

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
BICICLETAS COMPARTIDAS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

AUTORA:

ZOILA MERCEDEZ RODRIGUEZ RODRIGUEZ

ASESOR:

CHRISTIAN SANTOS CORNEJO SANCHEZ

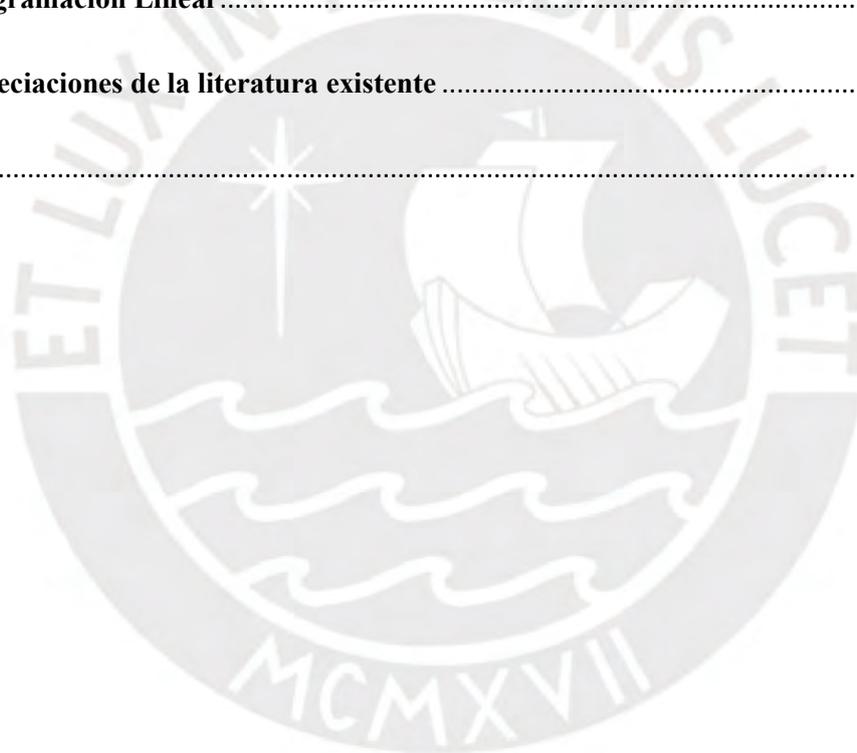
Lima, Agosto, 2020

RESUMEN

Debido al incremento de la población urbana, los servicios públicos ofrecidos en las ciudades, como el transporte público, reciben una mayor demanda. Esto ocasiona que los gobiernos tomen medidas para satisfacer la demanda insatisfecha generada por este incremento de población. La primera medida correctiva fue aumentar y mejorar la infraestructura para el parque vehicular, beneficiando a los propietarios de vehículos propios. No obstante, esto trajo consigo diversos problemas tales como la congestión, emisión de gases contaminantes y un aumento de la brecha social, disminuyendo el nivel de accesibilidad y conectividad. Es por ello por lo que diversos autores proponen medidas de transporte sostenible, siendo este un tema actual de gran importancia y controversia en varios países del mundo. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo mostrar los avances científicos, supuestos e impactos que ha tenido la implementación de un sistema de bicicletas compartidas. Este sistema nace con el fin de ser un medio de transporte para viajes de inicio a fin con rutas cortas. No obstante, se especula que el sistema impacta más al ser trabajado en conjunto con el transporte público, trayendo consigo efectos positivos en el ámbito económico, ambiental y social. En base a literatura existente, se demuestra que un sistema compartido de bicicletas es una opción eficiente que permite conectar al transporte público masivo, tales como metros y trenes, y así ser parte del sistema integral de transporte. De esta manera, se obtienen impactos económicos, en términos de ahorros de tiempo e infraestructura; impactos sociales, en términos de accesibilidad e impactos ambientales, en términos de disminución de emisión de gases contaminantes.

TABLA DE CONTENIDO

1.1. Rol del transporte en las ciudades	5
1.2. Modos de transporte urbano.....	7
1.3. Iniciativas de transporte sostenible	9
1.4. Sistema de bicicletas compartidas	11
1.5. Estado del arte.....	14
1.6. Programación Lineal	30
1.7. Apreciaciones de la literatura existente	32
Bibliografía	37



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características demográficas de las ciudades de estudio.....	8
Tabla 2: Tipo y escala del sistema de bicicleta compartida relativo a la ciudad y densidad ...	13
Tabla 3 Distancia promedio recorrida por simulación.....	17
Tabla 4 Porcentaje de demanda por tipo de transporte.....	18
Tabla 5 Factores de emisión en base al tipo de transporte.....	19
Tabla 6 Costo por daño en función a los gases contaminantes.....	19
Tabla 7 Esquema de precios en Taiwan.....	20
Tabla 8 Indicadores de disponibilidad.....	23

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento de la población urbana.....	5
Figura 2. Búsqueda de movilidad sostenible.....	9
Figura 3. Evolución de ciudades con sistema de bicicletas públicas.....	10
Figura 4. Variación en la demanda debido al cambio de precio.....	21
Figura 5. Indicadores de ocupación.....	24
Figura 6. Hora del día vs ratio de disponibilidad.....	25
Figura 7. Modelo de bicicletas compartidas.....	28
Figura 8. Tiempo de viaje por cada modelo.....	29
Figura 9. Estructura básica de un sistema de bicicletas públicas.....	30

Capítulo 1: Marco conceptual

1.1. Rol del transporte en las ciudades

El papel del transporte es fundamental ya que impacta directamente en la especialización de territorios y ciudades, generando ventaja de un área respecto a otra debido a la relación entre sus costos de movilidad y accesibilidad (Figuroa, Urbano & Sánchez, 2015). Por ello, los autores mencionados previamente expresan lo siguiente:

Las exigencias de localización tienen su origen en la necesidad de relación de unas unidades económicas con otras y del hecho simple de que mover los bienes, las personas y la información a través del espacio, constituye un proceso costoso que varía con la distancia implicada. (p.7)

Con la industrialización de los países en desarrollo desde el siglo XIX, existe una tendencia creciente respecto a la tasa de la población que residen en ciudades, como se muestra en la Figura 1, superando a la población rural predominante del siglo XVIII, debido a que las personas buscan mejores oportunidades y desarrollo en las ciudades (Figuroa et al, 2015). Además, estudios señalan que los problemas de movilidad urbana son consecuencia de la rápida urbanización y tiene múltiples efectos en las economías urbanas (Quinteros, 2016).

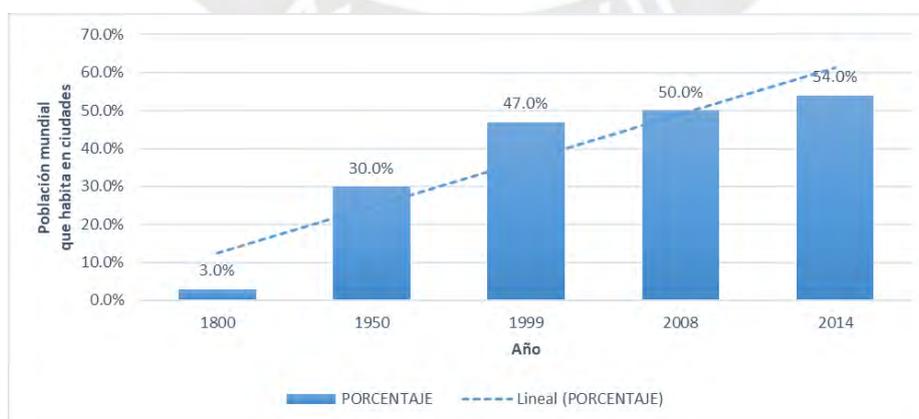


Figura 1. Crecimiento de la población urbana

Tomado de Figuroa et al., 2015.

Este proceso acelerado de crecimiento urbano implica que las ciudades deban aumentar la capacidad de sus servicios, como transporte público, para satisfacer la demanda insatisfecha consecuente de esta aceleración.

La mayor oferta de transporte supuso multiplicar la dotación de infraestructuras, para facilitar la movilidad del vehículo propio, pero fracasó por causa, entre otros efectos, de la congestión, la contaminación y los accidentes (Figuerola et al., 2015).

Esto no es ajeno a la realidad de América Latina, pues según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2013)

En los últimos años, la mayoría de los países de América Latina han visto crecer de manera progresiva su parque vehicular debido en gran medida al aumento de los ingresos per cápita, lo que permite a la población adquirir un automóvil particular. A su vez, lo que para muchas personas es un símbolo de estatus social, comodidad, confort y clase, genera muchas externalidades negativas, como un mayor consumo de combustibles fósiles, mayores niveles de contaminación atmosférica, congestión de las vías y accidentes, así como una mayor infraestructura pensada en el automóvil y no en otros modos de transporte más amigable con la ciudadanía y con el medio ambiente, entre muchas otras. (p.15)

La congestión vehicular es algo que llama la atención a nivel global, lo cual recae en la búsqueda de indicadores para evaluar su eficiencia en varias ciudades del mundo. Uno de ellos es el porcentaje de tiempo adicional que dura el viaje debido al tráfico. Según la revista estadounidense *Forbes* (2019), Lima se encuentra en el tercer lugar con el 58% de tiempo adicional. Es decir, si un viaje en condiciones normales dura una hora, en el tráfico limeño, el viaje dura aproximadamente 1 hora y 35 minutos (Anexo 1).

