UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta para la ubicación de estaciones de bicicletas públicas mediante la metodología de Máxima Cobertura para la reducción de los tiempos de viajes en el distrito de San Borja - Lima

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Gutierrez Nieto, Jesús Juvencio (0000-0003-4202-7255)

Taípe Contreras, Wiler James (0000-0002-3999-2065)

ASESOR

Silvera Lima, Manuel Elias (0000-0002-8265-9495)

Lima, 24 de abril de 2020

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a Dios en primer lugar por brindarme la vida y a mis padres quienes con sus sabios consejos me orientan en el presente en busca de un mañana mejor.

Wiler James Taipe Contreras

*A mis padres, por la semilla de superación que han sembrado en mí,
a mis hermanos por su apoyo emocional y estímulo.*

Jesús Juvencio Gutierrez Nieto

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser el guía durante toda la etapa universitaria.

A nuestro asesor de tesis, el Ing. Manuel Silvera por la orientación y ayuda que nos brindó para la realización de esta tesis.

A Nuestra casa de estudios (UPC) por darnos las herramientas necesarias para lograr nuestro objetivo.

RESUMEN

La preocupación en la actualidad del transporte público nos obliga a fomentar la implementación de medios de transporte sostenibles y saludables. Por este motivo, se propone con esta investigación localizar adecuadamente las estaciones de bicicletas y de esta forma reducir los tiempos de viaje en bicicleta en el distrito de San Borja.

En el primer capítulo formularemos la realidad problemática, formulación del problema de transporte y algunos antecedentes de estudios similares en diferentes países con resultados positivos. También desarrollaremos los objetivos generales, objetivos específicos y las limitaciones de la investigación.

En el segundo capítulo se describirá el marco teórico de la metodología para la localización óptima de estaciones de bicicletas, los modelos de microsimulación y la propuesta de mejora. Asimismo, definiremos los tipos de modelo de tránsito, algunas consideraciones que serán necesarias para realizar los análisis de los resultados que se obtengan.

En el tercer capítulo describiremos la metodología que se utiliza desde la recolección de datos para la metodología de máxima cobertura y el modelo de microsimulación debidamente calibrado y validado. También, se detallará la aplicación de la metodología de máxima cobertura (ArcGIS) y la construcción del modelo de simulación en el software VISSIM.

En el cuarto capítulo se presentan el análisis de las estaciones utilizando el modelo de máxima cobertura, localización de las estaciones optimas, la reducción de viajes del estado actual y el de los escenarios propuestos y por último los resultados de la comparación.

En el último capítulo se encontrarán las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron respondiendo así el objetivo general de la presente tesis.

Palabras clave:

Microsimulación; Bicicleta; Estación; Vissim; Wiedemann; San Borja; Lima; Perú

Proposal for the location of public bicycle stations through the Maximum Coverage
Methodology for the reduction of travel times in the district of San Borja - Lima

ABSTRACT

The current public transport concern forces us to encourage the implementation of sustainable and healthy means of transport. For this reason, it is proposed with this research to properly locate the bicycle stations and thus reduce the travel times by bicycle in the district of San Borja.

In the first chapter we will formulate the problematic reality, formulation of the transport problem and some background of similar studies in different countries with positive results. We will also develop the general objectives, specific objectives and limitations of the investigation.

In the second chapter, the theoretical framework of the methodology for the optimal location of bicycle stations, microsimulation models and the proposal for improvement will be described. Likewise, we will define the types of traffic model, some considerations that will be necessary to perform the analysis of the results obtained.

In the third chapter we will describe the methodology used since the data collection for the maximum coverage methodology and the microsimulation model duly calibrated and validated. Also, the application of the maximum coverage methodology (ArcGIS) and the construction of the simulation model in the VISSIM software will be detailed.

In the fourth chapter the analysis of the stations is presented using the maximum coverage model, location of the optimal stations, the reduction of trips of the current state and that of the proposed scenarios and finally the results of the comparison.

In the last chapter you will find the conclusions and recommendations that were reached in response to the general objective of this thesis.

Keywords:

Microsimulation; Bicycle; Station; Vissim; Wiedemann; San Borja; Lima; Perú

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ABSTRACT	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA DE CONTENIDOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ÍNDICE DE TABLAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ÍNDICE DE FIGURAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ÍNDICE DE ECUACIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1. ASPECTOS GENERALES	1
1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 HIPOTESIS.....	4
1.5 OBJETIVOS.....	4
1.5.1 Objetivos genetales.....	4
1.5.2 Objetivos específicos	4
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 TIPOS DE RED DE CICLOVÍAS	5
2.1.1 Vías segregadas	5
2.1.2 Vías no segregadas	¡Error! Marcador no definido.
2.2 LA RED DE CICLOVÍAS.....	10
2.3 ANÁLISIS DE LA DEMANDA POTENCIAL.....	11
2.3.1 Demanda Potencial: generación de viajes	11
2.3.2 Demanda Potencial: atracción de viajes	12
2.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES PROPUESTAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.5 ASIGNACIÓN DE PENDIENTES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.6 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	16
2.7 MODELO DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.7.1 Mínima Impedancia	¡Error! Marcador no definido.

2.7.2	Máxima Cobertura	¡Error! Marcador no definido.
2.8	MICROSIMULACIÓN	19
2.8.1	Modelación del tráfico	20
2.9	MODELOS DE SEGUIMIENTO VEHICULAR.....	23
2.9.1	Modelo de Gipps	¡Error! Marcador no definido.
2.9.2	Modelo de la General Motors	26
2.9.3	Modelo de Wiedemann.....	29
2.10	FUNDAMENTOS DE MICROSIMULACIÓN.....	31
2.10.1	Carácter estocastico	31
2.10.2	Warm Up	31
2.10.3	Número de semilla.....	32
2.10.4	Número de corridas	33
2.10.5	Calibración	34
2.10.6	Validación.....	34
2.10.7	Prueba estadística para calibración y validación del modelo	35
3.	METODOLOGÍA.....	36
3.1	MÁXIMA COBERTURA	36
3.2	DATOS DE PARTIDA MÁXIMA COBERTURA	37
3.3	INGRESO DATOS MÁXIMA COBERTURA.....	40
3.4	MICROSIMULACIÓN VISSIM 9	45
3.5	RECOLECCIÓN DE DATOS MICROSIMULACIÓN	45
3.5.1	Ubicación.....	46
3.5.2	Aforo de ciclistas	47
3.5.3	Tiempo de viaje	48
3.5.4	Tiempo de semáforos.....	51
3.5.5	Características de las ciclovías	53
3.6	INGRESO DATOS DE LA MICROSIMULACIÓN.....	54
3.6.1	Construcción de la red vial	54
3.6.2	Determinación del tipo y clase vehicular	55
3.6.3	Ingreso de ruta	56
3.6.4	Ingreso de los planes de tiempos semafóricos	57
3.6.5	Ingreso de velocidades.....	58

3.6.6	Ingreso de volumen ciclista	58
3.6.7	Warm up	59
3.6.8	Número de corridas	60
3.6.9	Parámetros de evaluación	60
3.7	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE VISSIM.....	61
3.7.1	Calibración Wiedemann 74	61
3.7.2	Validación.....	63
4.	RESULTADOS	65
4.1	ANÁLISIS DE ESTACIONES UTILIZANDO EL MODELO DE MÁXIMA COBERTURA.....	65
4.2	LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES ÓPTIMAS	71
4.3	REDUCCIÓN TIEMPOS DE VIAJE	74
4.3.1	Estación actual.....	74
4.3.2	Escenario propuesto.....	75
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1	CONCLUSIONES	76
5.2	RECOMENDACIONES	77
6.	REFERENCIAS	78
ANEXOS		¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Velocidad de diseño en función de la pendiente del recorrido	1
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 2: Valor de la pendiente de las ciclovías en función de su longitud	
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3: Indicador estadístico (GEH)	5
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 4: Población por sectores y subsectores	38
Tabla 5: Aforos de Ciclistas	48
Tabla 6: Medicion de tiempo	
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 7: Tiempo de semáforos	
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 8: Número mínimo de corridas	60
Tabla 9: Parámetros de evaluación	60
Tabla 10: Tiempo de viaje en segundos software Vissim	..
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 11: Comparación de resultados durante validación	...
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 12: Resultados Máxima Cobertura 10 estaciones	
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 13: Resultados Máxima Cobertura 20 estaciones	67
Tabla 14: Resultados Máxima Cobertura 30 estaciones	68
Tabla 15: Resultados Máxima Cobertura 40 estacione	69
Tabla 16: Resultados Máxima Cobertura 50 estacione	70
Tabla 17: Resultados Máxima cobertura	70
Tabla 18: Nombre de las 30 estaciones	72
Tabla 19: Resultados simulación escenario actual	
¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 20: Resultaados simulación escenario propuesto	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Infraestructura vial para bicicletas	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2: Vía segregada San Borja	6
Figura 3: Ciclosenda bidireccional en corredor verde	7
Figura 4: Vía no segregada San Borja	8
Figura 5: Ciclocarril en la Av. La Paz – Miraflores	9
Figura 6: Zona 30 en la ciudad de Lima	¡Error! Marcador no definido.
Figura 7: Distribución de encuestados de acuerdo a sus motivos de viaje	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 8: Centro comercial La Rambla	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9: Diseño estratégico sistema público	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10: Cálculo pendiente ascendentes y descendentes	16
Figura 11: Flujograma máxima cobertura	19
Figura 12: Modelos de tráfico	20
Figura 13: Principales estrategias de simulación del tráfico	23
Figura 14: Representación gráfica del modelo de Gipps.....	24
Figura 15: Representación modelo de seguimiento de la General Motors	¡Error!
Marcador no definido.	26
Figura 16: Representación modelo de seguimiento Wiedemann 74	29
Figura 17: Periodo de estabilización	32
Figura 18: Flujograma Máxima Cobertura	36
Figura 19: Sectorización del distrito de San Borja	37
Figura 20: Estaciones del programa San Borja en Bici	39
Figura 21: División del distrito en sectores y subsectores	40
Figura 22: Nombre de las calles distrito de San Borja.....	41
Figura 23: Sectores con los respectivos nodos en San Borja	42
Figura 24: Cantidad de población por cada sector en el distrito de San Borja.....	43
Figura 25: Punta de actividad económica sector 6.....	44
Figura 26: Punta de actividad económica sector 10.....	44
Figura 27: Flujograma Microsimulación Vissim	45

Figura 28: Área de estudio.....	46
Figura 29: Conteo de ciclistas	47
Figura 30: Espacio delimitacion 17 metros	48
Figura 31: Espacio delimitacion 17 metros	49
Figura 32: Tiempo de vije en 17 metros.....	49
Figura 33: Fase 1 Ciclo semafórico	¡Error! Marcador no definido.
Figura 34: Fase 2 Ciclo semafórico	¡Error! Marcador no definido.
Figura 35: Ciclo semafórico	52
Figura 36: Características de las ciclovías	¡Error! Marcador no definido.
Figura 37: Tipo de Ciclovía segregada	53
Figura 38: Tipo de Ciclovía no segregada	¡Error! Marcador no definido.
Figura 39: Construcción de la red vial VISSIM 9.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 40: Tipología y clase vehicular considerada VISSIM 9.....	55
Figura 41: Ajustes de las características operacionales de los vehiculos	56
Figura 42: Asignación de rutas con sus respectivos volúmenes vehiculares	57
Figura 43: Ciclo semafórico VISSIM 9	57
Figura 44: Ingreso de velocidades VISSIM 9	58
Figura 45: Ingreso de Volumen de ciclista VISSIM 9	59
Figura 46: Warm Up VISSIM 9	59
Figura 47: Valores por defecto del software Vissim	61
Figura 48: Proceso de calibración	62
Figura 48: Proceso de Validación	63
Figura 50: Máxima cobertura 10 estaciones	¡Error! Marcador no definido.
Figura 51: Máxima cobertura 20 estaciones	¡Error! Marcador no definido.6
Figura 52: Máxima cobertura 30 estaciones	67
Figura 53: Máxima cobertura 40 estaciones.....	68
Figura 54: Máxima cobertura 50 estaciones.....	69
Figura 55: Estaciones óptimas San Borja - Lima	71
Figura 56: Estacion Jr. 2	¡Error! Marcador no definido.
Figura 57: Estacion Jean Luis Forain	¡Error! Marcador no definido.
Figura 58: Escenario actual	¡Error! Marcador no definido.
Figura 59: Escenario propuesto	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Bases generadoras.....	14
Ecuación 2: Bases mixtas	15
Ecuación 3: Bases atractoras.....	15
Ecuación 4: Bases muy atractoras	15
Ecuación 5: Asignación de pendiente	16
Ecuación 6: Modelo de Gipps.....	25
Ecuación 7: Modelo de Gipss	25
Ecuación 8: Modelo de Gipss	25
Ecuación 9: Modelo de la General Motors	27
Ecuación 10: Modelo de la General Motors	27
Ecuación 11: Modelo de la General Motors	27
Ecuación 12: Modelo de la General Motors	27
Ecuación 13: Modelo de la General Motors	28
Ecuación 14: Modelo de la General Motors	28
Ecuación 15: Modelo de la General Motors	28
Ecuación 16: Modelo de la General Motors	28
Ecuación 17: Modelo de Wiedemann 74	30
Ecuación 18: Modelo de Wiedemann 74	30
Ecuación 19: Modelo de Wiedemann 74.....	30
Ecuación 20: Modelo de Wiedemann 74	30
Ecuación 21: Modelo de Wiedemann 74	30
Ecuación 22: Modelo de Wiedemann 74.....	30
Ecuación 23: Modelo de Wiedemann 74	31
Ecuación 24: Modelo de Wiedemann 74	31
Ecuación 25: Número de corridas	33
Ecuación 26: Número de corridas mínimas	34
Ecuación 27: Validación.....	35

