país de forma de analizar la factibilidad de implementar estos sistemas en otros lugares y así contribuir a la descontaminación y descongestión vehicular, lo cual se ha transformado en un problema en distintas ciudades como Concepción, Valparaíso, Punta Arenas.

Se determinó como muestra para realizar el estudio la comuna de Santiago dadas sus características geográficas y la gran demanda de viajes que concentra, destacando que el horario de más tránsito de personas es mayor posterior a las 17:00 horas.

Al resolver el modelo matemático se obtuvieron estaciones cercanas a la propuesta basada en el análisis visual del mapa de calor, destacando sectores como Alameda, Moneda, Universidad, Avenida Matta y Barrio Franklin como los principales centros de distribución de bicicletas. Bajo un análisis del sector es posible indicar que estos sectores destacan por la afluencia de personas y se encuentran cercanos a colegios, empresas y universidades lo cual reflejaría la

factibilidad de aplicar modelos matemáticos para resolver este tipo de problemas de planificación, y los buenos resultados que se pueden obtener.

Por otra parte, este tipo de sistemas de transporte requieren de considerar muchas variables de planificación, ya que si las bicicletas no están fácilmente disponibles para la mayor cantidad de usuarias y usuarios potenciales como sea posible, el sistema no será visto como un modo confiable que pueda reemplazar o competir con otras opciones, como los automóviles. Es por esto que al implementar estos sistemas se requiere de un análisis constante del comportamiento del usuario y del sistema, debido a que si hay un número elevado de viajes diarios promedio por bicicleta podría ser un indicador de que se deben incorporar más estaciones y bicicletas.

Considerando que Santiago ya ha implementado estos sistemas resulta de interés conocer la distribución de estaciones en la actualidad. Si se observa la Figura 5.3, se tiene que la distribución de estaciones se concentra en el sector oriente de la capital. Sin embargo, aquellas estaciones que están ubicadas en la comuna de Santiago se asemejarían a lo que ha presentado el modelo. Si consideramos la extensa área que cubre el sistema de Bike Santiago y la cantidad de habitantes del sector se podría pensar que las 2.200 bicicletas con que cuenta el sistema es un valor bajo para la demanda de viajes que se analizado en este estudio y es por lo cual resulta ser una ventaja aplicar los

modelos de optimización, que permitan captar más usuarios y considerar sus preferencias en relación a la distancia que están dispuestos a recorrer para llegar a una estación.

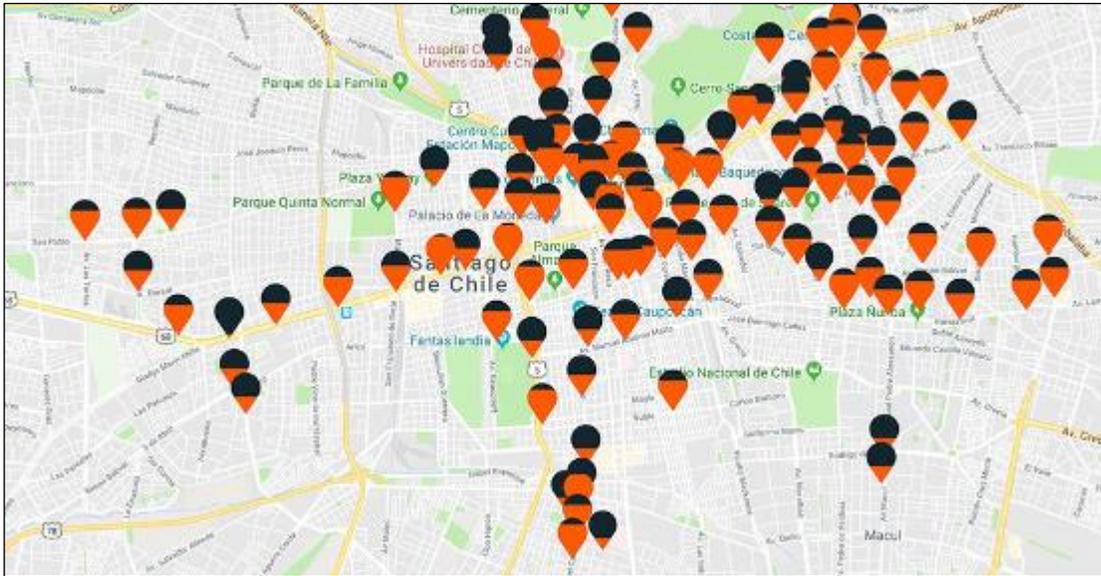


Figura 6-1 Ubicación de estaciones actual sistema Bike Santiago

Fuente: (Bike Itaú & Tembici, 2023)

7 CONCLUSIONES

La propuesta de diseño de sistema de localización de estaciones de bicicletas compartidas presentada en esta investigación resulta presentar buenos resultados de forma eficiente y adaptarse a las condiciones que existen en la actualidad en la comuna de Santiago en relación a viajes de las personas y disponibilidad de ciclovías. El modelo sustenta que este tipo de medios de transporte pueden cubrir un porcentaje importante de los viajes que deben realizar diariamente las personas para llegar a sus lugares de trabajo y estudio. A pesar de la disponibilidad de estos sistemas en la comuna se destaca que son pocos los análisis computacionales que se han estudiado para contribuir a diseñar un sistema más eficiente.

