

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**MICRO SIMULACIÓN DE LA INTERSECCIÓN DE LAS AVENIDAS  
AREQUIPA Y ARAMBURÚ CON EL SOFTWARE VISSIM Y CON ÉNFASIS  
EN LA SEGURIDAD DEL CICLISTA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

**Felipe Alejandro Jibaja Moarri**

ASESOR: Ing. Félix Israel Cabrera Vega

Lima, octubre de 2018



Dedicado a mi padre y mi abuelo, quienes me inspiraron a seguir la carrera de Ing. Civil, al Ing. Felix Cabrera por sus conocimientos, paciencia y optimismo; a mi familia, amigos y profesores quienes me guiaron y apoyaron durante esta etapa.

## RESUMEN

El presente proyecto consiste en el estudio de la intersección de las avenidas Arequipa y Aramburú, en la ciudad de Lima. Se observaron distintos problemas relacionados a la gestión del tránsito y a la seguridad de los ciclistas y peatones, para los cuales se buscó proponer mejoras. El trabajo consistió en cinco etapas. En la primera, recolección de datos, se obtuvo la información necesaria para el estudio mediante filmaciones, mediciones y listas de chequeo. La segunda etapa correspondió a la construcción de un modelo de microsimulación en el programa computacional Vissim 8, donde se ingresaron los datos obtenidos en la primera etapa durante la hora punta. Luego, en la tercera etapa, se efectuó la calibración del modelo, es decir, mediante un análisis estadístico, se utilizó el parámetro de tiempos de viaje para comprobar que el modelo creado con el software representaba lo que ocurría en la intersección realmente. Después, en la cuarta etapa, se llevó a cabo la validación del modelo. En esta etapa, se ingresaron los datos registrados durante la hora valle, con el fin de verificar que el modelo de microsimulación serviría para replicar condiciones en distintos escenarios de la intersección de estudio. Finalmente, con el modelo de microsimulación calibrado y validado, se prosiguió con la última etapa correspondiente a la evaluación de propuestas de mejora. Estas fueron divididas en dos grupos, las mejoras en la geometría (islas de refugio, distribución de carriles, etc.) y las mejoras en la gestión del tránsito (tiempos del semáforo y señalización). Al identificar los problemas observados en la intersección, en complemento con los espacios en desuso, se obtuvieron soluciones que mejorarían de manera cuantitativa y cualitativa el tránsito en la intersección, especialmente la seguridad de los ciclistas. Las propuestas de mejora incluyeron cambios en el ciclo del semáforo y en la geometría de la intersección. Para comprobar que estas propuestas efectivamente mejorarían el tránsito en la intersección, se compararon parámetros de eficiencia como tiempos de viaje, demoras y velocidades entre el modelo original y el modelo nuevo. Luego de un análisis comparativo, se concluyó que si bien los tiempos de viaje de los vehículos motorizados en uno de los accesos se incrementaron en 50 segundos, su seguridad y la de los demás usuarios se vería beneficiada, además el rendimiento global de la intersección mejoró significativamente, reduciéndose las demoras en la red en 20 segundos. Por último, el modelo de microsimulación realizado en el programa Vissim 8 fue representativo en cuanto a las condiciones de la intersección en estudio, lo cual fue de gran ayuda para identificar las consideraciones a tener en cuenta para el diseño de una intersección inclusiva y sostenible.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Micro simulación de la intersección de las avenidas Arequipa y Aramburú con el software VISSIM y con énfasis en la seguridad del ciclista"  
Área : Movilidad y Transporte  
Asesor : ING. FELIX ISRAEL CABRERA VEGA  
Alumno : FELIPE ALEJANDRO JIBAJA MOARRI  
Código : 2013.0441.412  
Tema N° : # 84  
Fecha : Lima, 21 de setiembre del 2018



INTRODUCCIÓN

Por las características del tráfico de Lima, la forma más adecuada de representar la interacción entre vehículos y peatones es a través de los modelos de micro simulación. Pero para que estos sean válidos es necesario que se respeten sus fundamentos y se desarrollen obligatoriamente las etapas de calibración y validación. Lo anterior también incluye el uso de pruebas estadísticas debido a su carácter estocástico. Finalmente, con estos modelos es posible evaluar el impacto de las medidas de mitigación que se puedan proponer para mejorar los desplazamientos de todos los usuarios.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo general del proyecto es mejorar las condiciones de circulación de los distintos modos de transporte que interactúan en la intersección de estudio y en especial se busca conseguir la seguridad de los ciclistas.

Objetivos específicos

- Identificar las deficiencias en cuanto a seguridad, accesibilidad y gestión del tránsito en la intersección
- Mejorar los desplazamientos de todos los usuarios de la vía (peatones, ciclistas y conductores) desde un enfoque interdisciplinario que incluya a la micro simulación

PROGRAMA DE TRABAJO

El desarrollo de la tesis considerará los siguientes temas:

- a) Planteamiento del problema y objetivos de la investigación
- b) Antecedentes: modelos de simulación de tráfico, micro simulación vehicular y peatonal, diseño vial.
- c) Metodología de la investigación.

Yca

i

Gz

- d) Resultados.
- e) Conclusiones y recomendaciones.

#### METODOLOGÍA

La recolección y análisis de la información se desarrollará en 6 etapas: la recolección de los datos de campo (mediante técnicas manuales y filmaciones); la extracción de la información de los videos (en forma manual); la construcción de la red en VISSIM 8.0 y VISWALK 8.0; la calibración y validación del modelo (mediante pruebas no paramétricas y un nivel de confianza del 95%); las corridas del modelo y el análisis estadístico de los resultados. Finalmente, la evaluación de las propuestas de mejora.

#### REVISIONES

##### Primera Revisión:

- Objetivo general y objetivos específicos.
- Antecedentes

##### Segunda Revisión

- Metodología del trabajo.
- Recolección de datos de campo.

##### Tercera Revisión:

- Procesamiento y análisis de la información de campo.
- Conclusiones y recomendaciones.

#### NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.

  
G. Zavala




# Contenido

LISTADO DE FIGURAS.....	v
LISTADO DE TABLAS .....	vii
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Presentación del tema .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación .....	2
1.4 Metodología .....	3
1.4.1 Investigación documental.....	3
1.4.2 Recolección de datos y uso de software.....	4
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Movilidad sostenible y segura .....	6
2.1.1 Interacción de vehículos y bicicletas.....	6
2.1.2 Percepción de la seguridad.....	7
2.1.3 Seguridad real.....	8
2.2 Tipos de red de ciclovías .....	10
2.2.1 Vías segregadas .....	10
a. Vías integradas a la calzada .....	11
b. Vías integradas a la vereda.....	12
2.2.2 Vías no segregadas .....	13
c. Ciclocarril.....	13
d. Carril compartido .....	14
2.3 Diseño de la intersección .....	15
2.3.1 Prioridades de paso.....	16
2.3.2 Trayectorias de cruce .....	16
a. Intersección con vías ciclistas en separador lateral o ciclocarril.....	17
b. Cruce de vías ciclistas en separador central .....	18
2.3.3 Pintura y señalización.....	19
a. Pavimento.....	20
b. Señalización horizontal .....	21
c. Señalización vertical .....	23
2.3.4 Semaforización.....	26

2.4 Microsimulación .....	28
2.4.1 Modelación del tráfico .....	28
2.4.2 Tipos de modelos .....	28
a. Por el intervalo de tiempo .....	28
b. Por su nivel de detalle .....	29
c. Por su aleatoriedad .....	29
2.4.3 Fundamentos de la microsimulación.....	30
a. Warm up.....	30
b. Aleatoriedad .....	31
c. Modelo de seguimiento .....	31
d. Modelo de cambio de carril.....	35
2.4.4 Desarrollo del proyecto .....	35
a. Recolección de datos.....	36
b. Creación de la red.....	36
c. Chequeo de errores.....	36
d. Calibración .....	38
e. Validación .....	38
f. Análisis de nuevo escenario .....	39
2.4.5 Software Vissim para la microsimulación .....	39
a. Interfaz del programa .....	40
b. Objetos de red.....	41
c. Procedimiento.....	42
CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	44
3.1 Recolección de datos de campo .....	44
3.1.1 Equipo de trabajo.....	44
3.1.2 Videograbación.....	44
3.1.3 Aforo vehicular.....	46
3.1.4 Aforo de ciclistas .....	47
3.1.5 Aforo peatonal .....	47
3.1.6 Tiempos de viaje.....	47
3.1.7 Tiempo de semáforos.....	48
3.1.8 Lista de chequeos.....	49
3.2 Construcción del modelo .....	49
3.2.1 Imagen de fondo .....	49
3.2.2 Links y conectores .....	49

3.2.3	Composiciones y demandas vehiculares, peatonales y de ciclistas.....	50
3.2.4	Rutas estáticas .....	51
3.2.5	Fases de semáforos .....	52
3.2.6	Zonas de conflicto .....	52
3.2.7	Tiempos de Viaje.....	53
3.3	Calibración y validación .....	54
3.3.1	Corrección de errores y corridas del programa .....	54
3.3.2	Resultados y análisis estadístico.....	55
3.3.3	Validación.....	55
3.4	Evaluación de propuestas de mejora.....	55
3.4.1	Situación actual .....	55
3.4.2	Nuevo modelo .....	56
<b>CAPITULO 4: PROCESAMIENTO DE DATOS .....</b>		<b>58</b>
4.1	Área de análisis.....	58
4.1.1	Tránsito en la intersección.....	58
4.1.2	Accesos y rutas.....	60
4.1.3	Geometría de la zona de estudio .....	61
4.2	Aforo vehicular.....	63
4.2.1	Hora pico .....	64
4.2.2	Hora valle .....	65
4.3	Aforo de ciclistas y peatones .....	67
4.3.1	Hora pico .....	67
4.3.2	Hora valle .....	69
4.4	Tiempos de viaje.....	69
4.5	Tiempo de semáforos.....	70
<b>CAPITULO 5: CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO .....</b>		<b>72</b>
5.1	Imagen de fondo, links y conectores .....	72
5.2	Composiciones y demandas vehiculares, peatonales y de ciclistas .....	73
5.3	Rutas estáticas.....	74
5.4	Fases de semáforos .....	74
5.5	Zonas de conflicto.....	74
5.6	Parámetros de eficiencia .....	75
5.7	Calibración.....	75
5.8	Validación.....	77



CAPITULO 6: PROPUESTAS DE MEJORA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	80
6.1 Problemas encontrados .....	80
6.2 Nuevo modelo .....	81
6.2.1 Mejoras en la geometría .....	81
6.2.2 Mejoras en el control del tránsito .....	82
6.3 Parámetros de eficiencia .....	86
6.4 Análisis del modelo actual .....	88
6.5 Análisis del modelo con propuestas de mejora.....	91
6.6 Comparación de ambos modelos .....	92
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	96
BIBLIOGRAFIA .....	99