1.2. Modos de transporte urbano

1.2.1. Clasificación del transporte público

En la mayoría de las ciudades del mundo, el modelo del transporte urbano se constituye por dos clases principales de transporte público, los cuales son colectivo y masivo (Quinteros & Quinteros, 2015). El transporte público colectivo hace referencia a los buses que se desplazan por vías compartidas con otros tipos de vehículos motorizados y no motorizados. El transporte masivo hace referencia al metro y el *Bus Rapid Transit* (BRT). La última clase de transporte mencionado se considera la solución más eficiente por lo dentro de las principales clases de transporte público. Según los autores previamente mencionados, por un lado, el metro se alimenta únicamente de energía eléctrica, y además ofrece altos rendimientos en lo que respecta a la capacidad de pasajeros transportados y beneficios al medio ambiente, ya que no genera gases de efecto invernadero (GEI). Por otro lado, el BRT, emplea buses de alta capacidad los cuales se desplazan por vías exclusivas, con estaciones fijas y accesibles, lo que disminuye el tiempo de recorrido y las demoras ocasionadas por el tráfico.

1.2.2. Perspectiva del transporte público

Según Muñoz, Batarce & Torres (2013), a mayor número de vehículos por habitante, menor es el uso del transporte público, lo cual podría indicar que el transporte público es poco atractivo y deja de ser utilizado por los usuarios que tienen acceso al automóvil.

En lo que respecta a ingresos y población, Muñoz et al. (2013) realiza un análisis en el cual se permite comparar la densidad poblacional e ingresos en 5 países de América Latina. Sus resultados se visualizan en la tabla 1.

El coeficiente de Gini hace referencia a que tan equitativo están distribuidos los ingresos en la ciudad, es decir, si el coeficiente es 0 hace referencia a que todos los habitantes tienen

ingresos similares o equitativos y si el coeficiente es 1 significa que existe una gran brecha entre pobres y ricos y el promedio de ingresos se ve sesgado por los valores atípicos.

Tabla 1

Características demográficas de las ciudades de estudio

País	Chile	Colombia	México	México	Brasil	Perú
Ciudad analizada	Santiago	Bogotá	Guadalajara	Ciudad de México	Porto Alegre	Lima
Superficie (km ²)	955.00	478.00	351.00	2 884	497.00	2817.00
Población (miles)	5.90	7.40	3.70	12.10	1.40	9.30
Densidad (hab/km ²)	6.15	15.41	10.62	4.20	2.84	3.30
Ingreso (US\$/hab)	429.00	613.00	453.00	501.00	402.00	307.00
Coef. Gini	0.55	0.54	0.40	0.56	0.58	0.44

Nota. Tomado de Muñoz et al., 2013

Esto se puede relacionar con la decisión de qué medio de transporte utilizar, mientras que las personas con ingresos más altos adquieren un vehículo propio, las personas con ingresos más bajos se movilizan con el transporte público; lo cual genera desigualdad en términos de oportunidades de desplazamiento y, además, congestión vehicular, ya que los vehículos particulares ocupan 6 veces más metros cuadrados por persona que el bus y 12 veces más que la bicicleta (Rivera, 2016).

Esto va de la mano con una de las cinco prioridades que París se trazó para el periodo 2007 – 2015 dentro del Proyecto Plan de Viajes de París (PDP), mencionad por Rivera (2016), la cual es: “Se debe garantizar que, independientemente de los ingresos económicos o la condición física de cada quien, todos deben tener el derecho a la movilidad por igual “.

En base a lo anterior, es lógico pensar que la mejor manera de transporte es el transporte público masivo, mediante los metros o BTR. No obstante, en muchos casos el acceso a los mismos se hace por buses u otros vehículos motorizados. Es por ello por lo que varios estudios buscan analizar la viabilidad de que las conexiones al transporte masivo sean también mediante vehículos sostenibles, como es el caso de la bicicleta.

1.3. Iniciativas de transporte sostenible

En base a lo mencionado anteriormente, se busca migrar del uso excesivo del vehículo propio hacia una movilidad sostenible, mejorando la calidad de servicio que brinda el transporte público y así, promover su uso. Este cambio se puede visualizar en la figura 2.

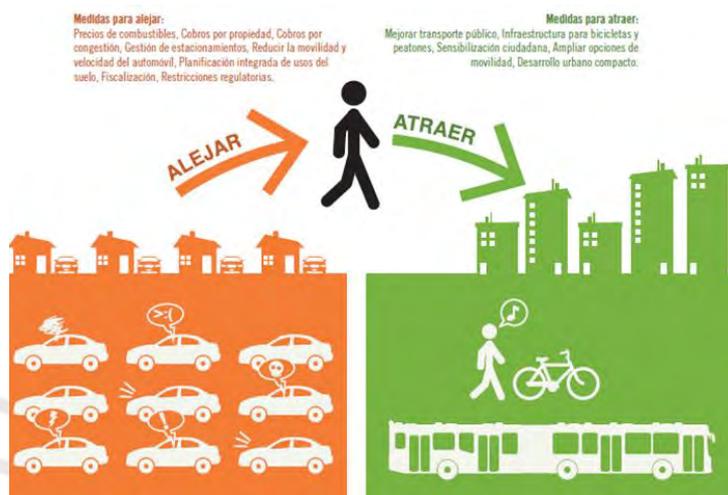


Figura 2. Búsqueda de movilidad sostenible
Tomado del BID, 2013.

1.3.1. Movilidad Sostenible

Hoy en día es común escuchar el término “Movilidad Sostenible”. Dicho concepto se puede definir como aquel que permite a individuos y sociedades satisfacer sus necesidades de acceso a áreas de actividad con total seguridad de manera compatible con la salud de los seres humanos y los ecosistemas. (Geoinnova, s/f)

Asimismo, existen algunos paradigmas entre lo que es movilidad sostenible y transporte, los cuales se explican en el Anexo 2. En resumen, se enfatiza que la movilidad es el movimiento de personas, no de objetos o vehículos y su valor se determina por la accesibilidad y satisfacción que presentan las personas al usarlo.

Ante la problemática de establecer un sistema de transporte público viable, surgen planes de integración que abarcan diversas iniciativas. Una de ellas es el sistema compartido de bicicletas, que actualmente se encuentra en 4 de los 5 continentes y en más de 600 ciudades, tales como París, Lyon Marsella, Berlín, Taipéi, Taiwán, Canadá, entre otros. Cabe resaltar que dos tercios del sistema público de bicicletas a nivel mundial se encuentra en Asia (Wu, Kang, Hsu, Wang, 2019). La tendencia de implementación de este sistema es creciente y su comportamiento se puede visualizar en la figura 3.

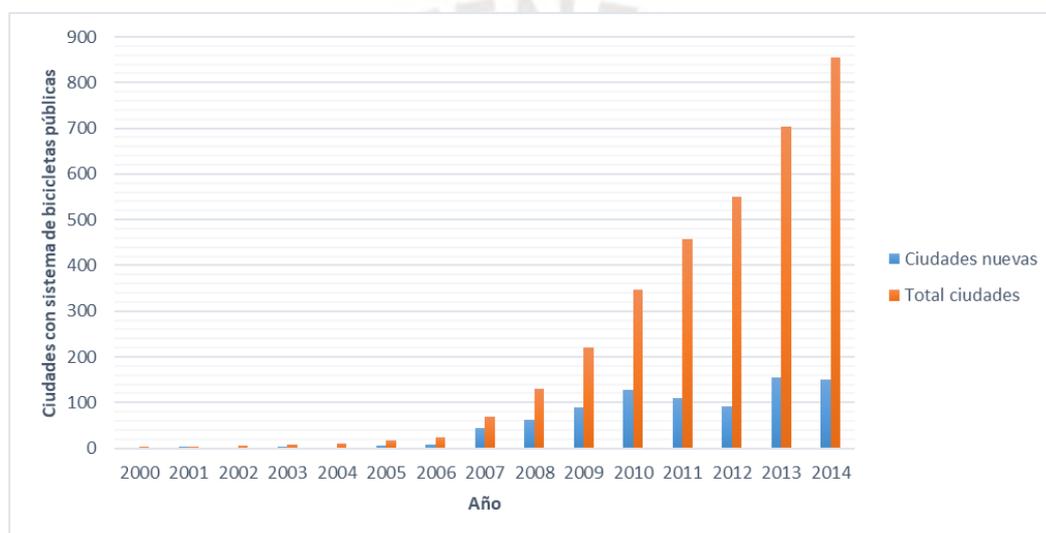


Figura 3. Evolución de ciudades con sistema de bicicletas públicas
Tomado de Rivera, 2016.

Se observa que al 2014, ya existían 855 ciudades con un sistema de bicicletas públicas. Algunos de los objetivos de este sistema son fomentar el ciclismo, incrementar las opciones de transporte, mejorar la calidad del aire y potenciar el transporte público existente. Asimismo, Li Zhang, Zhang, Duan & Bryde (2014) declaran que el sistema de bicicletas compartidas es un modo de transporte verde, y juega un rol complementario en el sistema de transporte. Las ventajas del sistema son múltiples. Por un lado, las bicicletas son relativamente baratas de comprar y de mantener en comparación con otros vehículos, además, son amigables con el medio ambiente, en todas sus etapas del ciclo de vida. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2017), conocido también como IDEA por sus siglas en español, la

energía empleada en un automóvil permitiría la fabricación entre 70 y 100 bicicletas, las cuales no necesitan de combustible externo para funcionar y no emiten ningún tipo de gas contaminante, y al momento que su uso termine o llegue a la etapa de disposición final, gran parte de los componentes se pueden recuperar y reutilizar. Es por ello que existen proyectos de reciclaje en los cuales se crean nuevas bicicletas en base a componentes y fragmentos de otras, las cuales se denominan “recicletas”. Por otro lado, pueden llegar a destinos desatendidos, brindando oportunidades de transporte a las personas en zonas de la periferia. El rango ideal para recorrer en bicicletas es de 2km – 5km, y se puede usar para conectar con los paraderos de buses, solucionando así el problema de la última milla en los sistemas de transporte públicos.