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. Realidad problemática

En la actualidad, se sigue usando el transporte motorizado como primera alternativa de transporte, sin embargo, hoy en día las calles han colapsado debido al gran número de vehículos públicos y privados. El Principal problema a nivel mundial radica en el crecimiento de la demanda del mercado automotor contra la sub-oferta de la infraestructura; en los últimos años la red vial creció únicamente 2,7% mientras que la cantidad de carros se incrementó en un 91%.¹ Por ese motivo, desde la Comisión Europea se trabajó en la implementación de medios de transporte de escasas o nulas emisiones atmosféricas, es en este punto que entra en juego el uso de la bicicleta como medio de transporte.²

El uso de las bicicletas como medio de transporte se asocia principalmente a Los Países Bajos y Dinamarca, no obstante, se usa en gran medida en varias ciudades de Europa. La bicicleta como medio de transporte tiene sus inicios en Amsterdam, en donde se dio el primer paso e introdujo cambios significativos como la disminución de espacio de los carriles para vehículos motorizados, así como la ampliación de los carriles para bicicletas. En la actualidad, los viajes en bicicleta representan el 32%. Mientras que en transporte privado y público son de 22% y 16% respectivamente.³ Asimismo, Copenhague adoptó y mejoró las medidas tomadas en Amsterdam, por lo que hoy los resultados saltan a la vista, pues los viajes en bicicleta ascienden al 62% y solo el 9% se realiza en transporte privado.⁴

La ciudad de Ferrara en Italia cuenta con 132 000 habitantes y 100 000 bicicletas, más del 30% de los desplazamientos al colegio o al trabajo se efectúan en bicicleta.⁵ Sin embargo esta ciudad no deja de realizar esfuerzos para mantener, e incluso aumentar, el uso de la bicicleta y reducir el del coche. Ferrara desarrolla progresivamente la red para bicicletas en los grandes ejes de circulación, aumenta y mejora los estacionamientos de las bicicletas.

En Lima, la congestión vehicular empeora cada día y las autoridades no plantean una solución integral, a medida que la economía ha ido creciendo, un mayor número de personas

¹ Cfr. Cortés 2013: 4

² Cfr. Latorre 2012: 9

³ Cfr. Miranda 2017: 31

⁴ Cfr. Miranda 2017: 31

⁵ Cfr. CE 2012: 28

cuenta con auto propio.⁶ El parque automotor ha crecido, ya que los autos nuevos no han sustituido a los antiguos, todo por el contrario se sumaron a estos. A pesar de esto, las vías siguen teniendo las mismas dimensiones y capacidades que hace 50 años.⁷

Actualmente, las diferentes municipalidades de Lima como: San Borja, San Isidro, Miraflores y Santiago de Surco, están incentivando el traslado en bicicleta colocando bicicletas públicas, promoviendo el día sin auto, implementando ciclovías, entre otros. Por este motivo se instaló en el distrito de San Borja estaciones para el alquiler de bicicletas públicas, sin embargo, se hizo de forma empírica, ya que no se utilizó ningún tipo de metodología para conocer la localización de las bases.

El éxito de este nuevo medio de transporte radica en la localización óptima de las estaciones. El programa “San Borja en Bici” solo cuenta con 10 estaciones de bicicletas en todo el distrito esto hace que el tiempo de viaje de los usuarios desde su punto de origen al punto de destino se vea incrementado por la falta de estaciones y por la localización de estas. Ante este problema entra como prioridad conocer la localización óptima de las estaciones de bicicletas públicas para reducir los tiempos de viajes.

1.2. Formulación del Problema

¿Es posible reducir los tiempos de viaje en bicicleta mediante la localización óptima de las estaciones de bicicletas públicas en el distrito de San Borja utilizando la metodología de máxima cobertura?

1.3. Justificación

A nivel de la región, Lima es una de las ciudades que menor índice de desplazamientos en bicicleta tiene y si se toma en cuenta la infraestructura vial para ciclistas está muy por debajo de capitales como Bogotá y Santiago.⁸ En general, en las principales ciudades de Latinoamérica se viene implementando políticas destinadas al uso de la bicicleta como medio de transporte inclusivo, equitativo y sostenible, sin embargo, en el caso especificado

⁶ Cfr. Reghellin 2018: 3

⁷ Cfr. Reghellin 2018: 3

⁸ Cfr. BID 2016: 25

de Lima, vista las estadísticas e indicadores que se pueden observar en la figura 1, el desarrollo es menor al que se espera en una ciudad grande en territorio y población.

Figura 1: Infraestructura vial para bicicletas

Fuente: Cyclehoop (2016)

Los Sistemas de Bicicletas Públicas, por ser un producto de carácter novedoso y de gran impacto social traen consigo una imagen positiva al distrito de San Borja. Entre otros valores agregados genera desarrollo e integración social, contribuye con la calidad de vida y salud de la población.⁹ Es un sistema de bajo costo para la municipalidad de San Borja, a comparación de otros proyectos tradicionales de movilidad, por su eficiencia en el manejo racional de los recursos. La incorporación de este transporte urbano sostenible refleja algunos beneficios importantes como:

- Reducir congestión y contaminación
- Mejorar la calidad del aire
- Mejorar la salud de los usuarios
- Conectar directamente con los puntos de atracción

⁹ Cfr. Latorre 2012: 5

1.4. Hipótesis

La localización óptima de las estaciones de bicicletas públicas en el distrito de San Borja utilizando la metodología de máxima cobertura nos permite reducir en 10% los tiempos de viaje en bicicleta

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar el modelo de máxima cobertura para reducir los tiempos de viaje de los ciclistas en el distrito de San Borja a través de la localización óptima de estaciones de bicicletas públicas.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Analizar la información cartográfica y estadística actual de población por cada uno de los sectores y subsectores del distrito de San Borja – Lima.
- Identificar los puntos potenciales de demanda para la localización óptima de las estaciones de bicicletas públicas mediante el uso del modelo de máxima cobertura en el distrito de San Borja.
- Realizar la validación de la reducción de los tiempos de viaje mediante el programa de microsimulación PTV Vissim.

1.6. Limitaciones de la Investigación

El estudio se realiza en el programa San Borja En Bici, implementado en el distrito de San Borja, utilizando las estaciones de bicicletas existentes como referencia para la propuesta a realizar. Asimismo, para la microsimulación el estudio considera un solo modelo de ciclista, no se consideran en el proyecto modos motorizados o bicicletas de carga. Por otro lado, si bien se recolecta los datos por tipo de usuario, es decir, entre mujeres, varones y adultos; para la simulación no se hace distinción por diferente edad o diferente género. Finalmente, el proyecto analiza comportamientos en condiciones estándar, sin estrechamiento de carril y sin interacción con otro tipo de modo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tipos de red de ciclovías

Las vías para ciclistas se pueden clasificar de acuerdo a la posición que tienen respecto a las vías motorizadas, de modo que pueden estar ubicadas al centro de la calzada o a los lados de la misma.¹⁰ Asimismo, se clasifican en segregadas y no segregadas en función a la separación que tienen con el tránsito motorizado.¹¹

De acuerdo a cada tipología, se estudian las posibilidades de maniobra frente a las intersecciones con vías motorizadas que se presenten y las características técnicas que deben tener para la seguridad del ciclista.

2.1.1. Vías segregadas

Las vías segregadas para bicicletas se construyen debido a que las velocidades y volúmenes de los vehículos en la vía motorizada son muy elevados para la seguridad de los ciclistas. Se prefiere construir las vías segregadas en donde las velocidades superan los 40 km/h.¹²

Estas vías, las cuales suelen cubrir grandes distancias y conectan distintos sectores de la ciudad, corresponden a espacios asignados exclusivamente para las bicicletas. Además, pueden estar integradas a la calzada en el separador central o lateral, o a la vereda¹³

i) Vías integradas a la calzada

Cuando una vía para ciclistas se encuentra en el separador central o en los separadores laterales de una vía motorizada, se le conoce como ciclovía. Es por este tipo de vía que los ciclistas transitan de forma independiente a los peatones y automóviles.¹⁴

¹⁰ Cfr. BiciRED 2005: 22

¹¹ Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 11

¹² Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 13

¹³ Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 13

¹⁴ Cfr. Dextre y Avellaneda 2014: 25

Las ciclovías son de dos tipos, si lo hacen en ambos sentidos, se trata de una ciclovía bidireccional, mientras que, si el tránsito es en un solo sentido, lo clasificamos como ciclovía unidireccional.¹⁵

Las ciclovías bidireccionales son más efectivas si la integramos con avenidas por medio del separador central, en el cual son necesarios los desplazamientos en ambos sentidos y puedan permitir el paso de un lado al otro de la vía.¹⁶ En la Figura 2, la cual es una vía segregada bidireccional correspondiente al programa San Borja en Bici implementado por la Municipalidad de San Borja.

Figura 2: Vía segregada San Borja

Fuente: Google Maps (2019)

ii) Vías integradas a la vereda

El integrar la vía ciclista y una vereda, se conoce como cicloacera. Al implementarla, se tiene que considerar que los ciclistas convivirán con los peatones, donde ambos usuarios tendrán que circular de forma segura y cómoda. Ello se logra teniendo vías anchas, pendientes inferiores a 8% y una señalización adecuada que evite conflictos en las intersecciones.¹⁷

¹⁵ Cfr. Quispe 2016: 8

¹⁶ Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 13

¹⁷ Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 14

Asimismo, existen las llamadas ciclosendas, las cuales se pueden encontrar integradas a alamedas, corredores verdes o parques lineales. También son compartidas estas vías con peatones, permitiendo una mayor continuidad y recorridos más cortos, brindando una infraestructura más atractiva en términos paisajísticos.¹⁸ Un ejemplo puede apreciarse en la Figura 3.

Figura 3: Ciclosenda bidireccional en corredor verde

Fuente: Jibaja (2018)

2.1.2. Vías no segregadas

Este tipo de vías para bicicletas es conocido también como compartidas, debido a que los ciclistas conviven con los conductores de vehículos en un entorno donde la velocidad de tránsito motorizado es baja, no más de 30 km/h.¹⁹

En la Figura 4, se observa una intersección perteneciente al programa San Borja en Bici implementado por la Municipalidad de Lima, la cual es un punto de encuentro entre usuarios de distinto modo de transporte, por un lado se tiene a los vehículos motorizados de transporte público o privado y por el otro la ciclovía utilizada por los usuarios de bicicletas.

¹⁸ Cfr. Jibaja 2018: 12

¹⁹ Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 13

Figura 4: Vía no segregada San Borja

Fuente: Google Maps (2019)

i) Ciclocarril

Los ciclocarriles o carriles de bicicleta son franjas que van delimitadas a la calzada y que ocupan espacio de un carril de circulación en sentido unidireccional. Si bien es una vía destinada al tránsito de usuarios ciclistas, los automóviles pueden circular con el fin de evitar algún obstáculo en la vía motorizada o ingresar o salir de estacionamiento.²⁰

Contar con este tipo de carriles permite que las unidades vehiculares reduzcan su velocidad y el tránsito sea más seguro para los ciclistas. Este tipo de vía se encuentra adyacente a la calzada por donde se trasladan los vehículos motorizados, es importante la señalización y la pintura del pavimento. Usualmente, en algunas ciudades como la nuestra se usa el color rojo para que resalte con el color del pavimento flexible mejorando la visibilidad de los ciclistas.²¹ Un ejemplo puede apreciarse en la Figura 5.