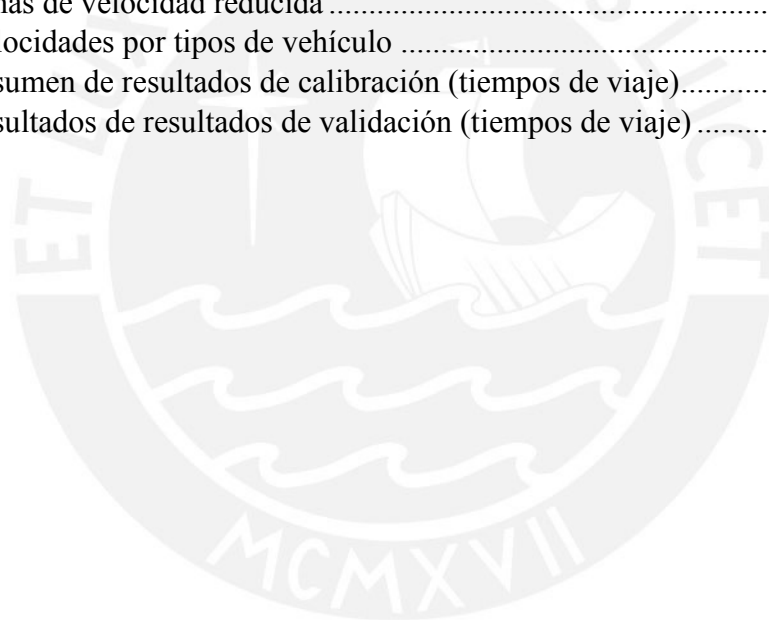
## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Modos de desplazamiento en Lima.....	1
Figura 2: Jerarquía de prioridades .....	6
Figura 3: Recomendaciones para decisiones de segregación o integración .....	9
Figura 4: Relación entre tipos de seguridad vial .....	10
Figura 5: Ciclovia bidireccional en separador central de la Av. Arequipa (Lima) .....	11
Figura 6: Ciclovia unidireccional en separador lateral (Groningen, Holanda).....	12
Figura 7: Ciclosenda bidireccional en corredor verde (Lima).....	12
Figura 8: Ciclocarril en la Av. La Paz, Miraflores (Lima).....	14
Figura 9: Zona 30 en la ciudad de Lima.....	14
Figura 10: Conflicto entre ciclista y automóvil en una intersección de Lima.....	15
Figura 11: Giro directo (línea de deseo) e indirecto (ruta obligada) para un ciclista ....	17
Figura 12: Giro a la izquierda en dos fases. ....	18
Figura 13: Giro a la izquierda con isla de refugio y en tres fases .....	19
Figura 14: Pavimento de color rojo en intersección en Lima.....	20
Figura 15: Pictograma de bicicleta y sus dimensiones .....	21
Figura 16: Líneas de demarcación para el pavimento de la ciclovia en una intersección .....	22
Figura 17: Símbolos de Zona 30 y Sharrow .....	22
Figura 18: Caja para bicicletas en San Francisco, California.....	23
Figura 19: Señales reglamentarias aplicables en infraestructura ciclovial.....	24
Figura 20: Señales preventivas orientadas a la seguridad del ciclista .....	25
Figura 21: Señal informativa dirigida al ciclista .....	26
Figura 22: Semáforos para bicicletas.....	27
Figura 23: Las cajas para bicicletas en un cruce con semáforos .....	27
Figura 24: Ejemplo de periodo de estabilización o warm up .....	31
Figura 25: Microsimulación en software Vissim .....	39
Figura 26: Interfaz del software Vissim .....	40
Figura 27: Esquema descriptivo del Programa Vissim .....	43
Figura 28: Metodología de trabajo .....	44
Figura 29: Punto de grabación.....	45
Figura 30: Vista desde el punto de grabación.....	45
Figura 31: Fases del semáforo .....	48
Figura 32: Imagen de fondo.....	49
Figura 33: Links y conectores con velocidad reducida .....	50
Figura 34: Demandas y composiciones .....	51
Figura 35: Rutas estáticas de acceso 2 (Av. Arequipa).....	51
Figura 36: Grupos, programas y líneas de parada de semáforos .....	52
Figura 37: Zonas de conflicto .....	53
Figura 38: Configuración de evaluación .....	54
Figura 39: Ventana de modificación de estilo de vía .....	57
Figura 40: Señales de restricción de giro a la izquierda para acceso de Av. Aramburú	59
Figura 41: Paradero en acceso de Av. Arequipa .....	59
Figura 42: Accesos vehiculares .....	60
Figura 43: Rutas peatonales y de ciclistas .....	61
Figura 44: Secciones para anchos de calzada, cruces peatonales y de ciclistas.....	62

Figura 45: Radios de giro .....	63
Figura 46: Flujograma vehicular en hora pico.....	65
Figura 47: Flujograma vehicular hora valle .....	67
Figura 48: Flujograma peatonal y de ciclistas en hora pico .....	68
Figura 49: Flujograma peatonal y de ciclistas en hora valle .....	69
Figura 50: Diagrama de fases del semáforo en hora pico .....	70
Figura 51: Diagrama de fases del semáforo en hora valle.....	71
Figura 52: Sección para tiempos de viaje en Av. Aramburú.....	75
Figura 53: Modelo calibrado .....	75
Figura 54: Análisis estadístico para calibración .....	76
Figura 55: Parámetros de Wiedemann.....	77
Figura 56: Modelo validado .....	78
Figura 57: Análisis estadístico para validación .....	78
Figura 58: Zonas en desuso en Programa Vissim .....	80
Figura 59: Rutas peatonales y de ciclistas .....	81
Figura 60: Fases y movimientos para el nuevo modelo .....	83
Figura 61: Propuestas de mejora .....	86
Figura 62: Señal de pre señalización .....	86
Figura 63: Secciones y puntos para medir parámetros de eficiencia.....	87
Figura 64: Tipo de vehículos en acceso de Av. Aramburú .....	88
Figura 65: Rutas vehiculares en acceso Av. Aramburú.....	88
Figura 66: Tipo de vehículos en acceso 2 de Av. Arequipa .....	89
Figura 67: Rutas vehiculares en acceso 2 de Av. Arequipa .....	89
Figura 68: Tipo de usuarios en ruta B-E .....	90
Figura 69: Tipo de usuarios en ruta E-B .....	90
Figura 70: Modelo con propuestas de mejora .....	91
Figura 71: Nuevo diagrama de fases con ciclo de 120 segundos .....	92
Figura 72: Captura de pantalla de animación 3D del nuevo modelo.....	92
Figura 73: Tiempos de viaje (s).....	93
Figura 74: Demoras (s).....	93
Figura 75: Velocidades (km/h).....	94
Figura 76: Rendimiento de la red: Demoras (s) .....	95

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Formato de aforo de vehículos .....	46
Tabla 2: Aforo peatonal y de ciclistas .....	47
Tabla 3: Formato de aforo de peatones y ciclistas con proporciones .....	47
Tabla 4: Formato de medición de tiempos .....	48
Tabla 5: Datos de carriles por acceso .....	61
Tabla 6: Anchos de cruceos .....	62
Tabla 7: Radios de giro.....	63
Tabla 8: Resumen de aforo vehicular en hora pico .....	64
Tabla 9: Resumen de aforo vehicular en hora valle .....	66
Tabla 10: Resumen de aforo peatonal y de ciclistas en hora pico.....	68
Tabla 11: Resumen de aforo peatonal y de ciclistas en hora valle .....	69
Tabla 12: Tiempos promedio y velocidades de giro .....	70
Tabla 13: Tiempos del semáforo en hora pico .....	70
Tabla 14: Tiempos del semáforo en hora valle.....	71
Tabla 15: Información y procedimientos para construir el modelo.....	72
Tabla 16: Zonas de velocidad reducida .....	73
Tabla 17: Velocidades por tipos de vehículo .....	74
Tabla 18: Resumen de resultados de calibración (tiempos de viaje).....	77
Tabla 19: Resultados de resultados de validación (tiempos de viaje).....	79



# CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Presentación del tema

La bicicleta es un medio de transporte que ha ido ganando mayor aceptación en el mundo debido a, primordialmente, la sostenibilidad, además de su bajo costo en uso y mantenimiento, los beneficios a la salud, eficiencia y facilidades como ciclovías y puntos de asistencia técnica. No obstante, en la ciudad de Lima, el porcentaje de usuarios que utiliza la bicicleta para movilizarse a su lugar de estudios o de trabajo es aún muy bajo. Según cifras de la encuesta Lima Cómo Vamos en el año 2016, este porcentaje fue solo del 0.3% en Lima Metropolitana (IOP-PUCP, 2016) tal como se muestra en la Figura 1.

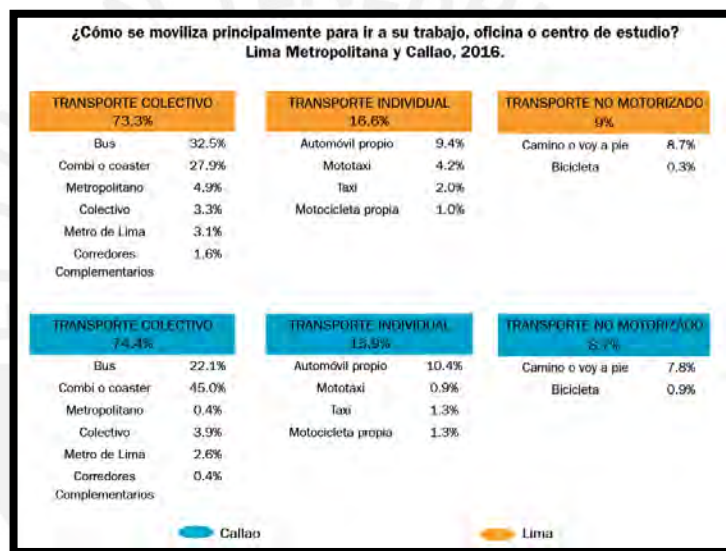


Figura 1: Modos de desplazamiento en Lima

Fuente: IOP-PUCP (2016)

La mencionada encuesta también indica que para movilizarse a sus centros de estudio o de trabajo, en Lima Metropolitana, el transporte colectivo es el más preferido (73.3%), seguido del transporte individual, es decir, automóvil propio, taxi o motocicleta (16.6%) y por último, el transporte no motorizado (9%), que incluye el ir a pie o en bicicleta. (IOP-PUCP, 2016)

Esta información podría traducirse en el desgano o falta de iniciativa de los ciudadanos en usar sus bicicletas debido a múltiples factores. Entre ellos la falta de ciclovías interconectadas en la ciudad y la vulnerabilidad frente a los vehículos motorizados, los cuales suelen tener la preferencia en el tránsito limeño.

Asimismo, el uso de vehículos motorizados en la ciudad se ha incentivado de diversas maneras, por ejemplo, implementando infraestructura vial que los beneficia, las facilidades para que los ciudadanos compren autos y la muy baja calidad del transporte público (Kitsuta, 2017). Esto, a su vez es contraproducente para los ciclistas, debido a que no se le da la misma importancia que a los usuarios de vehículos motorizados, dejándolos muchas veces de lado y obligándolos a utilizar otros medios de transporte.