Según el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (2011), conocido por sus siglas en inglés, UN DESA, el 19% de los usuarios declaran que Vélib, sistema de bicicletas compartidas en París, les permitió hacer viajes que de otro modo hubieran sido imposibles y, el 20% de los usuarios declararon que usaban menos sus autos.

Gracias a los estudios mencionados previamente, se concluye que los sistemas de bicicletas, además de promover el transporte público, mejoran considerablemente la accesibilidad y conectividad, lo cual permite que más personas se unan a un sistema integrado de transporte público. Es por ello que los siguientes puntos se enfocarán en el sistema de bicicletas compartidas, las recomendaciones para su uso y los diversos impactos que generan en las ciudades que ya cuentan con el sistema en marcha.

1.4. Sistema de bicicletas compartidas

El sistema de bicicletas compartidas, también conocido como Bicicletas de Uso Público (PUB's), hace referencia al alquiler o préstamo de una bicicleta a corto plazo. La dinámica es que el usuario pueda tomar la bicicleta en una estación *i*, usarla y dejarla en una estación *j*, lo

cual lo hace ideal para viajes de punto a punto (UN DESA, 2011). El flujo de funcionamiento se puede caracterizar dependiendo de la manera de retorno.

Cabe resaltar que, Faghih-Imani, Anowar, Miller & Eluru (2017) estudiaron el comportamiento el sistema compartido de bicicletas *CitiBike*, implementado en Nueva York, cuyos resultados muestran que, durante las mañanas, mediodía y la tarde en días laborables, el 50% de los viajes que estudiaron, con una distancia menor a 3km, se realizaban más rápido en una bicicleta que en un servicio de taxi.

1.4.1. Generaciones de los sistemas de bicicletas compartidas

Los sistemas de bicicletas compartidas surgen como iniciativa en Europa hace aproximadamente 60 años atrás. Según Dobrzyńska & Dobrzyński (2016), los cuales recurren a Shaheen & Guzman (2011), el sistema en mención consta de 4 en generaciones, siendo esta última la situación actual.

- » Primera generación: Nació en Ámsterdam, en 1965. El sistema era gratis y de libre uso, lo que causó numerosos robos y destrucciones. La implementación del sistema falló, no obstante, el concepto de bicicletas compartidas permaneció en el tiempo.
- » Segunda generación: Nació en Copenhague, en 1995. El sistema incluía cargos de servicios mediante el principio de depósito de monedas.
- » Tercera generación: Nació con BIXI en Montreal, en 2009. Este sistema ofrece soluciones en términos organizacionales y tecnológicos, los cuales incluían diversas especificaciones en las estaciones, como identificación de usuario, y opciones de tipo de pago.
- » Cuarta generación: Algunos autores (Shaheen et al., 2010) declaran la existencia de la cuarta generación del sistema de bicicletas compartidas. Esta generación se distingue ya que permite la integración del sistema con otros medios de transporte público. Eso incrementa el uso de soluciones tecnológicas en orden de promover los principios del desarrollo sostenible.

Actualmente se busca promover el desarrollo de los sistemas bajo los principios de la cuarta generación, velando por la integración del sistema con el transporte público con el fin de promover el desarrollo sostenible, y no solo bajo el concepto del sistema compartido de bicicletas como medio de transporte individual.

1.4.2. Clasificación de los sistemas de bicicletas compartidas

Existen básicamente dos tipos de PUB's, aquellos que son considerados manuales y aquellos que son considerados automáticos (IDAE, 2007)

- » **Manual:** Requiere que los usuarios se identifiquen ante el personal de atención cuando deseen disponer o devolver una bicicleta
- » **Automático:** Son más flexibles respecto a la operación, localización y aplicación de tarifas. No es necesario el personal de atención para disponer o devolverla, sino que las estaciones están automatizadas para soportar las acciones previas.

Según IDAE (2007), la clasificación del sistema se puede relacionar con la densidad en términos de población de una ciudad.

Tabla 2

Tipo y escala del sistema de bicicleta compartida relativo a la ciudad y densidad

Población en la ciudad	Densidad	Tipo de sistema	Alcance del sistema en la red de la ciudad
>200 000	Alta	Automático	En toda la ciudad
	Baja	Automático	En el centro de la ciudad o en las zonas más densas
50 000 - 200 000	Alta	Automático	En toda la ciudad
	Baja	Manual	En las estaciones de transporte público y espacios
<50 000	Alta	Automático	Cerca a las principales actividades (centros comerciales, centros de salud, etc)
	Baja	Manual	En las estaciones de transporte público y espacios compartidos (parques, lozas deportivas, etc)

Nota. Tomado de IDAE, 2007.

En base a lo mencionado, es notable que existen varios estudios que buscan analizar el comportamiento de un sistema de bicicletas públicas e incorporarlos en el transporte público, para de esta manera, promover su implementación, disminuir la hegemonía del vehículo propio y migrar hacia una movilidad sostenible y accesible.

1.5. Estado del arte

1.5.1. Sistema compartido en Taiwan - YouBike

En la última década, el sistema de bicicletas compartidas ha sido objeto de estudio en muchos países con el fin de reducir el impacto del calentamiento global, los niveles de tráfico y mejorar la calidad del aire, además de mejorar el sistema de transporte público mediante la implementación de sistemas sostenibles.

Uno de los estudios más relevantes se realizó en el sistema de bicicletas públicas *YouBike*, en Taiwán, Asia, con el fin de promover los modos de transporte sostenibles.

YouBike fue inaugurada como un proyecto piloto en marzo del 2009, con 11 estaciones y 500 bicicletas. Luego de 3 años, el sistema se incrementó a 772 estaciones y más de 25 000 bicicletas (cada estación tiene capacidad de 40 bicicletas). Asimismo, el sistema es subsidiado por el gobierno y las bicicletas son fabricadas por una de las más grandes y mejores marcas de bicicletas a nivel mundial, Giant (Wu et al., 2019)

Por un lado, se buscó que el sistema de bicicletas cuente con las tres S, es decir, cuente con las siguientes características: transporte sostenible, sustituto de viajes cortos y permitir la conexión con el transporte público. Además. se buscó analizar y entender el comportamiento de los usuarios frente al sistema *YouBike*, por lo que, en el estudio realizado por Lu, Hsu, Chen & Lee (2018). se utilizó el modelo ABM (*Agent Based Modeling*) considerando los siguientes escenarios:

1. Maximización de la utilidad (RUM): Se asume que los pasajeros aceptan y escogen la mejor opción de transporte considerando los factores como costo, tiempo y nivel socioeconómico.
2. Racionalidad limitada (BR): Toma en cuenta las limitaciones cognitivas del pasajero, como conocimiento y capacidad computacional, considerando que el pasajero tomara la decisión que satisfaga la necesidad de viaje, la cual no es necesariamente la óptima, sino la suficientemente buena.

Por un lado, para la simulación RUM, se consideraron cuatro factores: costo del viaje, tiempo del viaje, nivel de accesibilidad y propiedad de vehículo propio.

Los factores “tiempo del viaje” y “nivel de accesibilidad” son evaluados por cómo el agente valoriza su tiempo, definido como “valor del tiempo” (VOT).

Los autores también indican que estudios empíricos han determinado que los viajeros son más sensibles al respecto al tiempo que transcurre en acceder al vehículo que el tiempo en el vehículo, generando una disminución de utilidades por minuto fuera del vehículo en comparación a dentro del vehículo (Koppelman & Bhat, 2006). Los pesos para el “tiempo fuera” y “tiempo dentro” del vehículo son 60% y 100% de la hora del sueldo del usuario respectivamente.

Los cuatro factores se definen como:

- » Costo del viaje (costo) = $c_{\text{viaje}} + c_{\text{conexión}}$
- » Tiempo del viaje (tiempo) = $d_{\text{viaje}} / v_{\text{viaje}} * s * 60\%$
- » Nivel de accesibilidad (accesibilidad) = $d_{\text{conexión}} / v_{\text{conexión}} * s * 100\%$
- » Posesión de vehículo y/o motocicleta (propiedad) = 1, si cuenta uno de ellos, 0 en otros casos.

Donde “s” representa el salario promedio, “ d_{viaje} ” y “ $d_{\text{conexión}}$ ” representan la distancia del viaje y de la conexión. Asimismo, la función utilidad se modela en base a los cuatro factores previamente mencionados, obteniendo la siguiente ecuación:

$$V_{i,j} = \beta_1 * \text{costoj} + \beta_2 * \text{tiempoj} + \beta_3 * \text{accesibilidadj} + \beta_4 * \text{propiedadj}$$

Donde β_k es el peso correspondiente a cada uno de los cuatro factores, los cuales se llevan el subíndice j si se ve influenciado netamente por el sistema, o i si depende netamente del usuario.

Por otro lado, los parámetros a considerar para el modelo de simulación BR son los siguientes: nivel de aspiración o indiferencia, umbral de estrés y nivel de activación. La diferencia entre la indiferencia y la utilidad del modo de transporte elegido se llama estrés. Es decir, si el usuario no es nada indiferente y le interesa encontrar la mejor forma de transporte, la indiferencia se minimiza, maximizando el estrés. Si este escenario ocurre y el estrés supera el umbral de estrés, se escoge la opción óptima, caso contrario, se escogerá la primera que satisfaga su necesidad y esta se repetirá cada vez que el usuario inicie un viaje. El nivel de activación del usuario i en el tiempo t se define como:

$$AL_i^t = \log (AL_i^{t-1} + 1 + \beta)$$

Si el modo ya ha sido seleccionado por el usuario

$$AL_i^t = \log(\alpha AL_i^{t-1} + 1)$$

Donde $\beta > 1$ hace referencia al peso cuando del modo de transporte cuando se selecciona por primera vez y $0 < \alpha < 1$ es la tasa de retención del modo.