²⁰ Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 14

²¹ Cfr. Municipalidad de Lima 2017: 14

Figura 5: Ciclocarril en la Av. La Paz - Miraflores

Fuente: Google Maps (2019)

ii) Carril compartido

Esta vía no segregada, es utilizada tanto por ciclistas como por los conductores de vehículos motorizados, siendo estos últimos que deben respetar a los ciclistas que se trasladan frente a ellos, yendo a su velocidad sin intentar sobrepasarlos.²² En zonas de vías compartidas, la velocidad máxima a la que deben ir los automóviles es de 30 km/h, por lo cual se les suele llamar zonas 30.²³

La señalización horizontal y vertical también es fundamental en este tipo de vía para garantizar velocidades seguras de los vehículos motorizados y condiciones tranquilas para usuarios como ciclistas y peatones.²⁴ Un ejemplo de Zona 30 se puede apreciarse en la Figura 6.

²² Cfr. Jibaja 2018: 14

²³ Cfr. Jibaja 2018: 14

²⁴ Cfr. Quispe 2016: 9

Figura 6: Zona 30 en la ciudad de Lima

Fuente: Jibaja (2018)

2.2. La red de ciclovías

La circulación en bicicleta se va a simular sobre la red de Ciclovías del programa San Borja en Bici de la Municipalidad de San Borja. Previamente a la creación de la red es necesario comprobar que las ciclovías no tengan errores de continuidad. Una vez comprobado que las ciclovías estén conectadas entre sí, se establece que todas las calles son transitables tanto a pie como en bicicleta y se permite cualquier tipo de giro, lo que se corresponde con la realidad peatonal y ciclista del área de estudio.²⁵

La modelización de la red con el objeto de simular la movilidad peatonal y en bicicleta, pasa por conocer las pendientes para poder aplicar velocidades de circulación en bicicleta en función del tipo de pendiente, ya que según el Manual de Diseño para Infraestructura de Ciclovías de Lima Metropolitana y Callao considera que la pendiente influye en la velocidad como se aprecia en la Tabla 1, donde a mayor pendiente longitudinal aumenta la velocidad.²⁶

²⁵ Cfr. Latorre 2012: 20

²⁶ Cfr. Muñoz 2012: 48

Tabla 1: Velocidad de diseño en función de la pendiente del recorrido

Fuente: BICIRED (2011)

Pendiente (%)	Longitud (m)		
	25 a 75	75 a 150	> 150
3 a 5	35 km/h	40 km/h	45 km/h
6 a 8	40 km/h	50 km/h	55 km/h
9	45 km/h	55 km/h	60 km/h

En el caso de San Borja no existen pendientes muy pronunciadas, se podría decir que la pendiente es casi cero, esta norma considera como 30 km/h la velocidad promedio de diseño en terrenos planos.²⁷

2.3. Análisis de la demanda potencial

La localización de los diferentes puntos de demanda es fundamental para la localización óptima de las estaciones de bicicletas. Por tanto, es necesario conocer la localización de la población (generación de viajes) y de actividades (atracción de viajes) del área de estudio para poder establecer de manera óptima las estaciones de alquiler de bicicletas en el distrito de San Borja.²⁸

2.3.1. Demanda Potencial: generación de viajes

Se consideran viajes generados aquellos producidos por la población residentes de los domicilios o áreas residenciales hacia los centros de atracción.²⁹ En el Figura 7, se observa los resultados en donde el mayor porcentaje de personas se trasladan por motivos de trabajo o estudio.

²⁷ Cfr. Caverio 2015: 32

²⁸ Cfr. Latorre 2012: 15

²⁹ Cfr. Latorre 2012: 15

Figura 7: Distribución de la cantidad de encuestados de acuerdo a sus motivos de viaje

Fuente: Caveró (2015)

2.3.2. Demanda Potencial: atracción de viajes

Los viajes atraídos son aquellos producidos por los desplazamientos hacia/desde los centros de actividad económica. La zona en estudio cuenta con diferentes focos de atracción desde centros comerciales, parques, colegios y supermercados, tales como:

- La Biblioteca Nacional del Perú
- Teatro y Museo Nacional
- El Coliseo Eduardo Dibós Dammert
- Centro Comercial Real Plaza Primavera
- Centro Comercial La Rambla

En la Figura 8, se observa uno de los principales centros de atracción de viajes

Figura 8: Centro Comercial La Rambla

Fuente: Skyscrapercity (2016)

2.4. Características de las estaciones propuestas

Las estaciones seleccionadas tienen diferente localización en función de los escenarios planteados. Esta localización atribuye a cada estación características de atractoras, generadoras o mixtas en función de si la demanda potencial de cada una de ellas proviene de la población residente, o bien de zonas de importante actividad económica o comercial.³⁰ En la Figura 9, se puede observar el diseño estratégico desde una estación generadora (Origen) hacia una estación atractora (Destino).

³⁰ Cfr. Latorre 2012: 35

Figura 9: Diseño estratégico sistema público

Fuente: Yang Lin (2011)

Esta caracterización permite conocer las características de las estaciones para así poder variar el número de bicicletas o puntos de anclaje libres en cada una de ellas en función de si se trata de estaciones generadoras o atractoras. Esto es importante pues permite planificar los sistemas de redistribución de bicicletas, una de las claves en el éxito de estos programas.

A partir de los datos de demanda potencial se van a diferenciar cuatro tipos de bases:

- **Bases generadoras:** La mayor parte de los viajes que tienen lugar en estas estaciones están generados por la población residente, por lo tanto las bases tienen que tener un elevado número de bicicletas en la hora punta de la mañana y un elevado número de puntos libres de anclaje en la hora punta de la tarde.³¹ Cabe esperar que estas bases se encuentren en zonas eminentemente residenciales.

$$\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total de viajes}} < 40\% \quad (\text{Ecuación 1})$$

³¹ Cfr. Latorre 2012: 35

- **Bases mixtas:** Estas bases se encuentran en zonas donde hay una fuerte diversidad de usos, por lo que la demanda potencial se debe tanto a viajes atraídos como a viajes generados.³² Las bases se retroalimentan de bicicletas a lo largo del día debido precisamente a esta diversidad de usos.

$$40\% < \frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total de viajes}} < 60\% \quad (\text{Ecuación 2})$$

- **Bases atractoras:** Estas bases se encuentran en zonas comerciales o empresariales donde finalizan muchos viajes, de manera que en hora punta de la mañana tiene que haber más puntos de anclaje libres que ocupados, mientras que en hora punta de la tarde tiene que haber más puntos de anclaje ocupados que libres.³³

$$60\% < \frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total de viajes}} < 80\% \quad (\text{Ecuación 3})$$

- **Bases muy atractoras:** Estas bases se encuentran en entornos empresariales o comerciales, por lo que sus características de ocupación son las mismas que las de las bases Atractoras.³⁴

$$\frac{\text{Viajes atraídos}}{\text{Total de viajes}} > 80\% \quad (\text{Ecuación 4})$$

2.5. Asignación de pendientes

Para el correcto análisis de la red es necesario conocer el valor de la pendiente, para ello, se debe obtener el signo de la pendiente, lo que permite diferenciar las pendientes ascendentes las cuales tienen un signo positivo de las pendientes descendentes que tienen un signo negativo.³⁵ Los valores de pendientes se van a obtener a partir del cálculo de la siguiente ecuación:

³² Cfr. Latorre 2012: 35

³³ Cfr. Latorre 2012: 35

³⁴ Cfr. Latorre 2012: 35

³⁵ Cfr. Latorre 2012: 13

$$p[\%] = \frac{\Delta y[m]}{x[m]} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

“x” es la distancia entre los dos puntos medida en metros sobre el plano

“Δy” es la diferencia de cotas medida en metros

En la Figura 10, se puede observar cómo se realiza el cálculo de las pendientes tanto ascendentes como descendentes.

Figura 10: Cálculo pendientes ascendentes y descendentes

Fuente: Latorre (2012)

2.6. Modelo digital de elevaciones

En primer lugar, se procede a elaborar el modelo digital de elevaciones, para conocer el valor de las pendientes. La presencia de estas pendientes implica, un sobresfuerzo en subida, y un aumento de la velocidad en bajada a la hora de circular en bicicleta, sin embargo, como se mencionó anteriormente en el caso del distrito de San Borja es prácticamente plano.³⁶ En la Tabla 2, establecido por REDEVU (Manual de Vialidad Urbana del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile), muestra los valores de las pendientes en función a la diferencia de cotas y a la longitud de subida.

³⁶ Cfr. Latorre 2012: 21

Tabla 2: Valor de la pendiente de las ciclovías en función de su longitud

Fuente: Ministerio de Planificación y Cooperación de Chile (1998)

Diferencia de cotas (m)	Pendientes (%)	Longitud de tramo de subida (m)
1	12	8
2	10	20
4	6	65
6	5	120
10	4	250
10	3	--

2.7. Modelos de localización óptima

En los estudios de carácter espacial, es necesario contar con una herramienta de ayuda a la toma de decisiones que integre la componente geográfica. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite esta integración.³⁷ Existen experiencias internacionales en las que mediante los SIG se realizan evaluaciones multicriterio para la planificación de infraestructura ciclista.

En los diferentes estudios se han tenido en cuenta factores favorables para la circulación en bicicleta (densidad de población, localización de actividades económicas, centros educativos, zonas de recreo) así como factores inhibidores (colisiones, ausencia de seguridad vial, vandalismo).³⁸

En esta misma línea, existe una preocupación por hallar localizaciones óptimas mediante herramientas de información geográfica. Entre estas preocupaciones destacan estos cuatro temas:

- Demanda: distribución espacial de la misma
- Oferta: distribución espacial de los lugares donde se oferta el servicio o la localización de estaciones obligatorias.

³⁷ Cfr. Latorre 2012: 8

³⁸ Cfr. Latorre 2012: 8

- Lugares candidatos: en los cuales es posible situar los nuevos puestos de oferta.
- Red de comunicaciones: red con plena conectividad por la cual tendrán lugar

En los entornos SIG se han desarrollado herramientas de localización óptima de servicios que pueden ser de gran utilidad a la hora de localizar las estaciones de bicicletas en función de la distribución de la demanda.³⁹

En este sistema destaca la formalización de la noción de ubicación y distribución, donde varias instalaciones se localizan en el espacio y la demanda discreta es asignada a un centro. Este modelo consiste en encontrar, entre un conjunto de sitios, la ubicación de las instalaciones de un determinado tipo, así como su capacidad, con el fin de cumplir con un objetivo predefinido, al tiempo que satisfacen la demanda de un determinado número de centros.⁴⁰

2.7.1. Mínima Impedancia

En el modelo de Mínima Impedancia las estaciones de bicicletas se ubican de modo a minimizar la suma de todos los costes ponderados entre los puntos de demanda y las instalaciones de la solución. Las bases se eligen de tal modo que se minimiza la suma de las impedancias ponderadas, es decir, la demanda asignada a una base.⁴¹

2.7.2. Máxima Cobertura

En el modelo de Máxima Cobertura las estaciones se ubican de tal modo que el máximo número de puntos de demanda se asignen a instalaciones de la solución situadas dentro de la tolerancia de impedancia. Las bases se eligen de tal modo que la máxima demanda posible de viajes potenciales queda cubierta por la tolerancia de impedancia de las instalaciones (doscientos metros). En este método no se considera la demanda de las bases que queden fuera de la tolerancia de doscientos metros.⁴²

³⁹ Cfr. Cooper 1963: 32

⁴⁰ Cfr. Ribero 2002: 25

⁴¹ Cfr. Latorre 2012: 8

⁴² Cfr. Latorre 2012: 8

En la Figura 11, se muestra la metodología de máxima cobertura para posteriormente poder determinar las estaciones óptimas de bicicletas.

Figura 11: Flujograma Máxima Cobertura

Fuente: Propia (2019)

2.8. Microsimulación

La microsimulación es una herramienta utilizada cotidianamente en ingeniería de transporte, para analizar el comportamiento de los vehículos con un alto nivel de detalle.⁴³

Un modelo de simulación es diseñado para emular el comportamiento del tráfico en una red de transporte en un determinado tiempo y espacio con el fin de predecir el funcionamiento del sistema. Asimismo, incluye adaptaciones lógicas y matemáticas del sistema en el mundo real que puedan implementarse en softwares de computadoras, donde se podrá experimentar el modelo en lugar de hacerlo en el campo.⁴⁴

⁴³ Cfr. Quispe 2016: 4

⁴⁴ Cfr. US Department of Transportation 2014: 15

2.8.1. Modelación del tráfico

Modelar el tráfico vehicular se basa en enfoques microscópicos y macroscópicos del comportamiento del flujo.⁴⁵ Además, un sistema es la combinación de distintos elementos del tránsito en determinada zona, los cuales se interrelacionan para lograr un comportamiento global. Modelar un sistema se enfoca en presentar con exactitud lo que se desea estudiar.⁴⁶ En la Figura 12, se muestra una organización de los modelos de acuerdo a su naturaleza, nivel de detalle y por su nivel de aleatoriedad.