La interacción entre ciclistas y conductores de vehículos motorizados es usual en zonas urbanas. Las ciclovías que actualmente existen suelen ir en paralelo a las avenidas o calles, ya sea de forma adyacente o por el medio, en la mediana (Municipalidad de Lima, 2017). Para que ambas vías coexistan y funcionen adecuadamente debe haber intersecciones que permitan el paso de alguno u otro modo de movilización.

Por ello, es de suma importancia mejorar las intersecciones de la ciudad de Lima, entendiendo la manera en que se diseñan con la ayuda de manuales y guías. Además, es importante conocer la interacción de los distintos modos que existen en las zonas urbanas, para lo cual se utiliza la microsimulación.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general del proyecto es mejorar las condiciones de circulación de los distintos modos de transporte que interactúan en la intersección de estudio y en especial se busca conseguir la seguridad de los ciclistas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos para esta tesis son los siguientes:

- Identificar las deficiencias en cuanto a seguridad, accesibilidad y gestión del tránsito en la intersección y proponer mejoras que consideren a todos los usuarios de la vía (peatones, ciclistas y conductores).
- Construir un modelo de microsimulación, a partir de datos reales, el cual refleje y permita analizar el tránsito y mejorar el desplazamiento de todos los usuarios en la intersección de estudio.

## **1.3 Justificación**

El problema de la seguridad en los cruces de ciclovías es importante de tratar debido a que influye en la percepción de seguridad que tienen los ciclistas para decidir si

utilizarlas o no (Dextre y Avellaneda, 2014). Además, considerando el congestionado tráfico de la ciudad de Lima, podría traducirse en la seguridad real de los ciclistas afectada por el gran parque automotor, el desorden y la imprudencia de los conductores en las vías que cruzan las ciclovías. De acuerdo a las cifras de accidentes de tránsito obtenidas por el INEI, en el año de 2015 un total de 44 095 vehículos menores se vieron involucrados en accidentes, de los cuales un 3.3% fueron bicicletas (INEI, 2016).

Además, fue muy discutida la propuesta del alcalde Luis Castañeda de construir un by-pass en la intersección de la Av. Arequipa con la Av. Aramburú. Esto debido a que no solucionaría el problema de la congestión del tránsito, sino que trasladaría el problema a cuadras adyacentes. Asimismo, induciría a la inseguridad de ciclistas y peatones, sin ser parte de un plan integral de movilidad urbana (Andina, 2017).

Buscar una solución al problema de la seguridad de las intersecciones en ciclovías les dará tranquilidad a los usuarios y se fomentará el uso de las bicicletas, el cual es mejor a otros medios de transporte en cuanto a costo de facilidades, espacio ocupado, emisiones contaminantes y beneficio a la salud (Rowangould y Tayarani 2016). El analizar un cruce en el que existe una ciclovía permitirá verificar si los ciclistas son los usuarios más vulnerables al momento de interactuar con los vehículos motorizados. Es así como se buscará un rediseño de la intersección que incremente la seguridad real de los ciclistas y mejore la movilidad en la zona.

## **1.4 Metodología**

### **1.4.1 Investigación documental**

En primer lugar, se llevará a cabo la revisión de la literatura relacionada al diseño de ciclovías urbanas. Esto se refiere a guías y manuales cuyo objetivo principal es promover el uso de la bicicleta para el transporte en la ciudad, de una manera práctica para nuestro medio, donde se detallan temas técnicos del diseño geométrico, señalización y semaforización de ciclovías (BiciRED, 2005). Se le dará mayor énfasis a todo lo relacionado al diseño de intersecciones de ciclovías y vías motorizadas.

Las fuentes a revisar también incluyen libros sobre movilidad urbana, en los cuales se explica, entre otros temas, los patrones de movilidad en Perú, el fomento de modos de transporte sostenible y la aplicación de criterios de movilidad en zonas urbanas (Dextre y Avellaneda, 2014). Literatura adicional consta de papers científicos, los cuales, por

ejemplo, dan a conocer resultados de la aplicación de alguna herramienta que mejore la seguridad en intersecciones de ciclovías con vías motorizadas en ciudades como Austin, en los Estados Unidos (Loskorn et al, 2013).

Adicionalmente, se deben estudiar fuentes relacionadas al manejo de programas de simulación de tránsito y los distintos tipos de modelo que se pueden utilizar. Además, se deben conocer los registros que deben obtenerse como datos de entrada para poder efectuar la simulación, los pasos a seguir para utilizar softwares como Vissim y, finalmente, los resultados y datos de salida que arrojará el programa y que serán de utilidad para el rediseño planteado en la tesis.

En segundo lugar, se procederá a observar y analizar la movilidad en una zona de Lima, la intersección ubicada entre la Av. Arequipa y la Av. Aramburú. Para lo cual se tomarán registros de la intersección en cuanto al tránsito vehicular, de ciclistas y de peatones, el estado del cruce (la señalización, semaforización, pavimentación y educación vial). Con esta información, se detectarán los problemas suscitados en dicha intersección desde el enfoque de la seguridad de los ciclistas.

#### **1.4.2 Recolección de datos y uso de software**

En cuanto a la metodología de trabajo, se debe empezar con el conocimiento del área de análisis, lo cual incluye su ubicación, nombre de las vías, tránsito (tipos de vehículos), accesibilidad y geometría de la intersección.

Asimismo, para la recolección de datos, se deben indicar los distintos accesos vehiculares y rutas peatonales y de ciclistas que se presentan en la intersección. Para facilitar el trabajo, estos pueden tener una nomenclatura numérica o con letras. Se debe registrar información como anchos de calzada, números de carriles por acceso y longitud de radios de giro. Todo esto será de utilidad para modelar la intersección en el software Vissim.

Además, se debe incluir la manera en que se recolectarán los datos, así como el equipo de trabajo a utilizar durante este proceso. Las opciones que existen son recolectar los datos en campo, observando y registrándolos en el propio lugar de la intersección, mientras que la otra opción consiste en realizar una videograbación desde un punto en el que se aprecie todo el tránsito de la intersección, y posteriormente recolectar los datos en gabinete.



Luego, se debe detallar cada uno de los aforos obtenidos en cuanto a vehículos, ciclistas y peatones. En lo que respecta al aforo vehicular, no solo debe incluirse las rutas que se toman al acceder a la intersección, sino también la proporción de cada tipo de vehículo (automóvil, camión, bus, etc) del total aforado.

El siguiente paso consiste en registrar los tiempos de los semáforos en la intersección. Esto es, el número de fases, ciclo total y tiempos de verde, rojo y ámbar para cada fase. Por último, con una lista de chequeo general para vías existentes se podrá colocar lo observado en el área de análisis respecto a señalización, demarcación, semáforos, peatones y ciclistas (CONASET, 2003).

En el caso de existir paraderos, se debe tomar los tiempos en los que los buses se encuentran detenidos, para luego obtener un promedio y modelarlo como un tiempo de parada en el programa. Asimismo, se deben tomar medidas de los radios de giro y tomar los tiempos que tardan los vehículos en girar, para poder hallar las velocidades de giro.

También es fundamental definir los parámetros de eficiencia (longitudes de cola, tiempos de viaje, demoras, etc.) para poder comparar el estado de la intersección original con el que incluya las propuestas de mejora. En este caso se considerarán tiempos de viaje, para lo cual se definirá una sección en la Av. Aramburú y otra en la Av. Arequipa. Este parámetro también será de utilidad para calibrar y validar el modelo.

Una vez que ya se tenga toda la información necesaria para modelar la intersección y llevar a cabo la microsimulación con el software Vissim, se debe calibrar el modelo, es decir, verificar que lo que se presenta en el programa tiene relación con lo que ocurre en campo. El siguiente paso es validar el modelo, lo cual significa certificar que el modelo creado puede funcionar para diversos escenarios de la intersección.

El modelo calibrado y validado ayudará a identificar los problemas encontrados en la intersección, para los cuales, en complemento de los manuales ya mencionados, se encontrarán soluciones en pos de la seguridad, accesibilidad y fluidez del tránsito. Es así como se propondrán mejoras para la intersección, tomando en cuenta los distintos modos que ahí se presentan y dando mayor énfasis a la seguridad de los ciclistas.

## CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Movilidad sostenible y segura

Dos puntos a tratar dentro del funcionamiento de una intersección de dos vías, donde una de ellas contiene una ciclovía son la movilidad urbana y la seguridad del ciclista. El comportamiento de los conductores de vehículos y los ciclistas al momento de interactuar en una vía o intersección debe ser tal que respete las normas de tránsito y las prioridades de los usuarios. Además, la infraestructura vial debe mejorar con el fin de que transportarse en bicicleta sea más seguro (Eriksson, 2015). Asimismo, existen dos maneras de calificar la seguridad en intersecciones de este tipo: la percibida por los usuarios y la real.

#### 2.1.1 Interacción de vehículos y bicicletas

El fin principal de las acciones que conciernen la movilidad urbana no debe ser la fluidez del tráfico, sino la seguridad de los usuarios como ciclistas y conductores (Dextre y Avellaneda, 2014). Es así como se plantea una jerarquía de prioridades (ver Figura 2), en la cual, si se ordena desde la máxima a la mínima prioridad, el ciclista ocupa el tercer lugar (siendo superado por los peatones y transporte público) mientras que el conductor de vehículo privado es el que menos prioridad tiene.

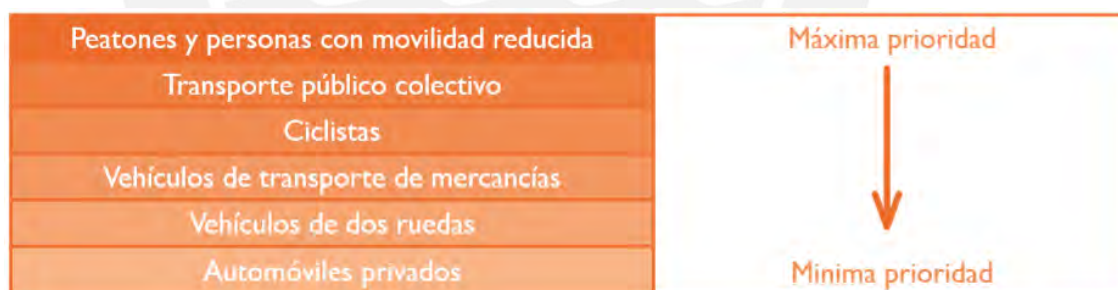


Figura 2: Jerarquía de prioridades

Fuente: Dextre y Avellaneda (2014)

No obstante, el diseño vial de la ciudad de Lima se ha efectuado en base a las necesidades del automóvil, dejando los espacios restantes para los otros modos de transporte (Dextre y Avellaneda, 2014). La falta de ciclovías integradas y seguras es uno de los motivos por los cuales los ciudadanos limeños no utilizan la bicicleta como un medio de transporte masivo. Además, la bicicleta no es reconocida como un medio intermodal de transporte, sino más como de recreación o deportivo (Defensoría del Pueblo, 2008).