Además, los autores indican, gracias a literatura pasada, que la distancia promedio de viaje en bicicleta, metro, motocicleta y vehículo es de 2km, 8.1km, 9km y 12km respectivamente. Estos valores serán usados como base y se compararán con los resultados de la simulación RUM y BR para determinar cuál se ajusta mejor a la realidad (tabla 3).

Los resultados muestran que la simulación bajo el modelo de *Bounded Rationality* se aproxima más a la realidad. Gracias a ello se pudo calibrar el modelo que será utilizado para simular la respuesta de los usuarios a las acciones que se propondrán más adelante.

Tabla 3

Distancia promedio recorrida por simulación

Año	2016	2015	2015
Distancia promedio	Data histórica	Simulación BR	Simulación RUM
Metro	8.10	7.29	7.19
Auto	12.00	10.42	7.93
Motocicleta	9.00	7.64	10.92
Bicicleta	2.00	1.72	2.31

Nota. Tomado de Lu et al., 2019

Los autores proponen dos estrategias para promover el uso de bicicleta, incentivando así la migración hacia el sistema YouBike. Las estrategias son: extensiones de infraestructura e incentivos por usar el sistema de bicicleta compartida.

Estrategia 1: Mejor infraestructura de bicicletas

Los autores, en base a Liu et al. (2012) indican que, las estaciones para las bicicletas usualmente se encuentran localizadas en las veredas cerca de una estación de tránsito. En Taipei, gran parte de las estaciones están localizadas cerca de la estación de metro y algunas cerca de la estación de buses. Esa estrategia busca aumentar y repotenciar las estaciones del sistema *YouBike*.

Estrategia 2: Incentivos para el sistema de bicicletas compartidas

Consiste en dos acciones puntuales: La primera hace referencia al uso gratuito de una bicicleta siempre y cuando sea usada para conectar con el tránsito público a través de una tarjeta inteligente. La otra acción es agregar dos nuevos dólares taiwaneses para cada viaje después de un viaje culminado.

Los porcentajes de personas que utilizarían cada modo de transporte dependiendo de la estrategia utilizada se aprecia en la tabla 4. Se puede observar que existe una mayor migración o que más personas estarían dispuestas a usar los sistemas compartidos de bicicleta siempre cuando estos sean gratuitos si se utilizan para conectan con el sistema de transporte público. El resultado presenta un impacto positivo, ya que no solo se promovería el uso de bicicletas, sino también el uso del bus y metro, y disminuiría en casi 6% el porcentaje de personas que se transportan en auto particular. Esto va de la mano con lo brindado por Huang (2016), lo cual indica que el 48% de viajes de *Youbike* empiezan o terminan en una estación de metro en Taipéi, lo que permite especular que al menos la mitad de los viajes realizados en el sistema son utilizados para completar la primera o última milla de viaje.

Tabla 4

Porcentaje de demanda por tipo de transporte

Tipo transporte	Estrategia 1		Estrategia 2	
	Real	Extenciones de infraestructura	Conexión gratuita el transporte público	Cupón válido por 2 nuevos dolares de Taiwan
Bicicleta	5.40%	5.79%	6.30%	5.60%
Caminata	16.40%	15.70%	20.47%	20.00%
Motocicleta	27.30%	31.40%	24.41%	33.60%
Auto	16.90%	12.40%	10.24%	12.80%
Bus	17.20%	21.49%	19.69%	14.40%
Metro	16.90%	13.22%	18.90%	13.60%

Nota. Tomado de Lu et al., 2019

Finalmente, los autores analizaron los impactos ambientales de las tres estrategias analizadas, asociados con las emisiones estimadas de Sox, NO_x, CO y otros gases de efecto invernadero. La tabla 5 muestra los factores de emisión de cada gas por pasajero por kilómetro recorrido (PKT):

Tabla 5 Factores de emisión en base al tipo de transporte

Gas emisor	Bicicleta	Caminata	Motocicleta	Auto	Bus	Metro
NO _x (g/PKT)	0.00	0.00	0.34	0.64	0.60	0.09
SO _x (g/PKT)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.14
CO (g/PKT)	0.00	0.00	6.12	7.96	0.14	0.02
GHG (CO ₂ e/PKT)	0.00	0.00	138.51	231.28	78.24	77.48

Nota. Tomado de Lu et al., 2019

Como se puede observar, los vehículos que generan mayor emisión de gases contaminantes por PKT son las motocicletas y los autos, especialmente CO. Estos gases representan un costo por daño, los cuales se muestran en la tabla 5, en función a Nuevos Dólares Taiwanesees.

Tabla 6

Costo por daño en función a los gases contaminantes

Costo del daño (2009 NTD/g)	
NO _x	0.101342
SO _x	0.252785
CO	0.001198
GHG	0.000590

Nota. Tomado de Lu et al., 2019

El costo total por daño (TDC) se calcula con bajo la siguiente fórmula:

$$TDC = EFi * DCi * Tdj$$

Donde EF hace referencia a los factores por PKT por tipo de vehículo, DC hace referencia al costo de daño por tipo de vehículo y Td hace referencia a la distancia recorrida por tipo de vehículo.

Con base en las simulaciones se obtuvo que el costo total por daño se puede reducir en 16%, lo cual es equivalente a 1.5 millones de dólares americanos en daño de transporte por año comparado con el escenario real del 2015.

En el estudio anterior se pudo visualizar la sensibilidad de usuarios frente al esquema de precios. Un mayor análisis al respecto es realizado por Wu et al. (2019), el cual investiga la demanda de los trayectos (origen - destino), y su relación con el esquema de precios en el sistema *YouBike*, en Taiwán.

El actual esquema de precios de YouBike se muestra en la tabla 6.

Tabla 7

Esquema de precios en Taiwán

Descripción	Alquiler individual	Miembro del sistema
Frecuencia de uso	Una o raras veces	Uso recurrente
Tipo de pago	Tarjeta de crédito	EasyCard
Lugar de registro	Cualquier kiosko	Centro de servicios oficiales o a través de la web
Precio, antes del 1° de abril, 2015		
Las primera 4 horas	10 NTD por 30 minutos	Gratis por los primero 30 minutos, 10 NTD por 30 minutos
Entre 4 y 8 horas	20 NTD por 30 minutos	20 NTD por 30 minutos
Más de 8 horas	40 NTD por 30 minutos	40 NTD por 30 minutos
Precio, despues del 1° de abril, 2015		
	Se mantiene constante	5 NTD por los primeros 30 minutos, luego se mantiene constante

Nota. tomado de Wu et al., 2019

En este sistema, no hay cobro por suscripción, lo que hace atractiva la opción de volverse miembro del sistema. Asimismo, los miembros cuentan con una tarjeta inteligente la cual se puede utilizar en la mayoría de los sistemas de transporte público en la ciudad. Actualmente cuenta con 8 millones de suscripciones (8.41% de la población), porcentaje superior considerando que *Citi Bike* en Nueva York cuenta con solo 200 000 suscripciones (2.31% de la población).

El sistema contaba con la política de que los 30 primeros minutos de uso eran gratis para los miembros del sistema, no obstante, esta finalizó el 1 de abril del 2015. Cabe resaltar que el estado siempre ha subsidiado el sistema, solo que ahora en menor cantidad. El 73% de los usuarios no tuvieron problema, sin embargo, se puede observar una caída de demanda en el gráfico 5.

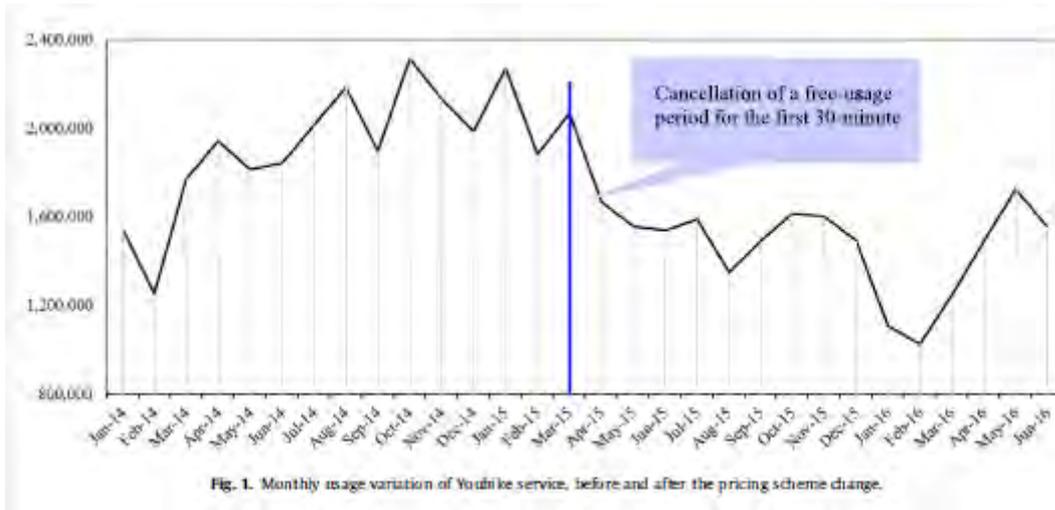


Fig. 1. Monthly usage variation of Youbike service, before and after the pricing scheme change.

Figura 4. Variación en la demanda debido al cambio de precio

Tomado de Wu et al, 2019

El gobierno de Taipéi afirmó que este nuevo esquema de precios ayudará a lograr una mejor utilización de la capacidad del sistema y recursos públicos, especialmente en términos de desbalance entre oferta-demanda.