Figura 12: Modelos de tráfico

Fuente: Alvarez (2017)

Los dos primeros modelos de acuerdo a su naturaleza, son los modelos discretos y continuos que se explicarán a continuación.

⁴⁵ Cfr. Suarez 20017: 21

⁴⁶ Cfr. Jibaja 2018: 28

i) Modelos discretos

Estos modelos se destacan por considerar una modelación de un sistema por medio de una representación en la cual los estados de las variables cambian instantáneamente en instante de tiempo separados.⁴⁷ Por ejemplo, en un modelo de flujo de tráfico en una autopista las características y el movimiento individual de los vehículos varían constantemente en instantes distintos.

ii) Modelos continuos

Los modelos continuos involucran ecuaciones matemáticas diferenciales que relacionan tasas de cambio de los parámetros en el tiempo. Además, las variables que se emplean en el modelo cambian constantemente. Por ejemplo, el comportamiento del tráfico en una intersección, la velocidad de los vehículos, las longitudes de cola, etc.⁴⁸

Se debe mencionar que también se pueden clasificar según su nivel de aleatoriedad. Esto según el tipo de proyecto y el fin con el que se desee desarrollar el mismo. Esta clasificación corresponde a los modelos determinísticos y estocásticos que se explicarán a continuación.

iii) Modelos determinísticos

Son modelos cuya solución para determinadas condiciones es única y siempre la misma, también son aquellos donde se supone que los datos se conocen con certeza, es decir, se supone que cuando el modelo sea analizado se tiene disponible toda la información necesaria para la toma de decisiones⁴⁹

iv) Modelos estocásticos

El modelo estocástico, es opuesto al modelo determinístico, contiene uno o más parámetros aleatorios. Por lo que, se genera un conjunto de respuestas cuando es utilizado para efectuar un estudio. Los resultados obtenidos mediante el uso de este modelo son empleados para

⁴⁷ Cfr. Alvarez 2017: 6

⁴⁸ Cfr. Aguirre 2015: 11

⁴⁹ Cfr. Pimentel 2014: 17

estimar el comportamiento real de un sistema.⁵⁰ El programa Vissim es un ejemplo de este software, el cual será usado en la presente tesis.

Los tres últimos modelos de acuerdo a su nivel de detalle, son los modelos macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos que se explicarán a continuación.

v) Modelos macroscópicos

Los modelos macroscópicos se caracterizan por ser representaciones continuas del flujo de tránsito, se refieren a medidas generales como la relación entre flujo, velocidad, y densidad. Estas características del modelo pierden mucho detalle, pero ganan en habilidad para tratar los problemas de dimensiones colosales dentro de tiempos de ejecución cortos.⁵¹

vi) Modelos mesoscópicos

La metodología de estos modelos consiste en simular un conjunto reducido de vehículos como si fueran uno solo. Esto no quiere decir que los vehículos se analizarán como conjunto del todo; ya que en el caso de algunos parámetros como los de giros, tiempos de entrada y salida se evaluarán de manera individual.⁵²

Por otro lado, los vehículos y el comportamiento del conductor no son distinguidos ni descritos individualmente, si no en términos con funciones de distribución de probabilidad. Estas distribuciones dependen de varias variables (aceleración, interacción entre vehículos, cambios de carril, etc.) que describirán el comportamiento de cada conductor.⁵³

vii) Modelos microscópicos

Los modelos microscópicos son aquellos que se centran en el comportamiento individual de cada vehículo para obtener el comportamiento global del tráfico en una vía. Tienen en cuenta, por tanto, los parámetros interrelacionados que determinan la dinámica de los

⁵⁰ Cfr. Alvarez 2017: 7

⁵¹ Cfr. Arrieta 2013: 14

⁵² Cfr. Alvarez 2017: 8

⁵³ Cfr. Pimentel 2014: 18

vehículos. Así, por ejemplo, conociendo la aceleración de cada vehículo en cada instante, se puede saber, dada su posición y velocidad, cual será su situación tras un intervalo de tiempo.⁵⁴

En la Figura 13, se ilustra las consideraciones que pertenecen a cada modelo, según el nivel de detalle de la simulación.

Figura 13: Principales estrategias de simulación del tráfico

Fuente: Alvarez (2017)

2.9. Modelos de seguimiento vehicular

Se describen los modelos de seguimiento vehicular más utilizados para mostrar que consideraciones se utilizan para representarlos. Luego se presentan los modelos de seguimiento desarrollados especialmente para ciclistas.

2.9.1. Modelo de Gipps

Este modelo clasifica a los vehículos de dos maneras: libre y contenido. La primera hace referencia a que los vehículos se comportan independientemente, es decir, su velocidad está controlada por su propio deseo y su máxima aceleración. Mientras que la segunda, responde al comportamiento del vehículo que esté delante; su velocidad varía de forma que se mantenga un espacio seguro respecto al vehículo líder. Este espacio seguro representa al

⁵⁴ Cfr. Pimentel 2014: 18

espacio en que el vehículo puede responder a tiempo ante cualquier acción del vehículo líder, sin que colisionen.⁵⁵

Así mismo, el conductor puede escoger la velocidad mínima entre dos alternativas. La primera hace referencia a que el conductor puede alcanzar su velocidad deseada y la segunda, a que debe preservar una distancia segura.⁵⁶ En la Figura 14, se presenta el modelo de Gipps

Figura 14: Representación gráfica del modelo de Gipps

Fuente: Quispe (2016)

Donde:

- “x” es el desplazamiento
- “v” es la velocidad
- “h” es el progreso
- “S” es la longitud del vehículo

El modelo de Gipps emplea la siguiente notación:

- a_n : Máxima aceleración que el conductor del vehículo “n” desea alcanzar
- b_n : Frenado más severo que el conductor del vehículo “n” desea alcanzar $b_n < 0$
- S_n : Tamaño efectivo del vehículo “n”, longitud física más un margen
- V_n : Velocidad que el conductor del vehículo “n” desea viajar
- $x_n(t)$: Posición de la parte delantera del vehículo “n” en el tiempo “t”
- $v_n(t)$: Velocidad del vehículo “n” en el tiempo “t”
- τ : Tiempo de reacción aparente, constante para todos los vehículos

⁵⁵ Cfr. Quispe 2016: 8

⁵⁶ Cfr. Quispe 2016: 9

La primera restricción sobre el vehículo “n” es que no excederá la velocidad deseada del conductor. La segunda es que su aceleración libre deberá primero aumentar con la velocidad, luego disminuye a cero cuando la velocidad del vehículo se aproxima a su velocidad deseada.⁵⁷

$$v_n(t + \tau) \leq v_n(t) + 2,5a_n\tau(1 - \frac{v_n}{v_n})(0,025 + \frac{v_n(t)}{v_n})^{1/2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

La tercera variable, el frenado, si el vehículo “n-1” comienza a frenar tan fuerte como puede en el tiempo “t”, estará en reposo en el punto “ x_{n-1}^* ”.⁵⁸

$$x_{n-1}^* = x_{n-1}(t) - v_{n-1}(t)^2/2b_{n-1} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Además, el vehículo “n”, viajando inmediatamente detrás, no reaccionará hasta el tiempo “t+ τ ” en consecuencia no estará en reposo.

$$x_n^* = x_n(t) + \frac{[v_n(t)+v_n(t+\tau)]\tau}{2} - v_n(t + \tau)^2/2b_n \quad (\text{Ecuación 8})$$

Finalmente, el modelo presentado por Gipps, es el modelo comúnmente utilizado para trabajar con distancias seguras o a la prevención de una colisión. El objetivo de este modelo es especificar una distancia de seguimiento seguro y, a partir de esto, adaptar el comportamiento del conductor de forma que siempre mantenga una distancia segura.⁵⁹

⁵⁷ Cfr. Quispe 2016: 10

⁵⁸ Cfr. Alvarez 2017: 11

⁵⁹ Cfr. Quispe 2016: 12

2.9.2. Modelo de la General Motors

El modelo de la General Motors es el más popular de seguimiento vehicular por dos razones. Primero, porque coincide con los datos recogidos en campo y los modelos basados en este modelo muestran una gran relación con los datos obtenidos de campo.⁶⁰ Y segundo, porque tiene una relación matemática con los modelos macroscópicos. Incluso el modelo logarítmico de Greenberg, para la relación de densidad-velocidad, puede derivarse de uno de los modelos de la General Motors.⁶¹

Además, este es un modelo de estímulo-respuesta, pues asume que el vehículo de seguimiento responde a una velocidad relativa diferente de cero, que varía de acuerdo al proceso de aceleración y desaceleración. El modelo considera la hipótesis de que el grado en el que un estímulo afecta la respuesta está en función del progreso de la distancia que separa al vehículo líder con el vehículo de seguimiento y la velocidad de este último.⁶² En la Figura 15, se puede apreciar de manera gráfica la base del modelo vehicular.

Figura 15: Representación modelo de seguimiento de la General Motors

Fuente: Quispe (2016)

⁶⁰ Cfr. Mathew 2014: 22

⁶¹ Cfr. Quispe 2016: 17

⁶² Cfr. Quispe 2016: 17

El modelo de seguimiento vehicular de la General Motors se basa en seguir al líder. Este concepto está basado en dos supuestos. El primero, a mayor velocidad del vehículo, mayor será el espacio entre los vehículos. Y el segundo, para evitar la colisión, los conductores deben mantener una distancia segura entre los vehículos.⁶³

Donde:

Δx_{n+1}^t : Es el espacio disponible para un “ $(n + 1)^{th}$ ” vehículo

Δx_{safe} : Es la distancia segura

v_{n+1}^t : Es la velocidad

El espacio requerido se define como:

$$\Delta x_{n+1}^t = \Delta x_{safe} + \tau v_{n+1}^t \quad (Ecuación 9)$$

Donde “ τ ” es el coeficiente de sensibilidad, la ecuación puede reescribirse de la siguiente manera.

$$x_n - x_{n+1}^t = \Delta x_{safe} + \tau v_{n+1}^t \quad (Ecuación 10)$$

Derivando la ecuación anterior respecto al tiempo se obtiene que.

$$v_n^t - v_{n+1}^t = \tau a_{n+1}^t \quad (Ecuación 11)$$

$$a_{n+1}^t = \frac{1}{\tau} [v_n^t - v_{n+1}^t] \quad (Ecuación 12)$$

⁶³ Cfr. Quispe 2016: 18

Finalmente, la General Motors propone varias formas de representar el coeficiente de sensibilidad, la representación más general tiene la siguiente forma.

$$a_{n+1}^t = \left[\frac{\alpha_{l,m} (v_{n+1}^t)^m}{(x_n^t - x_{n+1}^t)^l} \right] [v_n^t - v_{n+1}^t] \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

“ l ” es el exponente de *distance headway* y puede tomar valores de (+4) a (-1)

“ m ” es la velocidad que puede tomar valores desde (-2) a (+2)

“ α ” es el coeficiente de sensibilidad

El software de microsimulación existen tres puntos que deben ser recordados. El primer lugar, el conductor reacciona al cambio de velocidad respecto al vehículo líder en un tiempo denominado “tiempo de reacción”, durante el cual, el vehículo de seguimiento percibe el cambio de velocidad y reacciona a ello. El segundo lugar, la posición del vehículo, su velocidad y aceleración será actualizado en determinados periodos de tiempo, que dependen de la precisión que se requiere. Y tercero, la posición y la velocidad del vehículo se rigen por la ley de movimiento de Newton y la aceleración por la del modelo de seguimiento.⁶⁴

Finalmente, las ecuaciones de flujo de tráfico pueden desarrollarse de la siguiente manera.

$$v_n^t = v_n^{t-\delta t} + a_n^{t-\delta t} \delta t \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$x_n^t = x_n^{t-\delta t} + v_n^{t-\delta t} \delta t + \frac{1}{2} a_n^{t-\delta t} \delta t^2 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$a_{n+1}^t = \left[\frac{\alpha_{l,m} (v_{n+1}^{t-\delta t})^m}{(x_n^{t-\Delta T} - x_{n+1}^{t-\Delta T})^l} \right] (v_n^{t-\Delta T} - v_{n+1}^{t-\Delta T}) \quad (\text{Ecuación 16})$$

⁶⁴ Cfr. Quispe 2016: 19

2.9.3. Modelo de Wiedemann

El modelo de seguimiento vehicular de Rainer Wiedemann fue presentado en 1974. Este define los límites de percepción de los conductores y las consecuencias de esos límites. Después de este modelo, se presentó también el modelo conocido como Wiedemann 99. Esta última versión contiene más parámetros y límites que los usuarios pueden calibrar.⁶⁵

La Figura 16, se muestra de forma gráfica las consideraciones del software Vissim para el modelo de Wiedemann 74. Muestra como la separación entre vehículos “ ΔX ” va disminuyendo en función de la diferencia de velocidad “ ΔV ”.