Usualmente los accidentes de los ciclistas involucran a otros usuarios de la vía. Estos suelen ser los conductores de vehículos motorizados que carecen de una formación adecuada en cuanto a seguridad vial. Para esto, los conductores deben adaptarse a la situación de tener que interactuar con otros usuarios de la vía con mayor prioridad, como lo son los ciclistas.

También deben realizarse acciones sobre las intersecciones de ciclovías con vías motorizadas con el fin de facilitar el uso de la bicicleta. De esta forma, las mejoras en señalización, así como en el cruce y los semáforos que refuercen la prioridad del ciclista sobre el automóvil, incrementan notablemente la circulación en bicicleta (Dextre y Avellaneda, 2014).

Además, se debe tener una visión sostenible de la movilidad urbana. Para esto, se debe fomentar el uso de medios de transporte más económicos y menos contaminantes, como lo son la bicicleta o el transporte público. Asimismo, estos modos de transporte deben estar integrados permitiendo la intermodalidad, es decir, su coexistencia y una combinación tal que se favorezca el eficiente transporte de los usuarios (Dextre y Avellaneda, 2014).

Un claro ejemplo es el caso de la ciudad de Bogotá, en la cual el servicio Transmilenio de transporte público cuenta con grandes estacionamientos para bicicletas (TransMilenio, 2016). Este tipo de facilidades beneficia no solo a los ciclistas, sino a los usuarios del transporte público y a la movilidad urbana en general.

### **2.1.2 Percepción de la seguridad**

La seguridad percibida o subjetiva es qué tan seguros se sienten los usuarios frente a determinado punto de una vía al interactuar con el entorno del tráfico. Es esencial tener en cuenta este tipo de seguridad vial debido a que será finalmente la que determine la decisión tomada por un usuario en cuanto a utilizar cierta vía o cruzar determinada intersección (Dextre y Avellaneda, 2014).

La percepción de la seguridad considera más de un aspecto de su entorno, como el estado y diseño de las vías y el comportamiento de los usuarios. Por ejemplo, se espera que un ciclista este seguro y libre de accidentes con automóviles si viaja en una ciclovía separada del tráfico. No obstante, si dicha ciclovía no cuenta con iluminación adecuada ni espacio suficiente para poder girar, esta puede ser percibida como insegura (Eriksson, 2015).

Ejemplos como el mencionado indican que muchas veces la seguridad real y percibida no coinciden, es decir, en reiteradas ocasiones las intersecciones que son percibidas como inseguras, son en realidad las menos peligrosas (Dextre, 2015).

Asimismo, los accidentes que ocurren en puntos de una vía pueden dar una sensación de inseguridad a los futuros usuarios. Medidas como educación vial y un adecuado mantenimiento a los vehículos, cambiarán el comportamiento de los usuarios hacia uno más seguro que permita la reducción de accidentes.

En estudios realizados por Rowangould y Tayarani (2016) en la ciudad de Albuquerque, Nueva México, se explican los efectos de las facilidades para bicicletas en las decisiones del modo de transporte elegido. Dentro de lo más resaltante del estudio, la seguridad fue la mayor preocupación y el motivo más importante por el cual los ciclistas dejarían de usar sus bicicletas si no existiesen facilidades para las mismas.

### **2.1.3 Seguridad real**

La seguridad real, también conocida como objetiva, indica la cantidad y gravedad de los accidentes que ocurren en un punto de la vía, independientemente de si su diseño cumple o no con las normas viales (Dextre y Avellaneda, 2014).

Los factores más influyentes en la seguridad de una vía son el espacio con el cual esta se diseñó y la velocidad a la cual se circula. Un mayor espacio disponible brinda mayor seguridad a los usuarios. Sin embargo, las grandes dimensiones pueden inducir a altas velocidades por parte de los conductores de automóviles, lo cual aumentaría los índices de lesiones y muertes por accidentes (Eriksson, 2015). Por ello, el uso y función de la vía debe definirse integralmente, considerando que a mayor velocidad y volumen de vehículos motorizados, la separación con el ciclista debe ser mayor (Municipalidad de Lima, 2017). Esto último se explica mejor con el gráfico mostrado en la Figura 3.

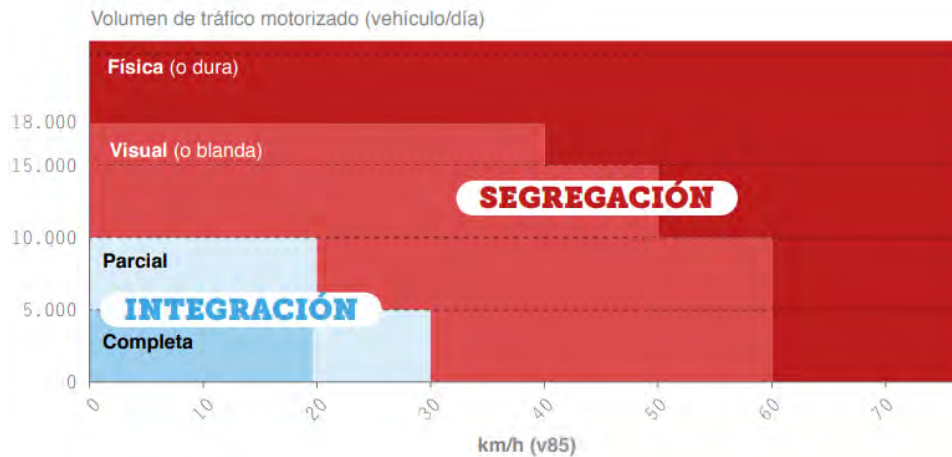


Figura 3: Recomendaciones para decisiones de segregación o integración

Fuente: Municipalidad de Lima (2017)

En intersecciones, sin importar sus dimensiones, es importante la buena visibilidad y las bajas velocidades, además de una correcta señalización que resalte la jerarquía correspondiente a los usuarios. Por ejemplo, en un estudio realizado en Austin, Texas, se verificó que las cajas para bicicletas en intersecciones resultan en un incremento del 92% de ciclistas que partían antes que los vehículos, mejorando significativamente el comportamiento y, por ende, la seguridad (Loskorn et al, 2013).

Medidas de seguridad como la mencionada deben implementarse con el fin de mejorar no solo la seguridad real de una intersección, sino también la percibida por los usuarios. La seguridad subjetiva mejoraría debido a que los ciclistas se sienten con mayor prioridad al utilizar las cajas de bicicletas, además de que los conductores de vehículos reducirían la velocidad y se detendrían por detrás de las cajas, aumentando la seguridad objetiva.

Por otro lado, un ejemplo en el que la seguridad percibida de una vía disminuye mientras que la seguridad real se mantiene igual es la promoción de spots publicitarios de accidentes en cruces de vías urbanas. El gráfico mostrado en la Figura 4 explica mejor la relación entre los tipos de seguridad vial frente a medidas tomadas en intersecciones.

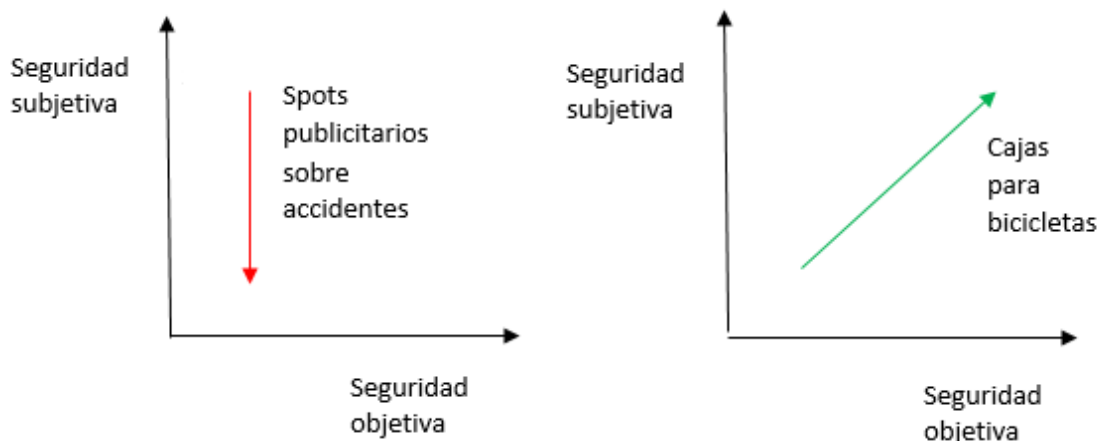


Figura 4: Relación entre tipos de seguridad vial

Fuente: Adaptado de Hauer (1999)

## 2.2 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 (mediana) o a los lados de la misma (BiciRED, 2005). Asimismo, se clasifican en segregadas y no segregadas en función a la separación que tienen con el tránsito motorizado (Municipalidad de Lima, 2017).

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.

### 2.2.1 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 del ciclista. Se prefieren en vías arteriales donde las velocidades superan los 40 km/h y los flujos son mayores a 10 000 vehículos por día.

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 vereda (Municipalidad de Lima, 2017).

### **a. 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 ciclovia. Es por este tipo de vía que los ciclistas transitan de forma independiente a los peatones y automóviles (Dextre y Avellaneda, 2014).

Las ciclovias pueden ser de dos tipos, dependiendo del sentido en el cual circulan los ciclistas. Si lo hacen en ambos sentidos, se trata de una bidireccional, mientras que si el tránsito es en un solo sentido, se habla de ciclovias unidireccionales.

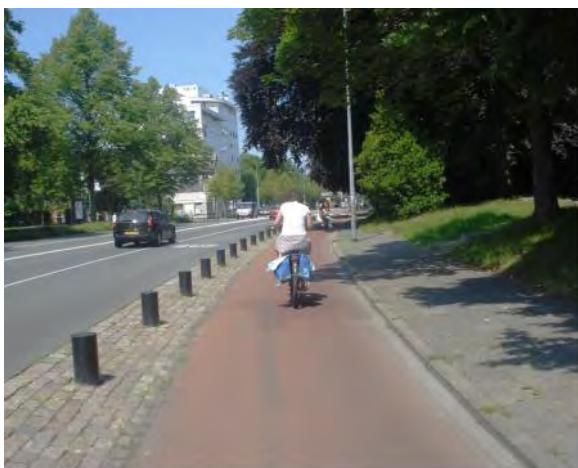
Una ciclovia bidireccional (ver Figura 5) es más efectiva si se encuentra integrada a avenidas por medio del separador central, en el cual son necesarios los desplazamientos en ambos sentidos para permitir el paso de un lado al otro de la vía (Municipalidad de Lima, 2017).



*Figura 5: Ciclovia bidireccional en separador central de la Av. Arequipa (Lima)*

*Fuente: Propia*

Por otro lado, una ciclovia unidireccional se prefiere en el costado derecho de una vía, tal como se observa en la Figura 6, permitiendo a los ciclistas circular en el mismo sentido del flujo vehicular, facilitando su ingreso a nuevas vías al cambiar de dirección (Municipalidad de Lima, 2017).