Como consecuencia del cambio de precios, luego del 1 de abril de 2015, la ocurrencia de la situación de no encontrar una bicicleta en una estación durante más de 20 minutos ha sido reducida de 5000 a 1500. Además, el subsidio del gobierno se redujo al nivel de 10 millones de NTD (equivalente a 300 000 dólares americanos o 999 000 PEN)

Según los resultados, la reducción de viajes no fue significativamente alta (13.03%), y la mayoría provienen de viajes cuya distancia es menor a los 800m. Según el estudio, las personas toleran caminar entre 400m y 800 m hasta una estación de transporte público, por lo que optan por caminar en lugar de usar el sistema de bicicletas compartidas.

Cabe resaltar que en varios estudios se criticó el hecho de que las personas prefieran usar una bicicleta en lugar de caminar. Este es el caso de Lu et al. (2018), que, citando a Fishman, Washington & Haworth, 2014; Woodcock, Tainio, Cheshire, O'Brien & Goodman (2014), indican que los beneficios de usar el PUB's están sobrevalorados, ya que permite migrar a las

personas de caminar a usar la bicicleta, y esto, para distancias cortas, disminuye los impactos a la salud ya que caminar trae consigo más beneficios.

Es por ello que se concluye que la medida adoptada por el gobierno de Taipéi fue acertada y cumple con el objetivo principal: formar un transporte integral y sostenible mediante el sistema compartido de bicicletas y el transporte público y, además, para viajes cortos, incentiva a las personas a que caminen, trayendo consigo más beneficios para la salud.

Gracias a los estudios realizados en Taipéi, se determinó que uno de los factores más influyentes en el uso del sistema es el precio por pagar. No obstante, aún quedan incógnitas por resolver, tales como la localización de las estaciones del sistema.

1.5.2. Sistema compartido en París – Vélib

El sistema de bicicletas compartidas, Vélib, en París, se encuentra en constante crecimiento, por lo que se busca extender la red actual. No obstante, esto trae consigo algunas incógnitas tales como: definir la dimensión y localización de las estaciones, permitir el mantenimiento y los cambios de batería en caso de las bicicletas eléctricas, etc.

El estudio fue realizado por Feng, Costa & Marc (2017), y se determinaron los siguientes indicadores:

Disponibilidad: $\frac{\text{Tiempo en servicio}}{\text{Tiempo total}}$

Donde, “tiempo en servicio” se considera cuando la estación tiene al menos una bicicleta disponible y al menos un lugar para estacionar.

- **Ocupación:** $\frac{ni}{Cit}$

Donde n es la cantidad disponible de bicicletas en la estación i en el tiempo t, y c es la capacidad o número total de espacios de la estación i para ubicar las bicicletas.

Asimismo, para saber cuántos grupos se formarán a partir de cada estación estudiada, se trabajará con el método de *clustering*.

Clustering: agrupar elementos tal que los elementos de cada grupo sea los más similares posibles mientras que los elementos entre distintos grupos sean los más distantes posibles. Se utilizará con la metodología *k-means* y *hierarchical cluster*.

Se extrae data correspondiente al periodo del 7 de setiembre del 2015 al 18 de octubre del 2015 (6 semanas), se considera que en este periodo no existe ocurrencia de eventos extraordinarios.

Una estación se considera como un punto, y dentro de las 6 semanas de estudio, la data está conformada por grandes datos discretos. Además, cada punto contiene información acerca de la capacidad de la estación, cantidad disponible de bicicletas y espacios para estacionar, hora de actualización del estado de la estación, etc.

Se define el nivel de servicio como una medida binaria de la disponibilidad. Una estación se considera “en servicio” (*a*) si cuenta con al menos una bicicleta disponible y al menos un espacio para estacionar, caso contrario, se considerará “fuera de servicio” (*b*)

Para el indicador de ocupación, se recolectó información de las horas punta o *rush hours*, las cuales se consideran de 7:00 a.m. hasta las 10:00 a.m. y de 5:00 p.m. hasta las 8:00 p.m. Los datos se recolectaron en periodos de 12 horas, 6 horas, 4 horas, 1 hora, 30 minutos y 15 minutos. Los resultados de disponibilidad se visualizan en la tabla 8.

Tabla 8

Indicadores de disponibilidad

	100%	>=95%	>=90%	>=85%	>=80%
Estaciones	0	172	417	660	831
Ratio	0	0.14	0.34	0.539	0.678

Nota. Tomado de Pong et al, 2017

Se puede observar que ninguna de las estaciones observadas llega al 100%, es decir, siempre se podrán encontrar usuarios que no puedan acceder a una bicicleta o, los que ya cuentan con ella, no podrán dejarla en la estación que deseaban ya que no encontraran un espacio en blanco.

Asimismo, nos puede llevar a pensar que en Vélib, existe una demanda insatisfecha.

En la figura 5 se pueden visualizar los resultados de los indicadores de ocupación, los cuales incrementan considerablemente en el periodo de 9:00 a.m. a 8:00 p.m. aproximadamente. Esto se puede comprender como que las estaciones bajo las cuales se llevó a cabo la medición de los indicadores de ocupación son estaciones de llegada, es decir, los usuarios parten de otra estación y luego, cuando llegan al centro de actividad, ya sea trabajo o estudio, la dejan en una de las estaciones estudiadas. Luego, al finalizar la jornada, nuevamente la toman y la dejan en otra estación.

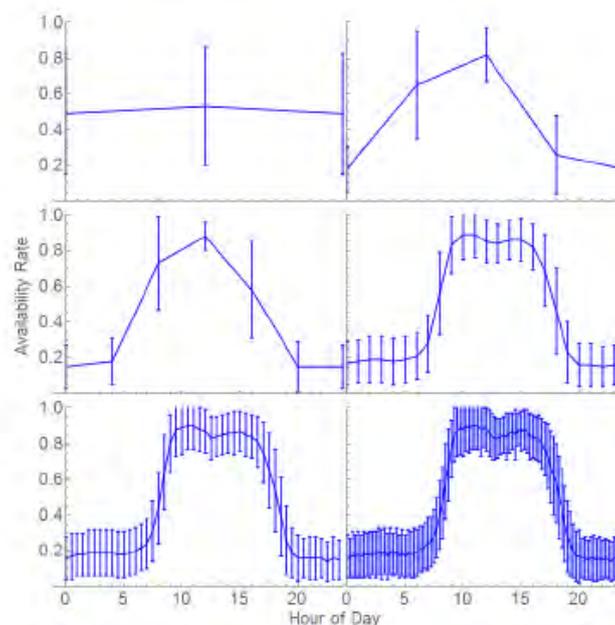


Figura 5. Indicadores de ocupación

Tomado de Feng et al, 2017.

Asimismo, luego de realizar el *clustering* tanto por el método de *k-means* como *hierarchical clustering*, los autores establecieron que el *k* a utilizar sería 4, es decir, la data se podría segmentar en 4 grupos.

Regresamos nuevamente al indicador de disponibilidad con la cantidad de grupos determinados por los autores, los cuales fueron confirmados a través del método del codo, o *Elbow Method*, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la figura 6. Se puede visualizar que existe una estación de salida (curva azul), de llegada (curva verde) y otras dos que se mantienen constantes en proporciones opuestas (curva negra y roja).

La clasificación de los 4 grupos propuesta en base a la localización de las estaciones de llegada de estos es la siguiente:

- Lugares de trabajo (curva verde)
- Lugares de residencia (curva azul)
- Estaciones sobrepobladas (curva negra)
- Estaciones con pobreza de bicicletas (línea roja)

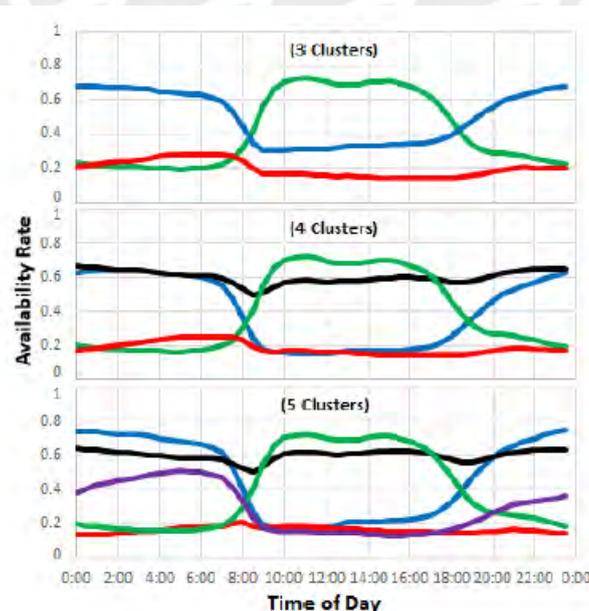


Figura 6. Hora del día vs ratio de disponibilidad

Tomado de Feng et al, 2017.

1.5.3. Greater Helsinki

El estudio de localización o agrupamiento de estaciones para el PUB no solo se realizó en Vélip. Jäppinen, Toivonen & Salonen (2013), analizaron el caso en la ciudad de Helsinki. Este es un caso particular ya que, en Helsinki, los ciudadanos están satisfechos con el sistema de transporte público y en ese entonces, la ciudad no contaba con un sistema de PUB. Los autores se plantean responder a las siguientes preguntas: ¿Un sistema PUB influye en el tiempo de viaje en el transporte público?, y de ser así, ¿En cuánto y que áreas se beneficiarían dentro de la ciudad?, ¿Dónde se ubicaran las principales estaciones de bicicletas? Y ¿Podrán responderse las preguntas previas con información secundaria, principalmente brindada por usuarios del transporte público? Se puede especular que los autores en mención al parecer son un poco ambiciosos en términos de obtener información, no obstante, los resultados pueden llegar a ser válidos, impactando positivamente en el transporte público y, por ende, en la calidad de vida de las personas.