La parte naranja, debajo del límite SDV, es el área donde los vehículos reducen la velocidad. Luego de esto, el vehículo, antes de cruzar otro límite CLDV, reduce su velocidad para entrar a una región de reacción inconsciente. El conductor permanece en la región contenida por los límites OPDV, SDX y SDV.⁶⁶

Figura 16: Representación modelo de seguimiento Wiedemann 74

Fuente: Quispe (2016)

Se debe mencionar que la siguiente información, que permite conocer el modelo de Wiedemann, fue obtenida de Janso y Tapani (2004).

⁶⁵ Cfr. Gao 2008: 16

⁶⁶ Cfr. Quispe 2016: 6

AX es la distancia deseada entre vehículos estacionados. Donde $AXadd$ y $AXmult$ son parámetros de calibración y $RND1n$ es un parámetro de distribución normal.

$$AX = L_{n-1} + AXadd + RND1n(AXmult) \quad (Ecuación 17)$$

ABX o BX es la distancia deseada mínima de seguimiento en baja velocidad. Donde $BXadd$ y $BXmult$ son parámetros de calibración

$$ABX = AX + BX \quad (Ecuación 18)$$

$$BX = (BXadd + BXmult.RND1n)\sqrt{v} \quad (Ecuación 19)$$

La velocidad “ v ” se define la siguiente forma.

$$v = \begin{cases} v_{n-1} & \text{para } v_n > v_{n-1} \\ v_n & \text{para } v_n \leq v_{n-1} \end{cases} \quad (Ecuación 20)$$

Además, SDX es la máxima distancia de seguimiento. La distancia varía entre 1,5 y 2,5 veces la distancia mínima de seguimiento (ABX). Donde $EXadd$ y $EXmult$ son parámetros de calibración. RND es un número aleatorio de distribución normal y $RND2n$ es un parámetro dependiente de distribución normal.⁶⁷

$$SDX = AX + EX.BX \quad (Ecuación 21)$$

$$EX = EXadd + EXmult.(NRND - RND2n) \quad (Ecuación 22)$$

⁶⁷ Cfr. Quispe 2016: 14

Por otro lado, *SDV* es el punto de aproximación. Este límite se utiliza para describir los puntos donde el conductor nota que se aproxima a un vehículo más lento.

$$SDV = \left(\frac{\Delta x - L_{n-1} - AX}{CX} \right)^2 \quad (Ecuación 23)$$

$$CX = CX_{const.} (CX_{add} + CX_{mult.} (RND1_n + RND2_n)) \quad (Ecuación 24)$$

2.10. Fundamentos de la microsimulación

La microsimulación consiste en modelar los movimientos de vehículos individuales con el propósito de evaluar el desempeño de un sistema de tránsito.⁶⁸ Los siguientes fundamentos de microsimulación son válidos para los modelos vehiculares y en este caso, adaptados también para representar a los ciclistas.

2.10.1. Carácter estocástico

Los modelos estocásticos se basan en distribuciones estadísticas para asignar las características de conductor – vehículo. Los modelos de simulación estocásticos arrojan resultados más cercanos a la realidad mediante datos de ingreso con un nivel de aleatoriedad, caso contrario de los modelos determinísticos los cuales solo se basan en ecuaciones matemáticas y desarrollan una única respuesta.⁶⁹

2.10.2. Warm up

Al iniciar un proceso de simulación, el modelo de microsimulación empieza con cero vehículos en el sistema, de forma que, si se empieza a recolectar los resultados desde el primer instante, se estaría cometiendo un error al considerar el rendimiento del sistema con cero o pocos vehículos, por tal razón, es necesario esperar un periodo de tiempo hasta que el sistema se estabilice.⁷⁰ Esta definición se apoya en la Figura 17 del periodo de estabilización.

⁶⁸ Cfr. US Department of Transportation 2014: 16

⁶⁹ Cfr. Alcalá 2016: 33

⁷⁰ Cfr. US Department of Transportation 2014: 16

Figura 17: Periodo de estabilización

Fuente: US Department of Transportation (2004)

En el tiempo en que la cantidad de vehículos ingresa a una tasa constantes respecto al tiempo de simulación, se puede decir que el periodo de warm up ha concluido, gracias a lo cual se puede empezar a recolectar información como volumen vehicular, longitud de cola y tiempos de viajes.⁷¹

2.10.3. Número semilla

Si se trabajase con el mismo comportamiento para todos los vehículos, el resultado no sería nada representativo, puesto que, en la realidad, cada vehículo tiene un comportamiento individual al resto. Los modelos de microsimulación utilizan diferente número semilla para agregar la aleatoriedad al proceso y producir resultados que se asemejen a la realidad.⁷²

⁷¹ Cfr. US Department of Transportation 2014: 16

⁷² Cfr. Quispe 2016: 6

En microsimulación, las semillas se encargan de la variabilidad durante las corridas del software, asignando características aleatorias a cada elemento, dicho de otra manera, cada semilla intenta reflejar el compartimiento que se observa en la realidad.⁷³

Cada semilla representa diferente distribución de los vehículos, seleccionar su destino, su ruta y un determinado comportamiento durante el movimiento a través de la red.⁷⁴ Es así que, si se corre el software con la misma semilla, el resultado sería parecido; sin embargo, para obtener variabilidad en los resultados, es necesario trabajar varias pruebas con diferentes números de semilla y hacer uso de estadística para validar estos resultados.⁷⁵

2.10.4. Número de corridas

El número de corridas necesarias para establecer un tiempo de viaje promedio dentro de un nivel de confianza del 95 por ciento depende de la variabilidad de los tiempos de viaje medidos en el campo.⁷⁶ Las condiciones de flujo libre pueden requerir tan solo tres corridas para establecer un tiempo de viaje promedio confiable. Las condiciones congestionadas pueden requerir 10 o más corridas.

$$N = \left(2t_{(0,025,N-1)} \cdot \frac{S}{R} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

“N” es el número de corridas

“R” es el intervalo de confianza al 95%

“S” es la desviación estándar de la muestra

El número mínimo de corridas se evalúa de la siguiente manera:

⁷³ Cfr. Quispe 2016: 6

⁷⁴ Cfr. FHWA 2012:85

⁷⁵ Cfr. Quispe 2016: 10

⁷⁶ Cfr. FHWA 2012: 95

$$N = \left(2t_{(0,025,N-1)} \cdot x \cdot \frac{S}{e} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

- “N” es el número de corridas
- “R” es el intervalo de confianza al 95%
- “S” es la desviación estándar de la muestra
- “x” es el resultado del parámetro de eficiencia
- “e” es el margen de error

2.10.5. Calibración

La calibración es el proceso que permite modificar los parámetros del modelo, de forma que este pueda representar lo datos recogidos en campo. Los métodos más utilizados para la calibración son la regresión, optimización, determinación de errores, análisis de trayectoria, etc.⁷⁷

Durante la calibración se tomarán medidas de capacidad, conteo de tráfico y medidas de rendimiento del sistema como tiempos de viaje, velocidades, demoras y colas.⁷⁸ Es importante destacar que todos estos datos deben ser recogidos en un mismo periodo de tiempo.

2.10.6. Validación

El último paso, para culminar el proceso de simulación, es realizar la validación del sistema. Este proceso consiste en verificar que los aspectos de rendimiento de la calibración coinciden con los datos observados.⁷⁹ La validación es el proceso que permite confirmar la capacidad del modelo ya calibrado y se realiza mediante validación estadística.⁸⁰ Además, si no se presentan nuevas condiciones externas que puedan afectar al modelo, se espera que los datos

⁷⁷ Cfr. Matthew 2014: 20

⁷⁸ Cfr. FHWA 2004: 22

⁷⁹ Cfr. Sykes 2010: 17

⁸⁰ Cfr. Hollander y Liu 2008: 21

de salida de la simulación correspondan con la medida de rendimiento obtenido en campo con un nivel de confianza del 95%.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(E-V)^2}{E+V}} \quad (Ecuación 27)$$

Donde:

E : Volumen estimando del modelo

V : Volumen medido en campo

En la Tabla 3, de acuerdo con los planeamientos teóricos y estadísticos utilizados se sugiere lo siguiente:

Tabla 3: Indicador estadístico (GEH)

Fuente: Álvarez (2017)

GEH	Indicador Estadístico
5	Variación permisible.
5.0 – 10	Se justifica la investigación.
10.0 a más	Existe una alta probabilidad de un problema con el modelo.

2.10.7. Prueba estadística para calibración y validación del modelo

Para la calibración se emplean pruebas paramétricas y no paramétricas, si la muestra es menor a 30, una opción recomendada es la calibración mediante Randomization Test, que además de basarse en una prueba no paramétrica emplea múltiples simulaciones, no depende de la forma de las distribuciones de origen y se aplica para cualquier tamaño de muestra.⁸¹

⁸¹ Cfr. Chura 2018: 25

3. METODOLOGÍA

3.1. Máxima cobertura

La presente investigación empleará la metodología de máxima cobertura, la cual es una herramienta de ayuda a la toma de decisiones que integra la componente geográfica. En la Figura 18, se muestra la metodología de máxima cobertura para posteriormente poder determinar las estaciones óptimas de bicicletas.

Figura 18: Flujograma Máxima Cobertura

Fuente: Propia (2019)

El caso de estudio utilizado para el desarrollo de la tesis se encuentra ubicado en el distrito de San Borja, el cual cuenta con ciclovías, combinando el uso residencial con el uso comercial, recreativo, deportivo, cultural y económico. De esta forma, se opta por implementar el sistema en la zona más densa y céntrica del distrito, para gradualmente llegar a las zonas periféricas.⁸²

El Sistema de Información Geográfica usado en la elaboración del análisis es ArcGIS Desktop 10, y las diferentes extensiones de que dispone. En esta tesis se usará las extensiones de análisis espacial (Spatial Analyst) y la de análisis de redes (Network Analyst).⁸³

⁸² Cfr. Latorre 2012: 11

⁸³ Cfr. Muñoz 2012: 48

3.2. Datos de partida máxima cobertura

Para la elaboración de la presente tesis es necesario contar con información cartográfica y estadística, proveniente de varias fuentes.

- Mapa Topográfico de la municipalidad de San Borja: mapa topográfico completo a escala 1: 10 000 a partir del cual se elaborará el Modelo Digital de Elevaciones. El distrito de San Borja esta sectorizado en 12 Sectores y 36 subsectores. En la Figura 19, se observa sectorización del distrito.

Figura 19: Sectorización del distrito de San Borja

Fuente: Municipalidad de San Borja (2018)

- Población: Datos del Instituto Nacional de Estadística: Censo de Población y Viviendas. En la Tabla 4, se observa la cantidad de personas por cada uno de los 12 sectores, asimismo la cantidad de personas por cada uno de los 36 subsectores.

Tabla 4: Población por sectores y subsectores

Fuente: Municipalidad de San Borja (2018)

POBLACIÓN SAN BORJA POR SECTORES AÑO 2014			
SECTOR	SUBSECTOR	POBLACIÓN	
1	1A	4780	11563
	1B	2497	
	1C	4286	
2	2A	2647	8053
	2B	2607	
	2C	2799	
3	3A	3306	8802
	3B	2408	
	3C	3088	
4	4A	4248	10941
	4B	3714	
	4C	2979	
5	5A	2319	7639
	5B	2646	
	5C	2674	
6	6A	1229	8296
	6B	3242	
	6C	3825	
7	7A	3156	12328
	7B	3520	
	7C	5652	
8	8A	3026	11377
	8B	4417	
	8C	3934	
9	9A	3681	10486
	9B	3351	
	9C	3454	
10	10A	2423	11704
	10B	5182	
	10C	4099	
11	11A	2948	5164
	11B	1438	
	11C	778	
12	12A	1828	6899
	12B	1791	
	12C	3280	
TOTAL POBLACIÓN AÑO 2014			113252

- Red vial: Red vial del municipio de San Borja, la cual nos permitirá observar la plena conectividad y generación de una red SIG en la que simular la movilidad peatonal en este estudio.
- Estaciones de bicicletas: Localización de las estaciones de bicicletas públicas del distrito de San Borja obtenida a través del programa San Borja en Bici, información que se muestra en la Figura 20.

Figura 20: Estaciones del programa San Borja en Bici

Fuente: Municipalidad de San Borja (2018)

- Puntos principales de actividad económica: Información relativa de la localización de los principales puntos de actividad económica, por ejemplo: Centro Comercial Primavera Park & Plaza, Centro Comercial La Rambla, Angamos Open Plaza, etc.