*Figura 6: Ciclovía unidireccional en separador lateral (Groningen, Holanda)*

*Fuente: Calderón (2017)*

### **b. Vías integradas a la vereda**

Cuando una vía para ciclistas se encuentra integrada a una vereda, se conoce como cicloacera. Al implementarla, se debe tener en cuenta que los ciclistas convivirán con los peatones, donde ambos grupos de usuarios deben circular de manera segura y cómoda. Esto se logra mediante anchos necesarios, pendientes máximas del 8% y señalización que evite conflictos en las intersecciones (Municipalidad de Lima, 2017).

Asimismo, existen las denominadas ciclosendas, las cuales se encuentran integradas a alamedas, corredores verdes o parques lineales. Un ejemplo puede apreciarse en la Figura 7. También son vías ciclistas compartidas con peatones que permiten mayor continuidad y recorridos más cortos, brindando una infraestructura más atractiva en términos paisajísticos (Municipalidad de Lima, 2017).



*Figura 7: Ciclosenda bidireccional en corredor verde (Lima)*

*Fuente: Calderón (2017)*



### **2.2.2 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 del tránsito motorizado es baja, no más de 30 km/h, y el flujo de vehículos también lo es, siendo de hasta 10000 vehículos al día. Algunos ejemplos de este tipo de entorno son el interior de barrios, zonas residenciales y centros históricos (Municipalidad de Lima, 2017).

Estas vías conectan a la red principal de ciclovías, es decir, complementan a las vías segregadas que usualmente son las más largas. Además, el sentido de circulación de los ciclistas siempre es el mismo al del tránsito motorizado. Las vías no segregadas pueden ser ciclocarriles o vías compartidas, dependiendo de la sección de la calzada por la cual los ciclistas comparten la vía con los vehículos.

#### **c. Ciclocarril**

Los ciclocarriles o carriles de bicicleta son franjas delimitadas en la calzada que ocupan espacio de un carril de circulación vehicular. Su sentido es siempre unidireccional, en el sentido del flujo vehicular de la vía. Si bien es una vía destinada al tránsito de ciclistas, los automóviles pueden pasar sobre ella con el fin de evitar algún obstáculo en la vía motorizada o ingresar o salir de estacionamientos (Municipalidad de Lima, 2017).

Contar con ciclocarriles permite que los vehículos reduzcan su velocidad y el tránsito se haga más seguro para los ciclistas, esto se logra reduciendo el ancho de la calzada adyacente al ciclocarril al mínimo permitido por la norma para que los vehículos vayan a una velocidad de 40km/h como máximo.

Debido a que este tipo de vía se encuentra adyacente a la calzada por donde pasan los vehículos motorizados, es de suma importancia la señalización y la pintura del pavimento. Usualmente, en ciudades como Lima se suelen pintar de color rojo para que de esta manera contraste con el color del asfalto y mejore la visibilidad de los ciclistas (Municipalidad de Lima, 2017). Esto puede visualizarse en el ciclocarril de la Figura 8, ubicado en la Av. La Paz, en Miraflores, Lima.



*Figura 8: Ciclocarril en la Av. La Paz, Miraflores (Lima)*

*Fuente: Google Street View (2015)*

#### **d. Carril compartido**

En este tipo de vía no segregada, la misma calzada es utilizada por ciclistas y conductores de vehículos motorizados. Estos últimos deben respetar a los ciclistas que transitan frente a ellos, yendo a su velocidad sin intentar sobrepasarlos. En zonas de vías compartidas, como también se les llama, la velocidad máxima a la que deben ir los automóviles es de 30 km/h, por lo cual se les suele llamar zonas 30. En Lima existen algunas zonas 30, como la que se muestra en la Figura 9.



*Figura 9: Zona 30 en la ciudad de Lima*

*Fuente: Pardo (2017)*

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. Adicionalmente, se deben colocar elementos de tráfico calmado como bolardos, bordillos o reductores de velocidad y la sección de

la vía debe ser reducida, con lo cual los vehículos se verán forzados a disminuir la velocidad (Municipalidad de Lima, 2017).

### 2.3 Diseño de la intersección

Las intersecciones son los puntos de encuentro entre los usuarios de distintos modos de una vía. En estos puntos se debe garantizar la seguridad vial de los usuarios, es decir, evitar conflictos y accidentes (conflicto observado en la Figura 10), además de la facilidad y eficacia al transitar la intersección (Municipalidad de Lima, 2017). Asimismo, el correcto diseño de una intersección permitirá que la percepción de la seguridad aumente para usuarios vulnerables como lo son los ciclistas, lo cual impulsará el uso, en este caso, de las bicicletas.



*Figura 10: Conflicto entre ciclista y automóvil en una intersección de Lima*

*Fuente: <https://www.revistasudor.com/inicio/confidencial/cicloviias-en-lima-una-verdad-incomoda/>.*

*Consulta: 20 de noviembre de 2017*

En las intersecciones es primordial fomentar las bajas velocidades de los vehículos motorizados y una buena visibilidad del espacio disponible (Eriksson, 2015). Se debe lograr que los cruces sean seguros en el sentido del respeto de las prioridades en la vía, coherentes desde el punto de vista de señalizaciones claras y buenas demarcaciones, y directos en cuanto a la fluidez del tránsito (Municipalidad de Lima, 2017).

### **2.3.1 Prioridades de paso**

En primer lugar, se debe conocer la jerarquía que cada usuario tiene al momento de utilizar una vía. Quienes tienen mayor prioridad son los peatones, seguidos por los ciclistas y, finalmente, los vehículos motorizados. Al conocer estas prioridades y fomentar su respeto mediante educación vial y señalización, los conflictos en las intersecciones se verán reducidos.

Del orden de prioridades mencionado, se desprenden medidas técnicas que no solo potenciarán el uso de medios de transporte sostenible, sino que además calmarán el tráfico motorizado y facilitarán la implementación de espacios públicos en la ciudad (Dextre y Avellaneda, 2014). Dichas medidas permiten al conductor de automóvil ser consciente de la presencia del ciclista y viceversa, lo cual vuelve a los usuarios más competentes, aumentando la seguridad subjetiva (Eriksson, 2015).

Como se mencionó anteriormente, la implementación de medidas que destaquen la prioridad de los ciclistas por sobre los automóviles, es beneficiosa no solo para la seguridad que los usuarios perciben de una intersección, sino también para la seguridad real de la misma. Así, los accidentes disminuirán en paralelo a un incremento en la cantidad de ciudadanos que usen su bicicleta como medio de transporte debido a que se sienten más seguros al utilizarlas.

### **2.3.2 Trayectorias de cruce**

En segundo lugar, para poder diseñar adecuadamente una intersección en la cual interactúen ciclistas con conductores de automóviles, se deben conocer las distintas líneas de deseo por las cuales el ciclista busca cruzar una vía motorizada de la forma más directa y coherente (Municipalidad de Lima, 2017). El hecho de estudiar las líneas de deseo (giros directos) corresponde a un entendimiento de las necesidades de movilidad que tiene el ciclista, lo cual permite estructurar la geometría de la intersección de tal forma que la ruta obligada (giro indirecto) se acomode a dichas necesidades, en complemento con los demás modos de transporte. Estas trayectorias se visualizan mejor en la Figura 11.

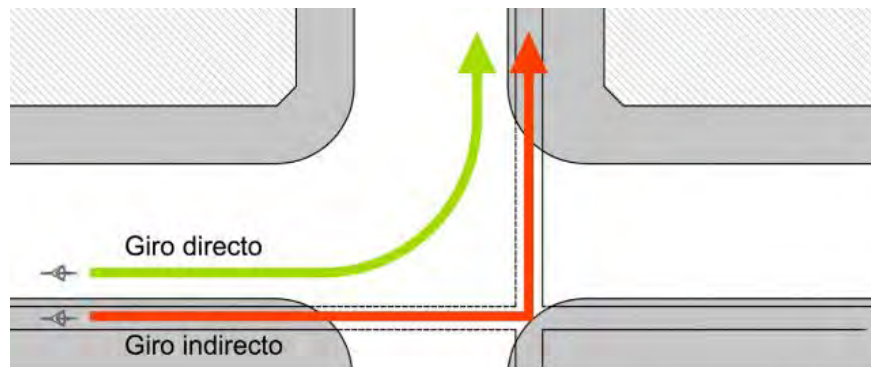


Figura 11: Giro directo (línea de deseo) e indirecto (ruta obligada) para un ciclista

Fuente: Municipalidad de Lima (2017)

Es importante destacar que los giros que realizan los ciclistas en las intersecciones presentan un alto riesgo de accidentes. Los que generan mayor conflicto usualmente son los giros hacia la izquierda (BiciRED, 2005).

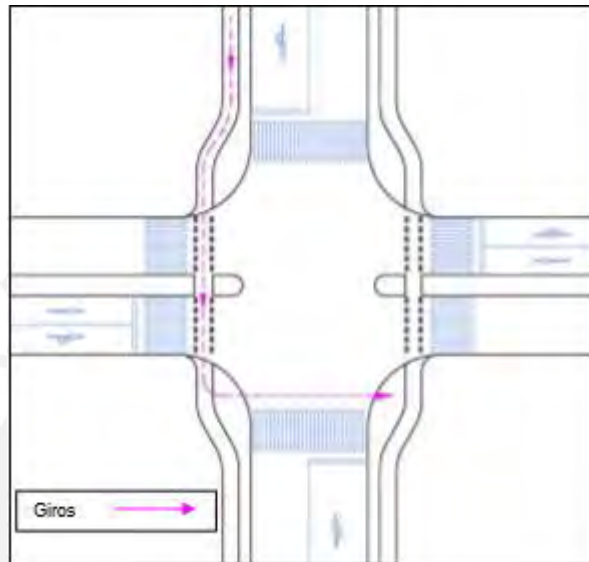
Las trayectorias que debe seguir un ciclista al momento de cruzar una vía dependen de distintos factores. Uno de ellos es el tipo de vía ciclista que cruza la vía motorizada. Otro factor es la dirección de dichas vías ciclistas. Finalmente, se encuentra el tipo y dirección de la vía motorizada con la cual la vía ciclista se intersecta. Es por esto que frente a cada caso de intersección, esta debe diseñarse de tal forma que se respeten las prioridades y las líneas de deseo. Esto, en conjunto, reducirá las tasas de accidentes, fomentando la seguridad en la intersección.

Los distintos tipos de intersección de una vía ciclista con una motorizada, clasificados en el Manual de Criterios de Diseño de Infraestructura Ciclo-inclusiva y Guía de Circulación del Ciclista de la Municipalidad de Lima (2017) se indican a continuación, con las respectivas trayectorias que el ciclista debe seguir en función a lo indicado en el Manual de Diseño para Infraestructura de Ciclovías de BiciRED:

**a. Intersección con vías ciclistas en separador lateral o ciclocarril**

En este tipo de intersección, las vías ciclistas pueden ser ciclovías o ciclocarriles, dependiendo de si son segregadas o no. Asimismo, dependiendo del sentido de la vía motorizada, estas pueden ser unidireccionales o bidireccionales. En cualquier situación, la trayectoria que debe seguir el ciclista en caso busque girar a la izquierda es en dos tiempos o fases, como puede visualizarse en la Figura 12 (BiciRED, 2005).