El objeto de estudio fue *Greater Helsinki*, la mayor aglomeración urbana en Finlandia, tanto en términos económicos como en cantidad de habitantes. Si bien es cierto la ciudad se encuentra satisfecha con el sistema de transporte público, la ciudad está pasando por un incremento de autos privados, causando congestión y problemas para encontrar lugares de estacionamiento. Los pasos que se siguieron previos al modelamiento del problema son los siguientes:

- » Se creó una herramienta que convierte las direcciones en lista de coordenadas en el mapa que sirven como inputs para generar las rutas sugeridas
- » Se creó una herramienta que extrae como archivo de texto las rutas sugeridas para el viaje. Además, retorna el tiempo de viaje, distancia y medios que debería seguir para completar el viaje. Ejemplo: caminar hasta el paradero A, tomar el bus B y caminar hasta el destino final.

Esta herramienta se puede comparar con lo que hoy en día conocemos como *Moovit: Your Public Transit Guide*.

» Se utilizó una herramienta para calcular los promedios de las rutas sugeridas. Las rutas sugeridas pueden ser combinaciones de transporte público y sistema compartido de bicicletas, sistema intermodal.

Los destinos que los autores estudiaron fueron 16, los cuales se consideran como puntos de interés o POI, ya que son donde se concentran los siguientes rubros: mayor concentración laboral, lugar de compras, campus universitarios, áreas recreacionales y atractivos turísticos. El detalle de los destinos se puede visualizar en el Anexo 3.

El estudio se realizó el miércoles 23 de noviembre, y se consideró que el tiempo de transferencia es de 3 minutos, la velocidad de caminata es de 70m/min y la velocidad de las bicicletas es de 18km/h. Asimismo, se propusieron tres tipos de ruta.

Modelo basado solo en el uso del transporte público: Los puntos de salida fueron 6 906, y se consideraron como el centro de las zonas habitadas cuyas áreas son de 250m x 250m.

Modelo basado solo en el uso del sistema de bicicletas: En este caso, se configuró la velocidad de caminata a 18km/h, igual que una bicicleta, esto con el fin que el sistema permita el cálculo de rutas en veredas y en parques, ya que no existen ciclovías.

Modelo basado en sistema de transporte público y sistema de bicicletas compartidas: Para modelar el tiempo en este modelo, es necesario primero determinar los puntos en los cuales viajar en bicicleta sea la opción más rápida, es decir, los puntos en los que se recomienda al

usuario bajar el bus o metro para subir a una bicicleta. Estos puntos serán considerados como estaciones más adelante.

El esquema básico para visualizar gráficamente el sistema de bicicletas compartidas propuesto se aprecia en la figura 7.

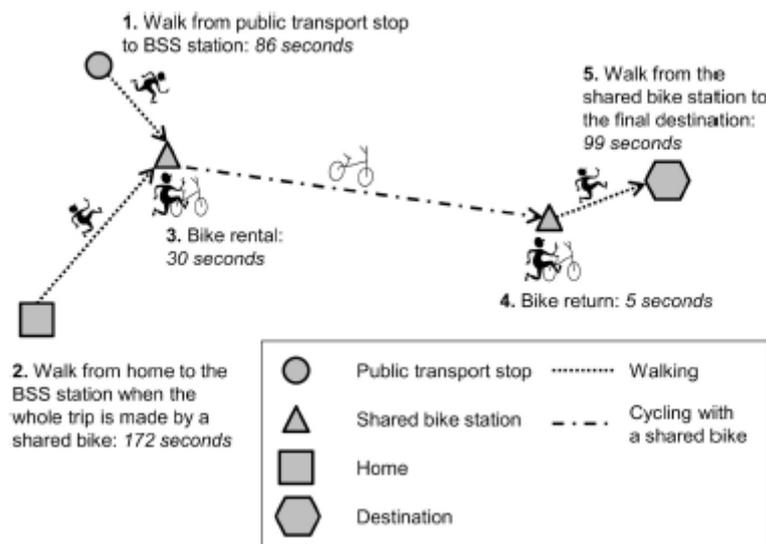


Figura 7. Modelo de bicicletas compartidas

Tomado de Jäppinen et al, 2013.

Se puede observar que, tanto para la renta como para la disposición de bicicletas, se considera un tiempo extra, el cual es denominado “penalidad”. Esto es debido a que la obtención de una bicicleta del sistema no es instantánea.

Los autores realizaron simulaciones para los tres escenarios o las tres rutas sugeridas, cuyos resultados se muestran en la figura 8.

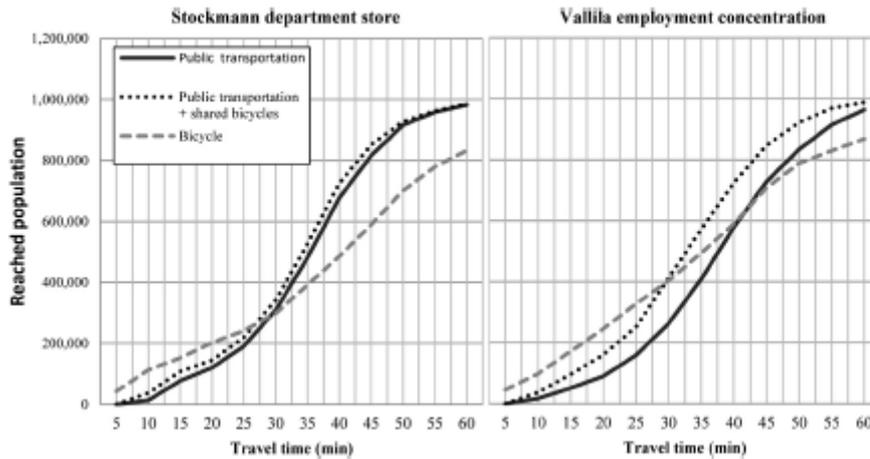


Figura 8. Tiempo de viaje por cada modelo

Tomado de Jäppinen et al, 2013.

Se puede observar que el tiempo de viaje se puede disminuir hasta 10 minutos (en promedio se considerarán 6). Si este ahorro se ve en términos monetarios se estaría ahorrando 0.775 euros por viaje, asumiendo 7.75 euros como valorización por una hora.

Además, gracias a los análisis realizados, se proponen las posibles estaciones para el sistema de bicicletas compartidas, los cuales se encontrarán cerca a los metros o carriles de tren. Asimismo, los viajes en bicicleta serían de 1.5km aproximadamente. No obstante, como se puede visualizar en el anexo 4, los beneficios no son uniformes. El autor concluye que las personas que se beneficiarían más con este sistema son los que se encuentran alejados de los puntos más densos de la ciudad.

Una gran ventaja es que, al combinar el sistema de bicicletas compartida con el transporte público, es que aproximadamente 160 000 personas adicionales se sumarían al sistema, mejorando así la accesibilidad y conectividad. Finalmente, sin quitar el mérito al uso de bicicletas por sí solas, el sistema es competitivo siempre y cuando se realicen viajes cuya duración no pase los 25 minutos.

Cabe resaltar que, en el 2016, con el apoyo de la empresa *Smoove*, se instaló el sistema de bicicletas públicas, el cual cuenta con 2 550 bicicletas, 254 estaciones y más de 3 306 622 kilómetros recorridos, lo cual es un reflejo de la aceptación de la población de *Greater Helsinki* hacia la migración hacia este sistema de transporte integral y sostenible.

1.6. Programación Lineal

En los estudios comentados previamente, se evaluó un sistema o un potencial sistema de bicicletas públicas, los cuales evidenciaron resultados positivos, especialmente en el transporte intermodal. Lin, J. & Yang, T. (2010) formularon un problema matemático cuya solución permite un óptimo diseño de sistema de bicicletas pública, bajo un escenario determinado. La estructura propuesta se muestra en la figura 9, donde las líneas punteadas representan el camino del origen a la estación de bicicleta inicial y de la estación de bicicleta final al destino, y las líneas solidas representan el tramo que se recorre en bicicleta.

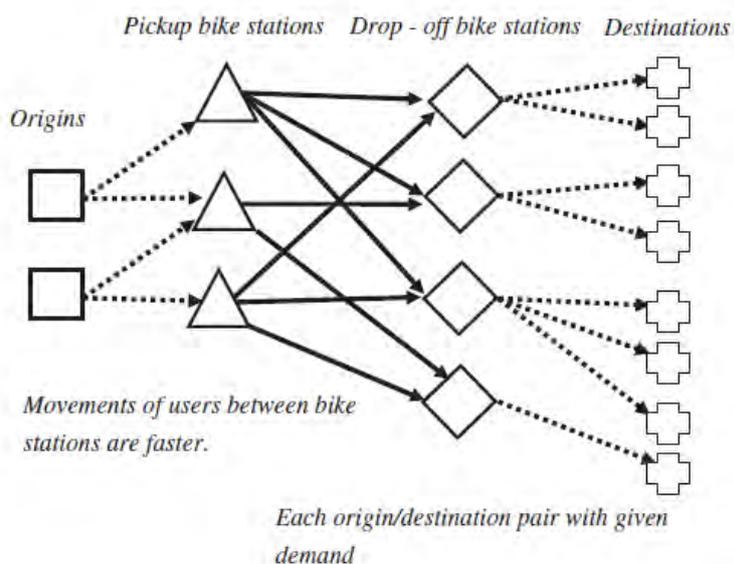


Figura 9. Estructura básica de un sistema de bicicletas públicas

Tomado de Lin, J. & Yang, T. (2010)

En el problema planteado por los autores, se tienen potenciales estaciones iniciales y potenciales estaciones final, y lo que se debe resolver es cuales o cuantas del total se proponen como estaciones reales de bicicleta.