- Red de transporte público: Red del Metro de Lima, información facilitada por la Autoridad Autónoma del Tren Eléctrico de Lima, consultada en Junio de 2016.

3.3. Ingreso datos máxima cobertura

Para poder realizar el modelo digital de elevaciones, se realizó el análisis espacial con la ayuda del programa ArcGIS Desktop 10, se procede a dividir el distrito de San Borja en los 12 sectores y 36 subsectores existentes como se muestra en la Figura 21.

Figura 21: División del distrito en sectores y subsectores

Fuente: Propia (2019)

Fuente: Propia (2019)

41

Figura 23: Sectores con los respectivos nodos en San Borja

Fuente: Propia (2019)

Luego debido a que cada nodo puede ser una futura estación y lo que se requiere es conocer las estaciones óptimas, se procedió a ingresar los datos estadísticos de población por cada uno de los 12 sectores y 36 subsectores respectivamente, como se aprecia en la Figura 24, en la cual se dio un color específico para cada sector.

Figura 24: Cantidad de población por cada sector en el distrito de San Borja

Fuente: Propia (2019)

Después de haber ingresado los datos estadísticos de población se ingresan la información de los puntos principales de actividad económica tales:

- La Biblioteca Nacional del Perú
- Teatro y Museo Nacional
- El Coliseo Eduardo Dibós Dammert
- Centro Comercial Real Plaza Primavera
- Centro Comercial La Rambla

En la Figura 25 y 26, se muestra el ingreso en el programa ArcGIS Desktop 10 de puntos de actividad económica ubicada en el Sector 6 y 10.

Figura 25: Punta de actividad económica sector 6

Fuente: Propia (2019)

Figura 26: Punta de actividad económica sector 10

Fuente: Propia (2019)

Por último, después de ingresar toda la información cartográfica y estadística necesaria para realizar la metodología de máxima plantearemos cinco escenarios posibles: 10, 20, 30, 40 y 50 estaciones, buscando una solución eficiente, ya que las estaciones se concentran en las áreas de mayor densidad de demanda.

3.4. Microsimulación VISSIM 9

La presente investigación también empleará la microsimulación con el software VISSIM 9, la cual es una herramienta de ayuda que tiene como finalidad reflejar el comportamiento de la red ciclista existente en el área de estudio. En la Figura 26, se muestra el modelo de simulación para posteriormente poder determinar la reducción de tiempos de viaje.

Figura 27: Flujograma Microsimulación Vissim

Fuente: Propia (2019)

3.5. Recolección de datos Microsimulación

3.5.1. Ubicación

La zona de estudio está ubicada en el distrito de San Borja, entre la avenida San Borja Sur y la Av. Fray Luis de León como se muestra en la Figura 27. Dicha zona cuenta con ciclovías existentes, ya que hace algunos años se viene implementando en el distrito el programa San Borja en Bici, promoviendo que los vecinos y residentes puedan utilizar las ciclovías para movilizarse en bicicleta.

Figura 28: Área de estudio

Fuente: Fuente propia (2019)

La zona que se utilizó para la recolección de datos para la microsimulación cuenta con la mayor cantidad de viajes realizados en bicicleta, ya que en el cruce de la Av. San Borja Sur con la Av. Aviación se encuentra la estación San Borja Sur del tren eléctrico y la estación San Borja Sur del programa San Borja en Bici lo cual permite la intermodalidad siendo esta una zona atractora y generadora de viajes a la vez.

La microsimulación es una herramienta que nos permite analizar el comportamiento operacional materia de estudio, para lo cual se levantaron información tales como volumen de ciclistas, velocidades, tiempos de ciclo y fases semafóricas, características de las ciclovías

(anchos de carril bici, operación direccional o bidireccional), luego toda esta información fue ingresada al software VISSIM 9.

Después se debe calibrar y validar el modelo y demostrar con la microsimulación que al aplicar la metodología de máxima cobertura y conocer la localización óptima de estaciones públicas de bicicletas se reducirán los tiempos de viaje de los ciclistas en el distrito de San Borja.

3.5.2. Aforo de ciclistas

En el conteo de los ciclistas que transitan por la ciclovía se consideran dos rutas una en dirección hacia la estación San Borja Sur de la Línea 1 del tren eléctrico (A hacia B) y la otra hacia el Pentagonito (B hacia A), como se observa en la Figura 29.

Figura 29: Conteo de ciclistas

Fuente: Propia (2019)

El formato a utilizar para el aforo de ciclistas se muestra en la Tabla 5 y fueron obtenidos del Anexo 6.1 y 6.2 respectivamente.

Tabla 5: Aforo de ciclistas

Fuente: Propia (2019)

HORARIO	BICICLETA	
	A ---> B	B ---> A
7:00 - 7:15	3	2
7:15 - 7:30	4	2
7:30 - 7:45	8	6
7:45 - 8:00	7	7
8:00 - 8:15	8	5
8:15 - 8:30	6	4
8:30 - 8:45	3	3
8:45 - 9:00	4	3

3.5.3. Tiempos de viaje

Para el procesamiento de datos de tiempo de viaje se registró el tiempo que tardan los ciclistas en cruzar el espacio delimitado de diecisiete metros, tal como se observa en la Figura 30.

Figura 30: Espacio delimitado 17 metros

Fuente: Propia (2019)

La medición se hace a partir del eje de la rueda posterior, desde el instante en que la bicicleta cruza la primera línea marcada, hasta el instante en que la sobrepasa, como se aprecia en la Figura 31.

Figura 31: Espacio delimitado 17 metros

Fuente: Quispe (2016)

En la Figura 32, se muestra cómo se llegó a calcular el tiempo de viaje en base a la línea marcada en la ciclovía. Para delimitar el espacio se debe tener el mayor ángulo de visión posible, en nuestro caso resulto ser 17 metros de extremo a extremo.

Figura 32: Tiempo de viaje en 17 metros

Fuente: Quispe (2016)

Para que el modelo se pueda calibrar, se requiere los tiempos de viaje medidos en campo para que estos sean comparados con los obtenidos en el modelo de microsimulación. Para los tiempos de viaje, se medirá el tiempo de 40 bicicletas las cuales recorrerán la sección conocida de 17 metros, estos datos se registrarán en la Tabla 6.

Tabla 6: Medición de tiempo

Fuente: Propia (2019)

N° Bicicleta	Tiempo (s)	N° Bicicleta	Tiempo (s)
1	4.3	21	4.2
2	5.0	22	4.5
3	4.0	23	4.8
4	4.1	24	4.6
5	5.0	25	4.5
6	4.5	26	4.5
7	4.3	27	4.7
8	4.3	28	4.3
9	4.8	29	4.7
10	5.5	30	4.2
11	4.2	31	4.3
12	4.0	32	4.1
13	4.2	33	4.0
14	4.1	34	4.2
15	4.8	35	4.4
16	4.7	36	4.5
17	5.0	37	4.3
18	4.3	38	4.0
19	4.2	39	4.6
20	5.4	40	4.2

3.5.4. Tiempo de semáforos

En campo se registró el tiempo de semáforos durante la hora punta, se obtuvieron los datos referentes a tiempos de verde, ámbar y rojo, así como el tiempo de duración total del ciclo. Esta información se resume en la Tabla 7.

Tabla 7: Tiempo de semáforos

Fuente: Propia (2019)

Semáforo	Tiempo de Semáforos (seg)			
	Verde (V)	Ámbar (A)	Rojo (R)	Ciclo Total
Av. San Borja Sur	87	3	76	166
Av. Aviación	95	3	68	166

En la Figura 33 y 34, se muestra las fases del semáforo en el cruce de las avenidas San Borja Sur y Aviación.

Figura 33: Fase 1 Ciclo semafórico

Fuente: Propia (2019)

Figura 34: Fase 2 Ciclo semafórico

Fuente: Propia (2019)

En la Figura 35, se muestra el ciclo semafórico de 166 segundos en el cruce de las avenidas San Borja Sur y Aviación

Ciclo semafórico = 166 segundos

Fase 1	87	3	76
Fase2	95	3	68

Figura 35: Ciclo semafórico

Fuente: Propia (2019)

3.5.5. Características de las ciclovías

En campo se registró el tipo de ciclovía para el presente estudio, se obtuvieron dos tipos de ciclovías las cuales se observan en la Figura 36.

Figura 36: Características de las ciclovías

Fuente: Propia (2019)

El trazo de color rojo representa la ciclovía segregada existente en el área de estudio perteneciente al programa San Borja en Bici, la cual se muestra en el Figura 37.

Figura 37: Tipo de ciclovía segregada

Fuente: Propia (2019)

El trazo de color amarillo representa la ciclovía no segregada existente en el área de estudio perteneciente al programa San Borja en Bici, la cual se muestra en el Figura 38.

Figura 38: Tipo de ciclovía no segregada

Fuente: Propia (2019)

3.6. Ingreso datos microsimulación

3.6.1. Construcción de la red vial

Para que la simulación sea representativa y se asemeje a las características físicas y operacionales del área de modelación, se construyó la red vial, para lo cual se utilizó como plano de referencia el Google Earth que trae por defecto VISSIM 9, luego se procedió a construir la red vial utilizando las características y parámetros obtenidos en campo respecto a las características de la geometría vial. Para construir la red vial se utilizó el comando **links**. En la Figura 39, se muestra la construcción de la ciclovía.

Figura 39: Construcción de la red vial VISSIM 9

Fuente: Propia (2019)

3.6.2. Determinación del tipo y clase vehicular

A través de los conteos de tráfico efectuados en campo, se determinaron la tipología y clase vehicular cuya información fue ingresada al software VISSIM 9. Se empleó el comando de: **base data → vehicle classes y vehicle types**.

En la Figura 40, se muestra la tipología y clase vehicular considerada en software VISSIM 9

Bing Maps Terms of Usage

Start Page

Network Editor

Network Editor (2)

Vehicle Classes / Vehicle Types

Select layout...

<

Figura 40: Tipología y clase vehicular considerada VISSIM 9

Fuente: Propia (2019)

Una vez ingresado los vehículos se procedió a realizar ajustes de acuerdo a sus características operacionales identificadas en campo, longitudes, distribución de velocidades, distribución de aceleraciones, entre otros. Lo cual permite que el modelo se asemeje con las condiciones operacionales el área de influencia. En la Figura 41, se muestra los ajustes realizados.

Figura 41: Ajustes de las características operacionales de los vehículos

Fuente: Propia (2019)

3.6.3. Ingreso de rutas

Una vez definido los vehículos que van a interactuar en la red, se le asigna sus recorridos. Estos movimientos son obtenidos del flujograma del estudio de tráfico o de las observaciones de campo, el cual representa la hora de máxima demanda vehicular. Se empleó el comando **vehicle routes**. En la Figura 42, se muestra la asignación de rutas con sus respectivos volúmenes vehiculares.

Figura 42: Asignación de rutas con sus respectivos volúmenes vehiculares

Fuente: Propia (2019)

3.6.4. Ingreso de los planes de tiempos semafóricos

Se ingresó el tiempo de ciclo semafórico en la intersección de influencia de la ruta modelada, la cual se muestra en la Figura 43.

Figura 43: Ciclo semafórico VISSIM 9

Fuente: Propia (2019)

3.6.5. Ingreso de velocidades

Para ingresar un tipo de velocidad al modelo, lo realizamos desde la pestaña base:

Data → distributions → desired speed.

De acuerdo a los trabajos de campo se observó que los ciclistas viajan con una velocidad promedio de 15 km/h, pero no siempre es constante por lo que se consideró una franja límite entre 13 km/h y 17km/h. En la Figura 44, se muestra el ingreso de velocidades al software VISSIM 9.

Figura 44: Ingreso de velocidades VISSIM 9

Fuente: Propia (2019)

3.6.6. Ingreso de volumen de ciclista

Creadas las rutas se procedió a asignar los volúmenes por sentido de tránsito, se utilizó el comando **vehicle inputs**. En la Figura 45, se muestra el ingreso de volumen ciclista al software VISSIM 9.

Figura 45: Ingreso de volumen ciclista VISSIM 9

Fuente: Propia (2019)

3.6.7. Warm up

La evaluación se realizó con un periodo de una hora, se realizaron corridas para identificar el tiempo de calentamiento o estabilidad del modelo, identificándose que el sistema alcanzaba una estabilidad a partir de los 15 minutos, razón por la cual este tiempo no fue considerado en la modelación. El modelamiento se realizó desde el segundo 900 hasta los 4500. En la Figura 46, se muestra Warm Up del modelo.