Si el ciclista desea seguir de frente por la ciclovía o ciclocarril, debe hacerlo cautelosamente para no entrar en conflicto con vehículos que doblen a la derecha. Una manera de reducir el riesgo de accidentes en estos casos es el de acercar a los ciclistas a los automóviles antes de que giren. Si bien los ciclistas pueden sentirse inseguros al estar muy cerca a los vehículos, esta solución permite que ambos usuarios sean conscientes el uno del otro (Eriksson, 2015).



*Figura 12: Giro a la izquierda en dos fases.*

*Fuente: BiciRED (2005)*

Si, por otro lado, el giro del ciclista es a la derecha, este debe realizarse con precaución debido a los vehículos que giran hacia el mismo sentido. Además, si hubiese espacio suficiente, se puede construir un atajo que permita girar a los ciclistas con más libertad desde una ciclovía a otra (BiciRED, 2005).

#### **b. Cruce de vías ciclistas en separador central**

En el caso de tener una ciclovía segregada en la mediana de una vía motorizada, los ciclistas deben cruzar con cuidado en el caso de querer seguir de frente, debido a que los autos pueden doblar en ambas direcciones. Cabe resaltar que la existencia de un camellón a nivel de la ciclovía permitirá al ciclista tener mayor seguridad al cruzar la vía motorizada. Además, si la ciclovía se intersecta con una vía motorizada bidireccional con tráfico moderado, lo ideal sería la construcción de una isla de refugio que proteja a los ciclistas al momento de cruzar la vía, tal como se indica en la Figura 13 (BiciRED, 2005).

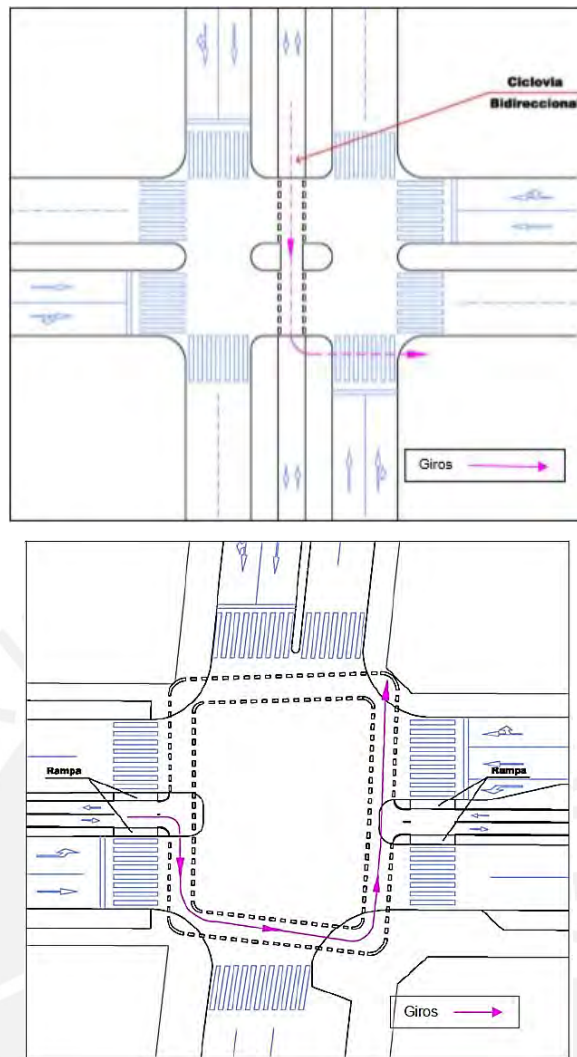


Figura 13: Giro a la izquierda con isla de refugio y en tres fases

Fuente: BiciRED (2005)

La trayectoria de giro del ciclista hacia ambas direcciones corresponde a la misma del caso de ciclovías laterales, es decir, en dos fases para el giro izquierdo y en una hacia el derecho. Asimismo, se deben considerar tres fases para los giros hacia la izquierda en el caso de que se trate de dos vías motorizadas bidireccionales y con elevado flujo de circulación (ver Figura 13) (BiciRED, 2005).

### 2.3.3 Pintura y señalización

En tercer lugar, entre las medidas más eficaces para mejorar la circulación de ciclistas se encuentran la señalización horizontal y vertical, así como el pintado del pavimento por el cual transitan las bicicletas. Pintar el pavimento de un color visible y contar con señalización que refuerce la presencia de los ciclistas es esencial para aumentar su

seguridad en las intersecciones con vehículos motorizados (Dextre y Avellaneda, 2014).

En los subcapítulos anteriores se habló acerca de las prioridades de paso y las trayectorias de cruce de los ciclistas en intersecciones. La pintura en el pavimento y la señalización, en conjunto con un diseño adecuado del espacio vial, son fundamentales para que lo mencionado pueda respetarse y para asegurar la convivencia de los distintos modos de transporte (Dextre y Avellaneda, 2014). A continuación, se explicarán diversas medidas de señalización que garantizan la seguridad del ciclista al interactuar con los automóviles.

#### **a. Pavimento**

Existen ciertas consideraciones generales referentes a los pavimentos de las ciclovías. Una de ellas es que su superficie debe ser antideslizante, uniforme, impermeable y de un color llamativo que diferencie visualmente a la ciclovía de las vías motorizadas. Esto se puede observar en la ciclovía mostrada en la Figura 14. Además, el material que se suele utilizar es el mismo que el de las pistas para vehículos, es decir, asfalto o concreto (BiciRED, 2005).



*Figura 14: Pavimento de color rojo en intersección en Lima*

*Fuente: Calderón (2017)*

Asimismo, es recomendable que la superficie de la ciclovía tenga una textura rugosa, que brinde seguridad frente al desplazamiento a lo largo de la intersección. Las recomendaciones para el acabado de los pavimentos se ven complementadas con las señalizaciones horizontales en la vía, las cuales se explicarán a continuación.



## b. Señalización horizontal

La principal función de este tipo de señalización es delimitar el espacio destinado a la circulación del ciclista, indicar el sentido del tránsito en la intersección y los puntos de detención. Dentro de las señales horizontales se encuentran las demarcaciones en las vías ciclistas, como las flechas, pictogramas y líneas, además de los símbolos de vías compartidas y los cajones para bicicletas (Municipalidad de Lima, 2017).

### Demarcaciones

Las demarcaciones son señales de control de tránsito utilizadas con el fin de orientar correctamente el desplazamiento del ciclista en las ciclovías e intersecciones (BiciRED, 2005). El símbolo o pictograma de la bicicleta pintado en el pavimento corresponde a la demarcación más importante. Este se suele ubicar al inicio y al final del tramo de la vía ciclista, indicando el sentido de circulación en conjunto con las flechas. En la Figura 15 se puede observar dicho pictograma con sus dimensiones (Municipalidad de Lima, 2017).



*Figura 15: Pictograma de bicicleta y sus dimensiones*

*Fuente: Ministerio de Transporte de Colombia (2016)*

Por otro lado, las líneas de demarcación varían de acuerdo a su función y al tipo de vía ciclista. En las unidireccionales, se utilizan líneas blancas, mientras que en las bidireccionales, amarillas. Asimismo, en las intersecciones, el pavimento pintado de rojo es delimitado por cuadrados blancos de 50 cm de lado cada 50 cm, como se muestra en la Figura 16 (Municipalidad de Lima, 2017).

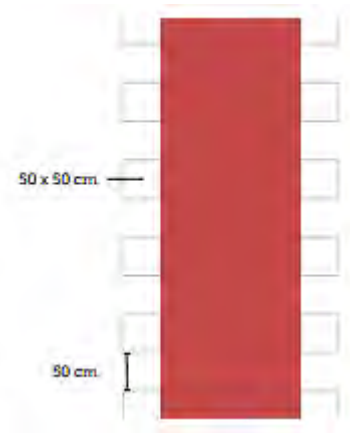


Figura 16: Líneas de demarcación para el pavimento de la ciclovía en una intersección

Fuente: Municipalidad de Lima (2017)

### **Símbolos en vías compartidas**

Las vías compartidas, como ya se explicó anteriormente, consisten en las calzadas compartidas por conductores de vehículos motorizados y ciclistas. Las señales de Zona 30, de espacio compartido con el ciclista (Sharrow) y de prioridad al ciclista son las principales, debiendo tenerse en cuenta que deben ser vistas no solo por los ciclistas sino también por los automóviles, por lo cual sus dimensiones son mayores y ocupan mayor parte de la calzada. Los símbolos de zona 30 y Sharrow se observan en la Figura 17 (Municipalidad de Lima, 2017).

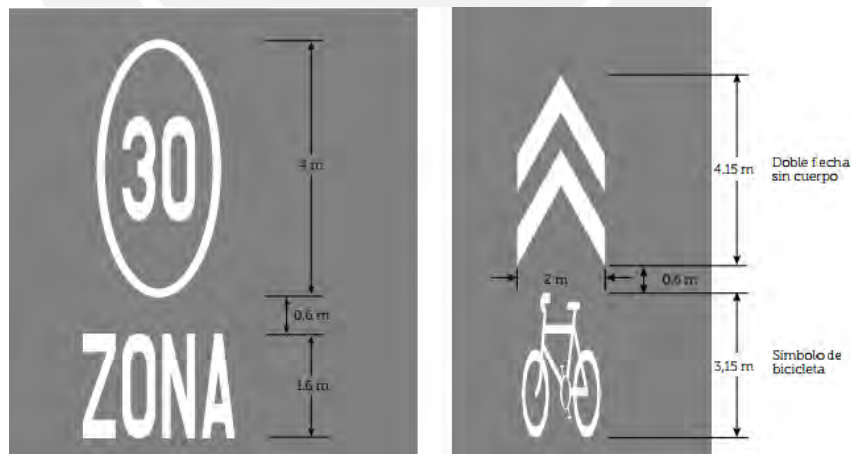


Figura 17: Símbolos de Zona 30 y Sharrow

Fuente: Municipalidad de Lima (2017)

### **Cajones de bicicleta o bike boxes**

Este es un tipo de señalización horizontal, en la cual un área de la calzada, brinda la posibilidad a los ciclistas de colocarse por delante de una cola de vehículos durante la fase del rojo en una intersección, tal como se observa en la Figura 18 (NACTO, 2011). Esto permite mejorar la percepción de seguridad de los ciclistas y también la seguridad real. En un estudio acerca de los efectos de las cajas de bicicletas en el comportamiento de los usuarios en las intersecciones, se encontró que los usuarios de vehículos motorizados daban el derecho de paso a los ciclistas con mayor frecuencia con la presencia de la caja de bicicleta (Loskorn et al., 2013).

Adicionalmente, los conflictos entre ciclistas que siguen de frente y vehículos que doblan a la derecha se ven reducidos gracias a las cajas de bicicletas (NACTO, 2011). Esta señalización, la cual funciona para vías ciclistas segregadas y no segregadas, también brinda protección a aquellos ciclistas que realizan giros a la izquierda (Municipalidad de Lima, 2017).