Para futuras investigaciones resultaría de interés incluir otras variables de planificación en el modelo como el espacio disponible o la infraestructura vial, además de análisis del inventario de bicicletas si se simula la cantidad de viajes a realizar. Además, podría aplicarse esta metodología de solución en otras ciudades del país para lo cual se requiere de que las instituciones públicas dispongan de más datos que permitan sustentar la aplicación de estos modelos.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Abdelmoumene, Ahmed, Imed Kacem, y Karim Labadi. 2016. «A branch-and-bound algorithm for solving the static rebalancing problem in bicycle-sharing systems». *Computers & Industrial Engineering* 95: 41-52.
- Cintrano, C., F Chicano, y E. Alba. 2020. «Using metaheuristics for the location of bicycle stations». *Expert Systems with Applications* 161. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113684>.
- Lin, Jenn-Rong, y Ta-Hui Yang. 2010. «Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints». *Transportation Research Part E* 47 (abril): 284-94. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.09.004>.
- Lin, Jenn-Rong, Ta-Hui Yang, y Yu-Chung Chang. 2013. «A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution». *Computers & Industrial Engineering*, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.006>.
- Martinez, Luis, Luis Caetano, Tomás Eiró, y Francisco Cruz. 2012. «An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the city of Lisbon». *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 54: 513-24. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.769>.

- Morency, Catherine, y Jean-Simon Bourdeau. 2021. «Bicycle Sharing/Bikesharing». *International Encyclopedia of Transportation*, 617-22.
- Nair, Rahul, Elise Miller-Hooks, Hampshire Robert, y Ana Busic. 2013. «Large-Scale Vehicle Sharing Systems: Analysis of Vélib» 7 (85-106). <https://doi.org/10.1080/15568318.2012.660115>.
- Revista Nos. 2019. «La movilidad del mañana: el gran tema para Concepción». *Revista Nos* (blog). 2019. <https://www.revistanos.cl/la-movilidad-del-manana-el-gran-tema-para-concepcion/>.
- Schuijbroek, J., R. C. Hampshire, y W.-J. Van Hoes. 2017. «Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems». *European Journal of Operational Research* 257: 992-1004.
- Shu, J., M. Chou, Q. Liu, C.-P. Teo, y I.-L Wang. 2010. «Bike-sharing system: Deployment, utilization and the value of re distribution.»
- Shui, C.S., y W.Y. Szeto. 2018. «Dynamic green bike repositioning problem – A hybrid rolling horizon artificial bee colony algorithm approach». *Transportation Research Part D* 60: 119-36.
- Shui, C.S., y W.Y. Szeto.. 2020. «A review of bicycle-sharing service planning problems». *Transportation Research Part C* 117 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102648>.
- Kariv O., Hakimi, S.L. (1979). An algorithmic approach to network location problems. II: The p-medians. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 37(3),

539-560. Localización. XIV Jornadas de ASEPUMA y II Encuentro Internacional, Badajoz, España.

- Revelle, C. (1987). Urban public facility location, Hand book of Regional and Urban Economics, in: E. S. Mills (ed.), Hand book of Regional and Urban Economics, edition 1, Vol. 2, chapter 27, pages 1053-1096 Elsevier.
- Emol. (2017). ¿Efecto de la movilidad cotidiana? La congestión vehicular en Santiago está lejos de acabarse . Emol. Obtenido de <https://vcm.emol.com/1920/formacion/efecto-de-la-movilidad-cotidiana-el-problema-de-la-congestion-vehicular-en-santiago-esta-lejos-de-acabarse/>
- La Tercera. (2018). Zonas centro y nororiente concentran el 84% de la congestión crítica en Santiago. La Tercera. Obtenido de <https://www.latercera.com/pulso/noticia/zonas-centro-nororiente-concentran-84-la-congestion-critica-santiago/462923/>
- Sapag&Sapag Consultores. (2012). Investigación, factibilidad y gestión de Concesión de Bicicletas Públicas. Santiago: Atisba.
- Rojas. C. (2021). Estudio general sobre el uso y relocalización de vehículos compartidos urbanos. Una aplicación para el caso de la ciudad de Concepción. Universidad de Concepción, Concepción.
- Mora R. y Moran P. (2022) Portraying perceptions of bike-sharing schemes (BSS) in Santiago, Chile: What both regular users and pedestrians tell us, Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Volume 13, 100534, ISSN 2590-1982, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100534>.

- El Mostrador (2022). Un 45% aumentaron los viajes en bicicletas compartidas el 2021. El Mostrador. Obtenido de <https://www.elmostrador.cl/generacion-m/2022/01/19/un-45-aumentaron-los-viajes-en-bicicletas-compartidas-el-2021/>
- Tomtom (2022). Tomtom Traffic Index, Ranking 2022. Obtenido de <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>
- Bike Itaú & Tembici (2023), El sistema de bicicletas de Santiago. Bike Itaú. Obtenido de <https://bikeitau.com.br/santiago/>