Según Hillier, F. & Lieberman, G. (2010), el desarrollo de la programación lineal ha sido clasificado como uno de los avances científicos más grandes de todos los tiempos. Los autores también comentan: “la aplicación más común el tipo más común de aplicación abarca el problema general de asignar de la mejor manera posible —es decir, de forma óptima— recursos limitados a actividades que compiten entre sí por ellos” (p. 23). Esta definición se aplica al problema donde hay diversos lugares en los cuales se puede colocar las estaciones de bicicleta y no se sabe a priori cuales son los mejores.

La forma estándar de planteamiento del modelo, basado en asignar recursos a actividades puede contar con:

- » Parámetros: Contantes de entrada al modelo
- » Variables de decisión: Variables cuyo valor se desea determinar
- » Objetivo: La meta que necesitamos optimizar (maximizar o minimizar)
- » Restricciones: Lo que la solución debe satisfacer

Estas definiciones fueron tomadas de Hillier, F. & Lieberman, G. (2010) y Taha, H. (2012). Bajo la estructura previamente mencionada, los autores Lin, J. & Yang, T. (2010) formulan mediante un modelo de programación lineal que estaciones se deben inaugurar tal que se minimicen los costos totales de la implementación del sistema de bicicletas compartidas.

1.7. Apreciaciones de la literatura existente

El sistema compartido de bicicletas es un modo de transporte sostenible y verde que es muy útil para conectar a los ciudadanos con las estaciones del transporte público, Además, trae consigo beneficios económicos, sociales y ambientales. Por un lado, en términos de ahorro, se puede economizar tiempo al integrarlo dentro del sistema de transporte público, además, disminuye el mantenimiento de infraestructura dañadas tanto por el uso excesivo de vehículos propios como los gases emitidos por estos últimos. Por otro lado, en el ámbito social, se puede ver como una herramienta que mejora la conectividad y accesibilidad, permitiendo así un transporte equitativo para los ciudadanos, disminuyendo la brecha entre los que cuentan con vehículo propio y los que no, además de dar una mejor imagen a la ciudad. Finalmente, en términos ambientales, se puede concluir que las bicicletas son el modo más eficiente de transporte, en todas las etapas del ciclo de vida. Además, al ser combinados con metros y trenes, disminuye la emisión de CO, producido por la combustión incompleta de vehículos motorizados tales como automóviles y motocicletas. Es importante resaltar que los sistemas de bicicletas compartidas no solo se pueden aplicar en ciudades donde el transporte público no satisfaga toda la demanda, sino también en ciudades donde las personas pueden estar satisfechas con el transporte público, como es el caso de Greater Helsinki. Esto con el fin de mejorar el sistema de transporte existente, más como una medida preventiva frente al aumento de parque vehicular que como una medida correctiva, la cual es el caso de Vélib, Paris.

Finalmente, los sistemas de bicicletas compartidas siguen presentando retos, los cuales varían dependiendo de lugar en el cual se aplicará, los más relevantes (considerado por el autor del presente trabajo de investigación) son:

- » Ubicación de las estaciones de bicicletas en puntos estratégicos de la ciudad

- » Determinación del esquema de precios óptimos tal que la mayor cantidad de personas en la ciudad puedan acceder a él

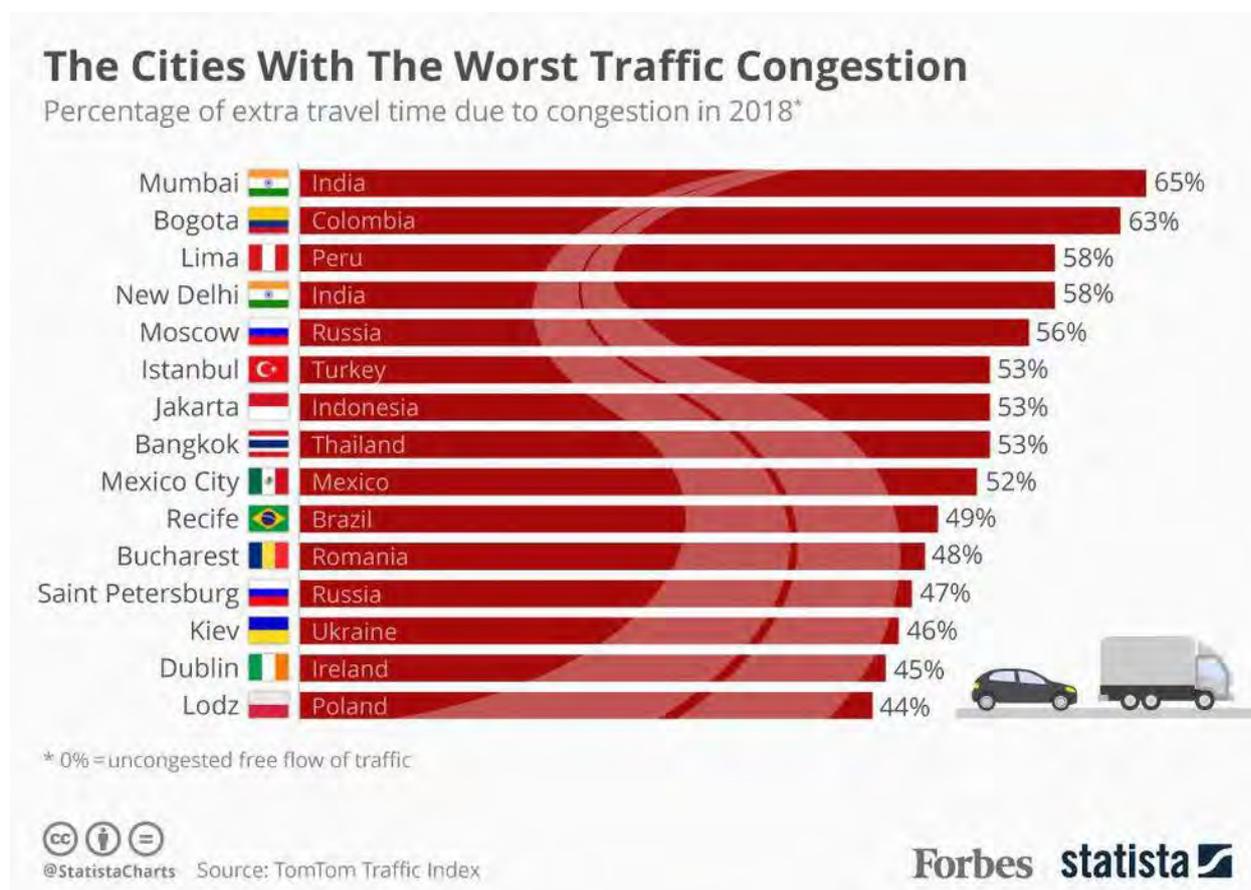
- » Propuesta de medios de transporte con los cuales se conectará la bicicleta, permitiendo un transporte intermodal. En algunas ciudades aún no existe una flota contundente de metros o trenes u otro modo de transporte colectivo, por lo que tal vez implementar un sistema de bicicletas compartidas no sea la mejor opción.

- » Que tipos de bicicletas que se deben implementar en el sistema. Si bien es cierto, en algunas ciudades también se ofrecen las bicicletas eléctricas, no obstante, el ciclo de vida es diferente a comparación de las normales, además, disminuye el poco impacto a la salud que se genera en el usuario.

- » Alternativas de transporte sostenible para las personas que no se encuentren en condiciones de manejar una bicicleta, promoviendo la inclusividad y disminuyendo barreras sociales.