*Figura 18: Caja para bicicletas en San Francisco, California*

*Fuente: NACTO (2011)*

#### **c. Señalización vertical**

Las señales verticales consisten en dispositivos de control de tránsito ubicados usualmente al lado derecho de las vías y constan de un elemento de soporte, una placa y un símbolo (BiciRED, 2005). Este tipo de señalización tiene tres funciones fundamentales, los cuales son de reglamentar, prevenir e informar a los usuarios en la vía (MTC, 2016). A continuación se detallan los tres tipos de señalización vertical.

### **Señalización reglamentaria**

La finalidad de este tipo de señalización es notificar a los usuarios acerca del derecho de preferencia de paso, prohibiciones de ciertas maniobras, restricciones en el tránsito, obligaciones y autorizaciones en el uso de las vías (MTC, 2016).

Esta clase de señalización indica, entre otras cosas, puntos de detención, velocidades máximas, sentidos de circulación y prohibición de giros. Algunos ejemplos de señales reglamentarias aplicables a infraestructura de ciclovías son la señal de “pare”, “ceda el paso”, “prohibido voltear a la izquierda”, “prohibida la circulación de bicicletas”, “ciclovía” y “vía segregada motorizados-bicicletas”. Los símbolos para estas señales se muestran en la Figura 19 (Municipalidad de Lima, 2017).



*Figura 19: Señales reglamentarias aplicables en infraestructura ciclovial*

*Fuente: MTC (2016)*

### **Señalización preventiva**

Este tipo de señalización tiene como fin advertir a los usuarios de la existencia de riesgos y situaciones no previstas en la vía o en zonas próximas a ella. Gracias a estas señales, los usuarios pueden tomar las precauciones del caso, ya sea reduciendo la velocidad o efectuando maniobras que favorezcan no solo su seguridad, sino la de los demás usuarios de la vía (MTC, 2016).

El MTC define señales preventivas orientadas al conductor motorizado para advertirle de la presencia de los ciclistas y sus facilidades. Las señales que destacan la jerarquía de los ciclistas y advierten a los conductores son “ciclistas en la vía”, “cruce de ciclistas” y “ubicación del cruce de ciclistas”. Asimismo, existen señales preventivas orientadas al ciclista, como “vehículos en la cicloavía”, “tramo en descenso” y “tramo en ascenso”. Algunas de estas señales se observan en la Figura 20 (Municipalidad de Lima, 2017).

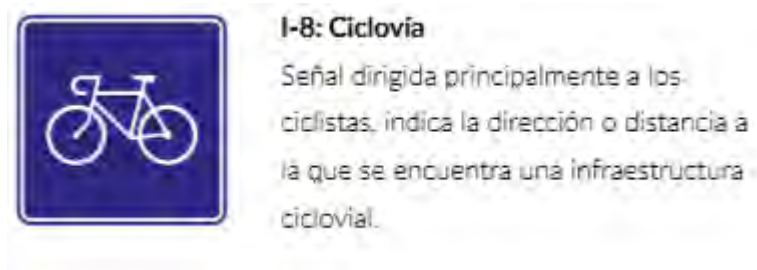


Figura 20: Señales preventivas orientadas a la seguridad del ciclista

Fuente: MTC (2016)

### **Señalización informativa**

El objetivo de esta clase de señalización es informar a los usuarios acerca de puntos notables, lugares de interés turístico o histórico y principales servicios generales en la vía, indicando su área de influencia, la distancia hacia ellos y la manera más directa posible de llegar (MTC, 2016). La única señal informativa vigente del MTC dirigida a ciclistas es la de “cicloavía” (ver Figura 21, que indica la dirección o distancia a la que se encuentra la infraestructura vial (Municipalidad de Lima, 2017).



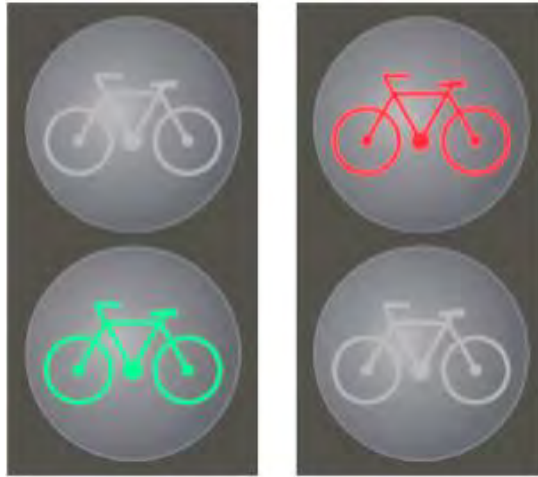
*Figura 21: Señal informativa dirigida al ciclista*

*Fuente: MTC (2016)*

### **2.3.4 SemafORIZACIÓN**

Finalmente, los semáforos son dispositivos de control de tránsito destinados a regular y controlar el tránsito vehicular motorizado y no motorizado por medio de luces que prohíben o permiten el paso (MTC, 2016). Dado que muchos de los accidentes de los ciclistas ocurren en las intersecciones, se recomienda que existan semáforos en las ciclovías que se crucen con vías motorizadas de flujo vehicular elevado o cuando el volumen de ciclistas sea alto (BiciRED, 2005).

Los semáforos para bicicletas deben instalarse a una altura y distancia adecuadas para ser vistos por los ciclistas, es decir, con las luces a no más de 3 metros ni menos de 2 metros sobre el nivel de la cicloavía, en la acera opuesta, adosados o no a los semáforos para vehículos motorizados. Debe existir una cara del semáforo por cada sentido de circulación de los ciclistas. Asimismo, estos deben contar con dos luces con un símbolo de una bicicleta inscritos en fondo negro: una de color rojo en la parte superior que indique su detención y la otra de color verde en la parte inferior que indique que las bicicletas pueden cruzar (ver Figura 22). Cuando esta última se prende de forma intermitente, significa que no se debe empezar a cruzar debido a que la luz cambiará a rojo (BiciRED, 2005).



*Figura 22: Semáforos para bicicletas*

*Fuente: Ministerio de Transporte de Colombia (2016)*

El ejecutar acciones puntuales a los semáforos en una intersección puede ser de gran beneficio para el uso de la bicicleta. Por ejemplo, regular el paso de bicicletas unos segundos antes que el resto de automóviles mediante el uso de un pictograma independiente o facilitando una posición adelantada de los ciclistas respecto a los autos (ver Figura 23) mejoraría la seguridad de circulación de las bicicletas (Dextre y Avellaneda, 2014). Asimismo, considerando que los ciclistas puedan tener sus propias señales de tránsito, se les puede hacer más visibles otorgándoles dos segundos de luz verde anterior a la de los automóviles o también retrasando la línea de parada de los autos en 5 metros (Eriksson, 2015).



*Figura 23: Las cajas para bicicletas en un cruce con semáforos*

*Fuente: NACTO (2011)*

## **2.4 Microsimulación**

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 (US Department of Transportation, 2004).

### **2.4.1 Modelación del tráfico**

Modelar el tráfico vehicular se basa en enfoques microscópicos y macroscópicos del comportamiento del flujo (Suarez, 2007). 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 (Alcalá, 2016).

### **2.4.2 Tipos de modelos**

Los modelos de simulación de tráfico pueden clasificarse de acuerdo al intervalo de tiempo de cambio de estado del sistema, en función al nivel de detalle de representación del tráfico y de la aleatoriedad con la cual presentan el flujo del tráfico (US Department of Transportation, 2004). A continuación, se presentan las distintas clasificaciones de los modelos de simulación.

#### **a. Por el intervalo de tiempo**

Una de las formas de clasificar los modelos de simulación consiste en la variabilidad de los intervalos de tiempo en los cuales el estado del sistema cambia. Existen dos tipos de modelos:

#### **Modelos de tiempo discreto (Time-Scan)**

Los modelos de tiempo discreto se presentan cuando el sistema se actualiza en intervalos fijos. Los sistemas de tráfico suelen ser modelados utilizando este tipo de modelo ya que experimentan continuos cambios de estado (US Department of Transportation, 2004).

#### **Modelos de evento discreto (Event-Scan)**

En los modelos de evento discreto, los intervalos de tiempo varían en duración y corresponden a intervalos entre eventos. Además, estos modelos son preferibles para



simular sistemas con cambios de estado poco frecuentes (US Department of Transportation, 2004).

#### **b. Por su nivel de detalle**

Otra manera de clasificar a los modelos de simulación es por el nivel de detalle con el cual representan la corriente del tráfico. Los tipos de modelo son los siguientes:

##### **Modelos microscópicos**

Los modelos microscópicos simulan el comportamiento de vehículos individuales, realizando sus trayectorias a medida que se mueven por la red. Existen algoritmos y reglas que describen como los vehículos se mueven e interactúan, como la aceleración, cambios de carril y maniobras de sobrepaso (US Department of Transportation, 2004). Los resultados que se obtienen al utilizar este tipo de modelo son los más exactos, no obstante, se requiere de un mayor tiempo de análisis que en un modelo macroscópico (Suárez, 2007).

##### **Modelos mesoscópicos**

Estos modelos consisten en simular grupos de vehículos como si fuesen uno solo. Asimismo, los movimientos de giro y los tiempos de entrada y de salida se hallan de forma singular por el mecanismo simulado (Fontalvo, 2013). Los modelos mesoscópicos simulan los vehículos individuales pero describen sus actividades basados en relaciones agrupadas (US Department of Transportation, 2004).

##### **Modelos macroscópicos**

Los modelos macroscópicos consideran las características del flujo del tráfico como genéricas. Dentro de estas características se encuentran la velocidad del flujo y la densidad del tránsito. Cabe resaltar que si bien los resultados obtenidos al utilizar este tipo de modelo no son los más detallados, son eficientes debido al corto tiempo de análisis requerido (Alcalá, 2016).

#### **c. Por su aleatoriedad**

Los modelos también pueden clasificarse de acuerdo a la aleatoriedad que presentan en el flujo del tráfico, de la siguiente manera:

### **Modelos determinísticos**

En este tipo de modelos, se asume que no existe variabilidad en las características de los conductores y de sus vehículos. Por ejemplo, se asume que todos los conductores tienen un tiempo de 5 segundos en los cuales se integran al flujo de tráfico, o que la longitud de los vehículos de pasajeros es de 4.9 metros (US Department of Transportation, 2004). Softwares como el SYNCHRO suelen basarse en modelos determinísticos.

### **Modelos estocásticos**

Por otro lado, 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 al de los modelos determinísticos los cuales solo se basan en ecuaciones matemáticas y desarrollan una única respuesta (Alcalá, 2016).

#### **2.4.3 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 (US Department of Transportation, 2004). Esta basada en fundamentos como el warm up o tiempo de estabilidad, la aleatoriedad, el modelo de seguimiento y de cambio de carril a utilizar.