Figura 46: Warm Up VISSIM 9

Fuente: Propia (2019)

3.6.8. Número de corridas

Teniendo en cuenta la Ecuación 26: Número mínimo de corridas, se procede a determinar el número mínimo de corridas requeridas en el proyecto. Según la Tabla 8, se requiere como mínimo de 25 muestras. Sin embargo, por motivos prácticos se va a emplear 40 muestra.

Tabla 8: Número mínimo de corridas

Fuente: Propia (2019)

	Número mínimo de corridas
Distancia (m)	17
N (campo)	40
N (min)	25

3.6.9. Parámetros de evaluación

Para el proceso de calibración se ha considerado 40 corridas, la cual cumple con el número mínimo de corridas sugeridas por la FHWA. Por medio del modelo de microsimulación, se realizaron 12 simulaciones con diferentes parámetros de Wiedemann 74, los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Parámetros de evaluación

Fuente: Propia (2019)

Nro	Ax	Bx	Bxmult	VISSIM (tiempos de viaje)	CAMPO (tiempos de viaje)
1	0.5	0.5	0.5	4.34	4.45
2	0.5	1	2	4.35	4.45
3	0.75	1.5	2	4.36	4.45
4	1	1	1	4.35	4.45
5	1	3	3	4.37	4.45
6	1	3	3	4.38	4.45
7	1.5	3	3	4.37	4.45
8	1.75	1	1	4.38	4.45
9	1.75	3	3	4.39	4.45
10	2	1	2	4.35	4.45
11	2	2	3	4.50	4.45
12	3	3	3	4.52	4.45

Los valores más cercanos a los tiempos de viaje obtenidos en campo son los valores A_x , B_x y B_{xmult} correspondientes a 2, 2 y 3 respectivamente. Estos valores van a ser empleados y corroborados en el proceso de validación del modelo de tránsito.

3.7. Calibración y validación del modelo en Vissim

3.7.1. Calibración Wiedemann 74

Como primer paso y en sentido de encontrar respuesta a la hipótesis planteada, se simuló el sistema para 40 ciclistas, las cuales se tomaron en el área de estudio en la hora pico, considerando los valores por defecto del sistema y utilizando el modelo de Wiedemann 74, que contiene como parámetros los valores mostrados en la Figura 47. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Figura 47: Valores por defecto del software Vissim

Fuente: Propia (2019)

Tabla 10: Tiempo de viaje en segundos software Vissim

Fuente: Propia (2019)

	Campo	Simulación
Valor Promedio	4.45	4.50
Desviación Estándar	0.37	1.20
Valor Mínimo	4.00	4.34
Valor Máxima	5.50	4.66

Como se aprecia en Tabla 10, los valores obtenidos del proceso de simulación son muy cercanos a los obtenidos en el campo, con una diferencia menor al 1%, en tal sentido, se utilizó la herramienta virtual STATKEY, se realizó la prueba de diferencia de medias para verificar que la calibración sea correcta y se obtuvo los resultados que se muestran en la Figura 48.

Figura 48: Proceso de calibración

Fuente: Propia (2019)

La diferencia de medias es de 0,12 y cae dentro del intervalo de confianza asumido en 95%, por lo tanto, por lo tanto, puede decirse que el sistema ya está calibrado, estadísticamente, por tiempo de viaje.

3.7.2. Validación

En cuanto a validar los resultados, el procedimiento fue el mismo que para la calibración, se realizó la prueba *randomization hypothesis* de diferencia de medias para verificar que la validación sea correcta, como se observa en la Figura 49 y el resultado se muestra en la Tabla 11.

Figura 49: Proceso de validación

Fuente: Propia (2019)

Tabla 11: Comparación de resultados durante la validación

Fuente: Propia (2019)

	Campo	Simulación
Valor Promedio	4.45	4.48
Desviación Estándar	0.37	1.05
Valor Mínimo	4.00	4.41
Valor Máxima	5.50	4.55

Finalmente, la diferencia de medias, resulta menor teniendo como resultado 0,03, y este valor se encuentra dentro del intervalo de confianza asumido en un 95%. Por tal razón, podemos decir que el modelo de simulación esta calibrado y validado.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de estaciones utilizando el modelo de máxima cobertura

El modelo de máxima cobertura localiza las estaciones de bicicletas en los cinco escenarios considerados: 10, 20, 30, 40 y 50 estaciones, buscando una solución eficiente, ya que las estaciones se concentran en las áreas de mayor densidad de demanda. En la Figura 50, se presenta la distribución para un escenario de 10 estaciones.

Figura 50: Máxima cobertura 10 estaciones

Fuente: Propia

El escenario propuesto de 10 estaciones nos da como resultado una distancia media entre las estaciones propuestas de 2740 metros, a su vez que solo cubriría el 15% de la demanda requerida, dicha información se puede observar en la Tabla 12.

Tabla 12: Resultados máxima cobertura 10 estaciones

Fuente: Propia (2019)

Estaciones	Distancia entre estaciones (m)	Distancia máxima (m)	%
	Media		
10	2741.4	3002.77	15.67

En la Figura 51, se presenta la distribución para un escenario de 20 estaciones.

Figura 51: Máxima cobertura 20 estaciones

Fuente: Propia

El escenario propuesto de 20 estaciones nos da como resultado una distancia media entre las estaciones propuestas de 1150 metros, a su vez cubriría el 40% de la demanda requerida, dicha información se puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13: Resultados máxima cobertura 20 estaciones

Fuente: Propia (2019)

Estaciones	Distancia entre estaciones (m)	Distancia máxima (m)	%
	Media		
20	1149.6	1285.85	40.08

En la Figura 52, se presenta la distribución para un escenario de 30 estaciones.

Figura 52: Máxima cobertura 30 estaciones

Fuente: Propia

El escenario propuesto de 30 estaciones nos da como resultado una distancia media entre las estaciones propuestas de 230 metros, a su vez cubriría el 60% de la demanda requerida, dicha información se puede observar en la Tabla 14.

Tabla 14: Resultados máxima cobertura 30 estaciones

Fuente: Propia (2019)

Estaciones	Distancia entre estaciones (m)	Distancia máxima (m)	%
	Media		
30	228.3	253.9	60.30

En la Figura 53, se presenta la distribución para un escenario de 40 estaciones.

Figura 53: Máxima Cobertura 40 estaciones

Fuente: Propia

El escenario propuesto de 40 estaciones nos da como resultado una distancia media entre las estaciones propuestas de 150 metros, a su vez cubriría el 62% de la demanda requerida, dicha información se puede observar en la Tabla 15.

Tabla 15: Resultados máxima cobertura 40 estaciones

Fuente: Propia (2019)

Estaciones	Distancia entre estaciones (m)	Distancia máxima (m)	%
	Media		
40	148.1	193.7	62.50

En la Figura 54, se presenta la distribución para un escenario de 50 estaciones.

Figura 54: Máxima cobertura 50 estaciones

Fuente: Propia

El escenario propuesto de 50 estaciones nos da como resultado una distancia media entre las estaciones propuestas de 58 metros, a su vez cubriría el 80% de la demanda requerida, dicha información se puede observar en la Tabla 16.

Tabla 16: Resultados máxima cobertura 50 estaciones

Fuente: Propia (2019)

Estaciones	Distancia entre estaciones (m)	Distancia máxima (m)	%
	Media		
50	58.2	73.2	79.49

De los resultados obtenidos en la Tabla 17, se observa que la propuesta de 30 estaciones es la que mejor resultados arrojó, debido a que la distancia media entre estaciones es la recomendada de 230 metros, asimismo cubriría en 60% de la demanda requerida.

Tabla 17: Resultados máxima cobertura

Fuente: Propia (2019)

Estaciones	Distancia entre estaciones (m)	Distancia máxima (m)	%
	Media		
10	2741.4	3002.77	15.67
20	1149.6	1285.85	40.08
30	228.3	253.9	60.30
40	148.1	193.7	62.50
50	58.2	73.2	79.49

Se debe enfatizar que las estaciones propuestas son múltiplos de 10, debido a que puede ser cualquier número entero que determine valores cercanos a las distancias recomendadas de caminatas hasta la estación más próxima y también por el criterio de población dentro del área de influencia.

4.2. Localización de las estaciones óptimas

La localización de las estaciones viene determinada por la demanda potencial asignada, en función de cada uno de los escenarios planteados. Esta localización determina la accesibilidad de cada una de las estaciones en los diferentes escenarios. En la Figura 55 se presentan los resultados obtenidos siendo el escenario de 30 estaciones el que más alcance tiene sobre la población.

Figura 55: Estaciones óptimas San Borja - Lima

Fuente: Google Earth (2019)

En la figura superior se observa la distribución de las estaciones, tanto las 10 estaciones existentes del programa San Borja en Bici (Estaciones obligatorias), como las 20 estaciones completarias obtenidas. En la Tabla 18 se presentan los resultados y los nombres de las estaciones óptimas.

Tabla 18: Nombre de las 30 estaciones

Fuente: Propia (2019)

Nº Estación	Estación
1	Estación Luis Aldana
2	Estación Bailetti
3	Estación Violetas
4	Estación La Cultura
5	Estación Boulevard
6	Estación Alonso de Arco
7	Estación Jean Luis Forain
8	Estación Jr. 2
9	Estación Parque del Norte
10	Estación Aviación
11	Estación San Borja Norte
12	Estación Ebony
13	Estación San Borja Sur
14	Estación San Luis
15	Estación Buenavista
16	Estación Daltón
17	Estación Calle 29
18	Estación Manuel Piqueras
19	Estación Angamos
20	Estación Primavera
21	Estación Mascagni
22	Estación Esmeraldas
23	Estación Velasco Astete
24	Estación Joaquin Valverde
25	Estación López de Ayala
26	Estación Juan Gris
27	Estación Eduardo Ordoñez
28	Estación Picasso
29	Estación Fray Luis de León
30	Estación José Orozco

En las Figuras 56 y 57, se observan lugares en donde nos dio como resultado la localización óptima de las estaciones, las cuales fueron movidas a sitios cercanos que pudieran albergar las estaciones.

Figura 56: Estación Jr.2

Fuente: Propia (2019)

Figura 57: Estación Jean Luis Forain

Fuente: Propia (2019)

4.3. Reducción tiempos de viaje

4.3.1. Escenario Actual

El escenario actual tiene como punto de salida la estación San Borja Sur y punto de llegada la estación Parque del Norte, ambas estaciones pertenecientes al programa San Borja en Bici. La estación San Borja Sur es una generadora de viajes, ya que permite la intermodalidad con la línea 1 del tren eléctrico. La estación Parque del Norte es una receptora de viajes, puesto que está ubicada en el subsector 7C, el cual es el más poblado del distrito. En la Figura 58 se muestra el recorrido del escenario actual.

Figura 58: Escenario actual

Fuente: Propia (2019)

En la Tabla 19, resultados de la simulación en el escenario actual se puede observar que el tiempo de viaje promedio de ir desde el punto de partida al punto de llegada es de aproximadamente 750 segundos.

Tabla 19: Resultados simulación escenario actual

Fuente: Propia (2019)

Sentido	Tiempo de modelación	Distancia (m)	Volumen Modelo	Tiempo de viaje promedio (seg)
AB	900-4500	2420	32	765.44
BA	900-4500	2418	24	741.49

4.3.2. Escenario Propuesto

El escenario propuesto tiene como punto de salida la estación San Borja Sur y punto de llegada la estación Juan Gris, la primera perteneciente al programa San Borja en Bici y la segunda resultado de la localización óptima de estaciones propuestas. La estación San Borja Sur es una generadora de viajes, ya que permite la intermodalidad con la línea 1 del tren eléctrico. La estación Juan Gris es una receptora de viajes, puesto que está ubicada en el subsector 7C, el cual es el más poblado del distrito. En la Figura 59 se muestra el recorrido del escenario propuesto.

Figura 59: Escenario propuesto

Fuente: Propia (2019)

En la Tabla 20, resultados de la simulación en el escenario propuesto se puede observar que el tiempo de viaje promedio de ir desde el punto de partida al punto de llegada es de aproximadamente 515 segundos.

Tabla 20: Resultados simulación escenario propuesto

Fuente: Propia (2019)

Sentido	Tiempo de modelación	Distancia (m)	Volumen Modelo	Tiempo de viaje promedio (seg)
AB	900-4500	1558	33	526.60
BA	900-4500	1558	23	501.40

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Luego de realizar el análisis de máxima cobertura en los escenarios planteados de 10, 20, 30, 40 y 50 estaciones; obtenemos que la propuesta de 30 estaciones es el que mejor resultado nos arrojó con una distancia media entre las bases de 230 m, haciendo de este un modelo de transporte atractivo para los usuarios debido a que las estaciones están cerca a su lugar de origen o destino.