ANEXOS

Anexo 1 The Cities with The Worst Traffic Congestion 2018



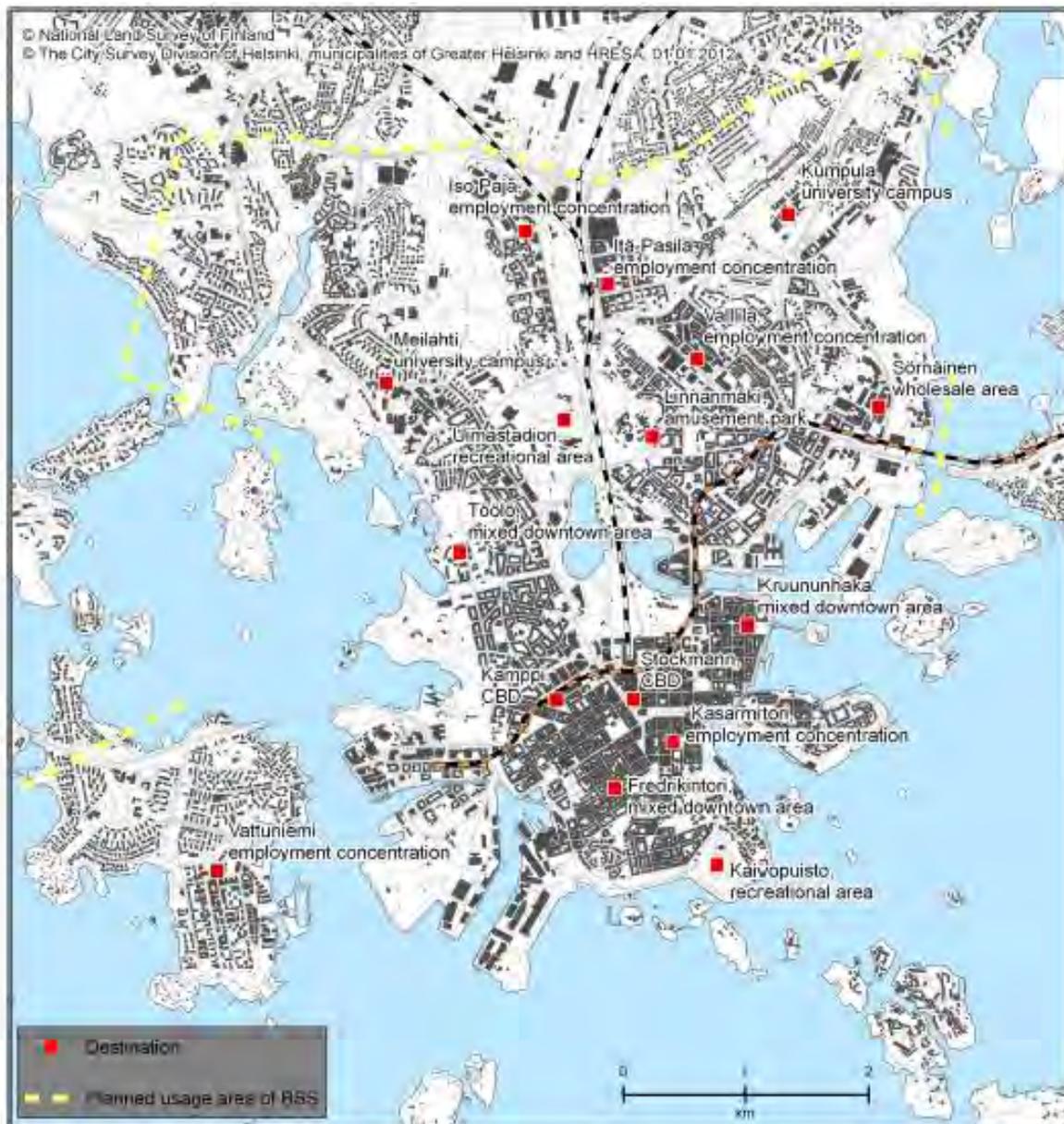
Tomado de *Forbes*, 2019

Anexo 2 Diferencias entre transporte y movilidad

Transporte	Movilidad
Movimiento de vehiculos	Movimiento de personas
Se expresa en números de viajes, desplazamientos y pasajes	Se determina por la posibilidad de relaciones, oportunidades y satisfacción de necesidades
Se determina por la eficacia, rapidez y fluidez de vehiculos	Se determina por la accesibilidad de las personas a lugares y por la satisfacción de sus necesidades de bienes, productos y servicios
El movimiento como medio	El movimiento tiene valor
Las personas son vistas como un grupo heterogéneo que se desplaza	Se hace énfasis en la condición, género y edad de las personas

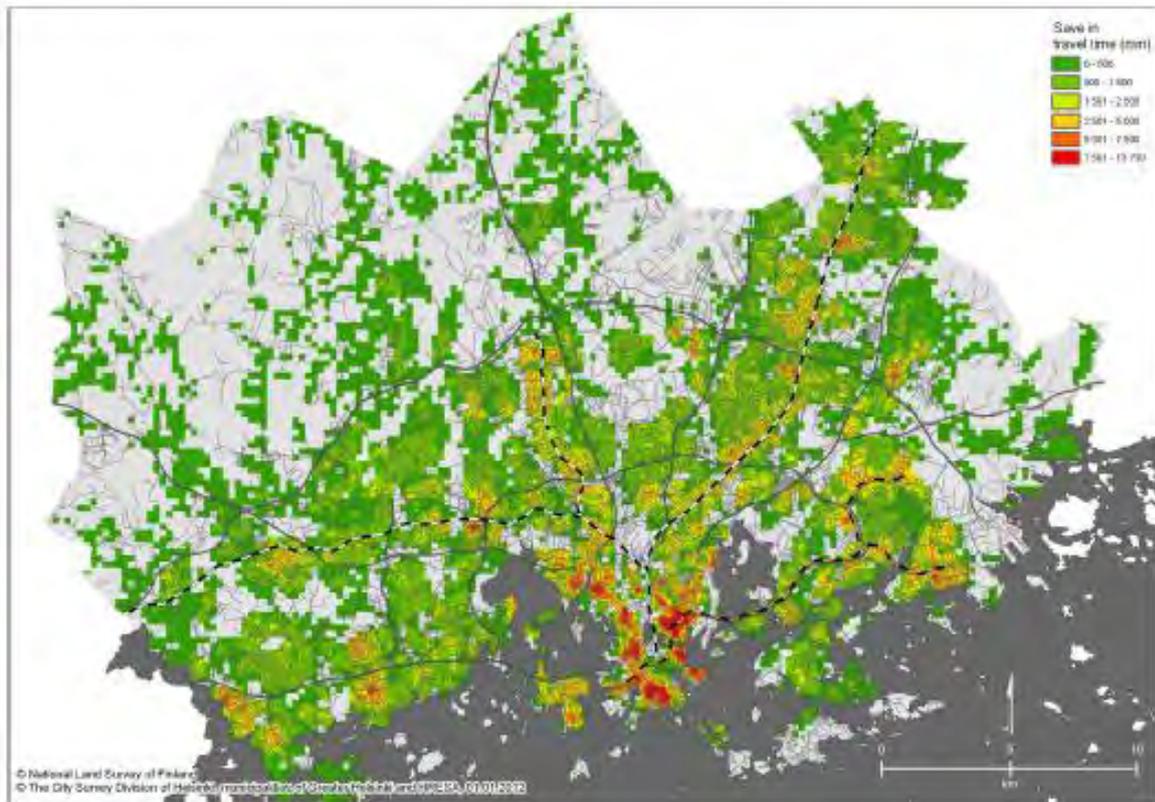
Tomado de Le Galés & Ugalde, 2018

Anexo 3 16 puntos de interés en Greater Helsinki



Tomado de Jäppinen et al, 2013.

Anexo 4 Tiempo ahorrado hacia los puntos de interés en Greater Helsinki



Tomado de Jäppinen et al, 2013.



Bibliografía

- Banco Interamericano de Desarrollo (2013). Guía práctica de estacionamiento y políticas de reducción de congestión en América Latina. 2013. Nueva York, Estados Unidos.
- Dobrzyńska, E., Dobrzyński, M. (2016). Structure and dynamics of a public bike-sharing system. Case study of the public transport system in Białystok. *De Gruyter*, 8 (4), 59-66. doi: 10.1515/emj-2016-0033
- Faghih-Imani, A., Anowar, A., Miller, E., Eluru, N. (2017). Hail a cab or ride a bike? A travel time comparison of taxi and bicycle-sharing systems in New York City.
- Feng, Y., Costa, R., Marc, Z. (2017). Analysis of bike sharing system by clustering: the Vélib Case. *IFAC*.
- Figueroa, E., Martín, P., Sánchez, J. (2015). Aceleración de la urbanización global y movilidad sostenible. *Estudios Regionales en Economía, Población y Desarrollo. Cuadernos de Trabajo de la UACJ*, 29. 3-34.
- Forbes (2019). The world's worst cities for traffic congestion [infographic]. Recuperado de: <https://www.forbes.com/sites/niallmccarthy/2019/06/05/the-worlds-worst-cities-for-traffic-congestion-infographic/#37ad492612bc>. Autor: Niall McCarthy.
- GeoInnova (s/f). En busca de una definición uniforme de «movilidad sostenible». Recuperado de: <https://geoinnova.org/blog-territorio/busca-definicion-uniforme-movilidad-sostenible/>
- Hillier, F., Lieberman, G. (2010). Introducción a la investigación de operaciones. Novena Edición
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Guía metodológica para la implantación de sistemas de bicicletas públicas en España. Noviembre 2007. Madrid, España.
- Jäppinen, S., Toivonen, T., Salonen, M. (2013). Modelling the potential effect of shared bicycles on public transport travel times in Greater Helsinki: an open data approach. *Applied Geography* 43 (2013), 13-24.
- Le Galés, P., Ugalde, V. (2018). *Gobernando la Ciudad de México: Lo que se gobierna y lo que no se gobierna en una gran metrópoli*. El colegio de México AC.
- Lin, J., Yang, T. (2020). Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research Part E*, 47 (2011), 284-294. doi: 10.1016/j.tre.2010.09.004
- Lu, M., Hsu, S., Chen, P., Lee, W. (2018). Improving the sustainability of integrated transportation system with bike-sharing: a spatial agent-based approach. *Sustainable Cities and Society*. doi: doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.023
- Muñoz, J., Batarce, M., Torres, I. (2014). Comparación del nivel de servicio del transporte público de seis ciudades latinoamericanas. *Revista Ingeniería de Transporte*, 18(1). 10-16.

- Quintero, J., Quintero, L. (2015). El transporte sostenible y su papel en el desarrollo del medio ambiente urbano. *Revista Ingeniería y Región*, 14(2), 87-97.
- Quintero-González, J.T. (2017). *Del concepto de ingeniería de tránsito al de movilidad urbana sostenible*. *Ambiente y Desarrollo*, 21(40), 57-72. doi: 0.11144/Javeriana.ayd21-40.citm
- Rivera, M. (2016). Diagnóstico de la política de movilidad sostenible en París y Ciudad de México a partir de la implementación de un sistema de bicicletas públicas y sus alcances para la implementación de un sistema de bicicletas públicas en Bogotá. *Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario*.
- Taha, H. (2012). *Investigación de operaciones*. Novena edición.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (2011). *Bicycle-sharing schemes: enhancing sustainable mobility in urban areas*. Mayo 2011. Nueva York, Estados Unidos. Midgley, Peter.
- Wu, Y., Kang, L., Hsu, Y., Wang, P. (2019). Exploring trip characteristics of bike-sharing system uses: effects of land-use patterns and pricing scheme change. *International Journal of Transportation* 8 (2019), 18–331. doi: doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.05.003
- Zhang, L., Zhang, J., Duan, D., Bryde, D. (2014). Sustainable bike-sharing systems: characteristics and commonalities. *Journal of Cleaner Production*, 1-10.