Asimismo, el análisis de máxima cobertura con la propuesta de 30 estaciones nos dio como resultado que se logra cubrir el 60% de la demanda requerida, permitiendo a más vecinos del distrito integrarse al sistema.

Para la calibración y validación del modelo de Wiedemann 74 se utilizó como parámetro de eficiencia al tiempo de viaje promedio de bicicletas. En base al análisis, se obtuvieron parámetros de distancia promedio (Ax) = 2, distancia de seguridad deseada (Bx) = 2 y ($Bxmult$) = 3 que caracterizan al estilo de manejo de los ciclistas.

En el proceso de microsimulación del proyecto, los valores obtenidos en la calibración fueron muy cercanos a los obtenidos en el campo, ya que, la diferencia de medias fue de 0,12 encontrándose dentro del intervalo de confianza asumido en 95%, y así logrando que el sistema fuera calibrado.

Al comparar los resultados de ambas simulaciones se tiene que en el escenario actual el tiempo de viaje promedio es de 750 segundos mientras que en el escenario propuesto el tiempo de viaje promedio es de 515 segundos. Los resultados nos permiten asegurar que localización óptima de las estaciones de bicicletas públicas en el distrito de San Borja utilizando la metodología de máxima cobertura reduce en 30% los tiempos de viaje en bicicleta.

Las mejoras deben ser enfocadas no solo en un usuario, sino deben fomentar la interconexión de los distintos modos de transporte que se presentan en la intersección. Es decir, se deben incluir paraderos inclusivos y estacionamientos para bicicletas para que este último medio de transporte pueda articularse con el transporte público. Esto también debe complementarse con una red integral de ciclovías en la ciudad.

Finalmente, este proyecto no solucionara la problemática del sistema San Borja en Bici, sino que propone mejorar el tiempo de traslado de los usuarios que usan el sistema de bicicletas como medio de transporte, de ser favorables, implementar las mejoras en otros puntos de la ciudad que presenten una situación similar.

5.2. Recomendaciones

En cuanto a las recomendaciones para que los resultados del análisis de la microsimulación sea más parecido a la realidad, es tomar en cuenta las intersecciones cercanas a la zona de estudio, ya que el tránsito en estas puede afectar directa o indirectamente a la que se está analizando.

Al realizar la recolección de datos observamos que existió un grupo de ciclistas que se trasladan en forma conjunta, ya sea de dos o tres individuos, que comparten una velocidad similar. Sabemos que el software VISSIM 9, aún no cuenta con alguna herramienta que permita agregar estos comportamientos.

El software VISSIM 9 pudo simular de manera real el comportamiento operacional del sistema. Se recomienda que para la optimización del ciclo semafórico se emplee la herramienta VISTRON, el cual no tuvimos acceso y se hizo el cálculo del ciclo semafórico óptimo de forma manual.

6. REFERENCIAS

ALCALÁ, Moisés (2016), Micro Simulación Del Tráfico De la Intersección De Las Avenidas Bolivar, Cordova y Calle Andalucía Empleando El Software Vissim 6. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Civil. Pontifica Universidad Católica del Perú.

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO Y GEHL STUDIO (2016). ¡A todo pedal! Guía para construir ciudades ciclo inclusivas en América Latina y el Caribe.

BICIREN (2012). Manual de diseño para infraestructura de ciclovías. Bicired, 1, 210

CABRERA, Félix (2018), Curso de Gestión del Tránsito: Manual para el uso de Vissim 8. Lima: Pontifica Universidad Católica del Perú.

DEXTRE, Juan y AVELLANEDA, Pau (2014). Movilidad en zonas urbanas. Lima: Pontifica Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial

ERIKSSON, Anne (2015) “Seguridad en el tráfico y percepción de seguridad”. En DEXTRE, Juan. Ciclistas y Ciclismo alrededor del mundo. Lima: Pontifica Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial.

FONTALVO, Ketty (2013). Modelación vehicular con el software PTV Vissim – Tramo Bomba El gallo – Bomba El Amparo. Cartagena: Universidad de Cartagena

LATORRE SÁNCHEZ, Marta. (2012). Localización óptima de bases de bicicletas públicas en Madrid mediante los Sistemas de Información Geográfica. (Tesis para optar el título de Master). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN Y COOPERACIÓN DE CHILE (1998). Recomendaciones para el diseño del espacio vial urbano REDEVU. Santiago: MPCCH.

MUNICIPALIDAD DE LIMA (2017). Manual de Criterios de Diseño de Infraestructura Ciclo – inclusiva y Guía de Circulación del Ciclista. Lima

MUNICIPALIDAD DE SAN BORJA (2012). Compendio Estadístico Municipal 2011. Lima: Municipalidad de San Borja.

MUNICIPALIDAD DE SAN BORJA (2016). (<http://www.munisanborja.gob.pe/>) Sitio Oficial de la Municipalidad de San Borja; contiene información del Programa San Borja en Bici (consulta 15 de Octubre del 2019)

NUÑEZ OLIVA, Ismael. (2012). Implantación de un sistema público de bicicletas eléctricas en la ciudad de Madrid. (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.

QUISPE CHAYÑA, Edwin. (2016). Micro-Simulación de ciclistas empleando Vissim 8: un caso aplicado en la ciudad de Lima. (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

REGHELLIN PALACOS, Antonella. (2018). La congestión vehicular en Lima Metropolitana entre los años 2012 y 2016 afecta económicamente a las empresas aseguradoras de vida y a sus trabajadores. (Trabajo de investigación para optar la licenciatura en Administración). Lima: Universidad de Lima.

RONDINELLA, Gianni. (2010). Cómo fomentar la bicicleta como modo de transporte urbano en las ciudades españolas. EXCELSIOR, 1, 115

7. ANEXOS

ANEXO 1	Plano de distribución San Borja
ANEXO 2	Plano de zonificación San Borja
ANEXO 3	Plano de zonificación San Borja – Densidad
ANEXO 4	Flujograma de bicicletas realizado el 19 de diciembre del 2019. En la ciclovía existente de la Av. San Borja Sur – San Borja. Elaboración propia.
ANEXO 5	Formato de aforo de ciclistas realizado el 19 de diciembre del 2019. En la ciclovía existente de la Av. San Borja Sur – San Borja. Elaboración propia.
ANEXO 6	Resultados metodología máxima cobertura para los distintos escenarios planteados de 10, 20, 30, 40 y 50 estaciones.
ANEXO 7	Tiempos de viaje para calibración en la ciclovía San Borja Sur
ANEXO 8	Tiempos de viaje para validación en la ciclovía San Borja Sur

Anexo 4: Flujograma de bicicletas realizado el 19 de diciembre del 2019. En la ciclovía existente de la Av. San Borja Sur – San Borja. Elaboración propia.

Anexo 5: Formato de aforo de ciclistas realizado el 19 de diciembre del 2019. En la ciclovía existente de la Av. San Borja Sur – San Borja. Elaboración propia.

FORMATO DE AFORO DE CICLISTAS

Ciclovía: Av. San Borja - Sur
 Fecha: 19/12/2019
 Aforador: Wiler Taipe
 H. Inicial: 6:00 a. m. H. Final: 11:00 a. m.

HORARIO	Bicicletas		TOTAL INT. X 15 MIN	TOTAL INT. X HORA
	A ---> B	B ---> A		
6:00 - 6:15	2	3	5	5
6:15 - 6:30	4	3	7	7
6:30 - 6:45	3	2	5	5
6:45 - 7:00	4	3	7	7
7:00 - 7:15	3	2	5	5
7:15 - 7:30	4	2	6	6
7:30 - 7:45	8	6	14	14
7:45 - 8:00	7	7	14	14
8:00 - 8:15	8	5	13	13
8:15 - 8:30	6	4	10	10
8:30 - 8:45	4	4	8	8
9:30 - 9:45	3	4	7	7
9:45 - 10:00	3	2	5	5
10:00 - 10:15	3	3	6	6
10:15 - 10:30	3	2	5	5
10:30 - 10:45	3	4	7	7
10:45 - 11:00	2	3	5	5
TOTAL	78	67		
VHMD	29	22		

Anexo 6: Resultados metodología máxima cobertura para los distintos escenarios planteados de 10, 20, 30, 40 y 50 estaciones.

Anexo 7: Tiempos de viaje para calibración en la ciclovía San Borja Sur

TIEMPO DE VIAJE CICLOVIA SAN BORJA SUR

N°	TIEMPO (S)	V(m/s)	V (km/h)
1	4.66	3.65	13.13
2	4.66	3.65	13.13
3	4.66	3.65	13.13
4	4.65	3.66	13.16
5	4.63	3.67	13.22
6	4.61	3.69	13.28
7	4.61	3.69	13.28
8	4.60	3.70	13.30
9	4.60	3.70	13.30
10	4.59	3.70	13.33
11	4.59	3.70	13.33
12	4.58	3.71	13.36
13	4.58	3.71	13.36
14	4.58	3.71	13.36
15	4.58	3.71	13.36
16	4.57	3.72	13.39
17	4.55	3.74	13.45
18	4.54	3.74	13.48
19	4.52	3.76	13.54
20	4.52	3.76	13.54
21	4.52	3.76	13.54
22	4.48	3.79	13.66
23	4.47	3.80	13.69
24	4.45	3.82	13.75
25	4.43	3.84	13.81
26	4.41	3.85	13.88
27	4.40	3.86	13.91
28	4.40	3.86	13.91
29	4.39	3.87	13.94
30	4.39	3.87	13.94
31	4.38	3.88	13.97
32	4.38	3.88	13.97
33	4.37	3.89	14.00
34	4.37	3.89	14.00
35	4.36	3.90	14.04
36	4.36	3.90	14.04
37	4.35	3.91	14.07
38	4.35	3.91	14.07
39	4.34	3.92	14.10
40	4.34	3.92	14.10

Distancia (m)	17
N° intervalos	7

Tabla de frecuencia de intervalos					
Rango	velocidades	Xm	f	h (%)	H (%)
13.13	13.27	13.20	5.00	0.13	0.13
13.27	13.41	13.34	11.00	0.28	0.40
13.41	13.55	13.48	5.00	0.13	0.35
13.55	13.69	13.62	2.00	0.05	0.58
13.69	13.82	13.76	2.00	0.05	0.85
13.82	13.96	13.89	5.00	0.13	0.95
13.96	14.10	14.03	10.00	0.25	1.00
Total			40.00	1.00	

T (s)	4.50
Vm (km/h)	13.62
Desv	1.2
Tmin (s)	4.34
Tmax (s)	4.66

Anexo 8: Tiempos de viaje para validación en la ciclovía San Borja Sur

TIEMPO DE VIAJE CICLOVÍA SAN BORJA SUR

N°	TIEMPO (s)	V(m/s)	V (km/h)
1	4.55	3.74	13.45
2	4.55	3.74	13.45
3	4.55	3.74	13.45
4	4.54	3.74	13.48
5	4.54	3.74	13.48
6	4.54	3.74	13.48
7	4.53	3.75	13.51
8	4.53	3.75	13.51
9	4.52	3.76	13.54
10	4.52	3.76	13.54
11	4.52	3.76	13.54
12	4.52	3.76	13.54
13	4.51	3.77	13.57
14	4.51	3.77	13.57
15	4.51	3.77	13.57
16	4.50	3.78	13.60
17	4.50	3.78	13.60
18	4.49	3.79	13.63
19	4.49	3.79	13.63
20	4.49	3.79	13.63
21	4.48	3.79	13.66
22	4.48	3.79	13.66
23	4.48	3.79	13.66
24	4.47	3.80	13.69
25	4.47	3.80	13.69
26	4.46	3.81	13.72
27	4.45	3.82	13.75
28	4.45	3.82	13.75
29	4.45	3.82	13.75
30	4.45	3.82	13.75
31	4.44	3.83	13.78
32	4.44	3.83	13.78
33	4.44	3.83	13.78
34	4.43	3.84	13.81
35	4.43	3.84	13.81
36	4.42	3.85	13.85
37	4.42	3.85	13.85
38	4.42	3.85	13.85
39	4.41	3.85	13.88
40	4.41	3.85	13.88

Distancia (m)	17
N° intervalos	7

Tabla de frecuencia de Intervalos					
Rango	velocidades	Xm	f	h (%)	H (%)
13.45	13.51	13.48	8.00	0.20	0.20
13.51	13.57	13.54	7.00	0.18	0.38
13.57	13.63	13.60	5.00	0.13	0.53
13.63	13.69	13.66	5.00	0.13	0.66
13.69	13.76	13.73	5.00	0.13	0.80
13.76	13.82	13.79	5.00	0.13	0.93
13.82	13.88	13.85	5.00	0.13	1.00
Total			40.00	1.00	

T (s)	4.48
Vm (km/h)	13.65
Desv	1.05
Tmin (s)	4.41
Tmax (s)	4.55