##### **a. Warm up**

El tiempo de estabilidad para el ingreso de los vehículos a la red es conocido como warm up. Consiste en el periodo que se le da al modelo de simulación para que el número de vehículos aumente desde cero hasta una cantidad suficiente para que el sistema se encuentre en equilibrio y los vehículos brinden información estadística a la red (US Department of Transportation, 2004). Esta definición se apoya en el ejemplo de warm-up mostrado en la Figura 24.

En el momento en que la cantidad de vehículos ingresa a una tasa constante 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, longitudes de cola y tiempos de viaje (Dowling et al., 2004).



Figura 24: Ejemplo de periodo de estabilización o warm up

Fuente: Adaptado de US Department of Transportation (2004)

### b. Aleatoriedad

La aleatoriedad del modelo de microsimulación consiste en el número de corridas o repeticiones de mediciones necesarias para obtener resultados con un nivel de confianza esperado. Para obtener el número mínimo de repeticiones se requiere de la siguiente información: desviación estándar de la muestra, longitud esperada del intervalo de confianza y el nivel de confianza esperado (US Department of Transportation, 2004).

Asimismo, para poder tomar distintas decisiones que competen a los vehículos y conductores a lo largo de las corridas de la microsimulación, se necesita el denominado número de semilla. Este número es representado por características de los vehículos, es decir, si se trata de automóviles, camiones o buses, y también por la conducta que puede presentar el conductor, la cual puede ser agresiva o calmada frente a determinada situación (Alcalá, 2016).

### c. Modelo de seguimiento

Un modelo de seguimiento vehicular busca interpretar la interacción entre dos vehículos que viajan en una misma línea, denominados el líder y el seguidor.

Estos modelos tienen una aplicación importante en programas de microsimulación para estudiar el tráfico, por ejemplo, para análisis de capacidad, accidentes, redes, y para el diseño de intersecciones (Ranjitkar et al., 2005). Existen distintos tipos de

modelos de seguimiento en función al concepto en el cual se basan, los cuales se detallan a continuación:

### **Modelo de respuesta a estímulos**

Este modelo se basa en que la respuesta del conductor es proporcional al estímulo que percibe. Chandler et al. (1958) fue el primero en proponer un modelo lineal bajo este concepto, definiendo como único estímulo a la velocidad relativa, además de un tiempo de demora  $T$  y un factor de sensibilidad  $\lambda$  relacionados a la respuesta del conductor seguidor (Ranjitkar et al., 2005).

Posteriormente, en los laboratorios de General Motor se añadieron el espaciamiento y la velocidad al factor  $\lambda$ , dándole una forma no lineal al modelo. El punto débil de este modelo es que considera que todos los conductores tienen comportamiento similar y que las dimensiones de los vehículos no varían en el tráfico (Alcalá, 2016). La ecuación para el modelo de respuesta a estímulos se define de la siguiente manera (Ranjitkar et al., 2005):

$$a_n(t + T) = \lambda * \Delta V(t)$$

Donde:

$a_n(t + T)$ : respuesta o aceleración del vehículo seguidor al finalizar el tiempo de reacción  $T$

$\lambda$ : factor de sensibilidad que depende del conductor seguidor

$\Delta V(t)$ : velocidad relativa entre el vehículo líder y el seguidor (estímulo)

### **Modelo de distancia segura**

Este modelo de seguimiento, desarrollado por Kometani y Sasaki en 1959 y modificado por Gipps en 1981, se basa en que la velocidad elegida por el conductor seguidor es función de la distancia segura a la cual se encuentra del vehículo de adelante, para evitar colisionar con este. La modificación hecha por Gipps consiste en la posibilidad de calibrar el modelo asumiendo comportamientos del conductor como su aceleración o velocidad máxima por sentido común (Ranjitkar et al., 2005). La ecuación para el modelo de distancia segura de Gipps se detalla a continuación:

$$V_n(t + T) = \min\left\{V_n(t) + 2.5aT \left(1 - \frac{V_n(t)}{V}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V_n(t)}{V}}; bT + [b^2T^2 - b \left\{2[x_{n-1}(t) - x_n(t) - s] - V_n(t)T - \frac{V_{n-1}(t)^2}{b^*}\right\}]^{0.5}\right\}$$

Donde:

$V_n(t + T)$ : velocidad del vehículo n al finalizar el tiempo de reacción T

$V_n(t)$ : velocidad del vehículo n en el tiempo t

a: aceleración máxima

T: tiempo de reacción constante para todos los vehículos durante la simulación

V: velocidad deseada

b: máxima desaceleración

$b^*$ : máxima desaceleración percibida por el vehículo seguidor

s: tamaño efectivo del vehículo

$x_n(t)$ : ubicación de la parte delantera del vehículo n en el momento t

### **Modelo psicofísico**

Este tipo de modelo considera en el comportamiento del conductor sus aspectos psicofísicos. Un modelo que propone este concepto es el de Wiedemann, en el cual la percepción y reacción de los conductores frente a las situaciones de tráfico, como distancias y diferencias de velocidad, son la base de su movimiento en el modelo (Fontalvo, 2013).

Se diferencia de otros modelos en que considera la aceleración del vehículo líder como un estímulo para el vehículo que le sigue. Asimismo, los parámetros requeridos para este modelo son el tiempo de respuesta (T) y el espaciamiento deseado (S). Este tipo de modelo suele ser utilizado para propósitos de simulaciones (Ranjitkar et al., 2005).

El modelo de Wiedemann se basa en cuatro parámetros de conducción humana (Fontalvo, 2013), los cuales se detallan a continuación:

- **Primer parámetro, área de libre conducción:** se presenta cuando el conductor busca alcanzar cierta velocidad y mantenerla, dado que no existe ninguna interacción con el vehículo delantero ni con vehículos alrededor
- **Segundo parámetro, área de aproximación:** en este proceso el conductor busca adaptar su propia velocidad a la velocidad más baja del vehículo de adelante. La desaceleración ocurre hasta el punto en el que el conductor se encuentra a una distancia segura del vehículo delantero y la diferencia entre sus velocidades es cero.
- **Tercer parámetro, área de seguimiento:** ocurre cuando el conductor sigue al vehículo delantero manteniendo una distancia segura constante sin acelerar o desacelerar de manera consciente. En este parámetro, la diferencia de velocidades se aproxima a cero.
- **Cuarto parámetro, área de frenado:** en esta situación, si la distancia del conductor al vehículo de adelante se torna menor a la distancia segura, el conductor aplicará una desaceleración que puede ser de media a alta. Esto puede ocurrir debido a un cambio abrupto en la velocidad del vehículo líder o si un tercer vehículo hace un cambio de carril al frente del conductor estudiado.

### Otros modelos

Adicionalmente, existen otros modelos de seguimiento vehicular como el modelo basado en célula automática, el modelo de óptima velocidad y el basado en trayectoria. El modelo de seguimiento basado en célula automática fue introducido por Nagel-Schreckenberg en (1992) y los parámetros que se busca optimizar son la aceleración ( $a$ ) y la velocidad máxima deseada ( $V$ ) (Ranjitkar et al., 2005).

Asimismo, el modelo de óptima velocidad fue propuesto por primera vez por Bando et al. (1995) y se basa en que la respuesta del conductor seguidor en cierto momento es proporcional a la diferencia entre su velocidad óptima y su rapidez en ese momento. Por otro lado, el modelo basado en la trayectoria propone que un vehículo sigue la misma trayectoria del vehículo al cual sigue. Este modelo fue propuesto por Newell en el 2002 (Ranjitkar et al., 2005).

#### **d. Modelo de cambio de carril**

El último fundamento de la microsimulación consiste en las decisiones sobre cambios de carril que puede realizar el conductor debido a las condiciones del tráfico (Alcalá, 2016). Los principales tipos de cambios de carril que se presentan son los siguientes:

##### **Cambio de carril anticipado**

Esta acción por parte del conductor se presenta cuando este se antecede a demoras en el carril por el cual se encuentra transitando. Esto también se puede interpretar como que la velocidad deseada del conductor es mayor a la del vehículo de adelante, para lo cual efectúa lo que también es conocido como un cambio de carril libre (Alcalá, 2016).

Algunos factores por los cuales un conductor haría un cambio de carril anticipado serían la longitud de cola en la línea de parada, tráfico de camiones pesados o de buses, movimientos de giro en carriles compartidos, interferencia de peatones con vehículos que giran o acciones de estacionamientos (US Department of Transportation, 2004).

##### **Cambio de carril necesario**

Este tipo de cambio de carril ocurre cuando un vehículo requiere salir del actual carril en el que se encuentra circulando debido a diversos factores como el fin del carril, el tener que tomar una salida de la autopista, falta de adecuación del carril al tipo de vehículo o el bloqueo del carril debido a algún evento (US Department of Transportation, 2004).

#### **2.4.4 Desarrollo del proyecto**

Antes del modelado de la microsimulación, es necesario conocer el alcance del proyecto. Esto incluye definir el propósito, identificar áreas de influencia, seleccionar el modelo, elegir el programa (por ejemplo, software Vissim) y estimar el tiempo disponible. Es muy importante conocer las limitaciones de la microsimulación, así como asegurarse de que represente con precisión la operación del tráfico (US Department of Transportation, 2004).

Para que la microsimulación provea de valiosa información relacionada al desempeño del sistema actual de transporte y sus posibles mejoras, es fundamental seguir los procedimientos recomendados por el US Department of Transportation (2004). En primer lugar, antes del modelado, recolectar adecuadamente los datos. En segundo lugar, ya iniciando el modelado, efectuar la creación de la red y el chequeo de errores.

Después, debe realizarse la calibración con su respectiva validación. Por último, se debe analizar un nuevo escenario para poder realizar el reporte final con los resultados.

#### **a. Recolección de datos**

Una vez definido el alcance, se efectúa la recolección de datos, para lo cual deben obtenerse volúmenes de tráfico, mapas base y observaciones de campo (US Department of Transportation, 2004). Para lograrlo, se pueden utilizar equipos como cámaras de video las cuales registrarán por un tiempo determinado un video del tráfico de un sector. Luego, una vez realizadas las mediciones en campo y un inventario (lista de chequeos), este video se puede utilizar para realizar conteos de aforo, hallar velocidades, etc. Otro método sería realizarlo personalmente, escribiendo los parámetros ya mencionados en una libreta, por ejemplo.

#### **b. Creación de la red**

Para poder realizar el modelado, se procede a procesar los datos obtenidos y utilizarlos como datos de entrada, verificando la calidad y veracidad de los mismos. Para esto se deben organizar adecuadamente en tablas y gráficos.

El US Department of Transportation (2004) indica que existen 4 tipos de datos de entrada. El primero es la geometría de la red, es decir, el número, longitudes y curvatura de los carriles. El segundo corresponde al estado del control del tráfico, lo cual se refiere a las señales y sus tiempos.

Asimismo, los volúmenes de ingreso y de giro corresponden al tercer tipo de datos de entrada. Finalmente, se deben obtener los datos de calibración, tales como los conteos del tráfico, velocidades y colas.

#### **c. Chequeo de errores**

La etapa del chequeo de errores es muy importante debido a que permite hacer una adecuada calibración del modelo. Esto se hace en base al programa elegido y a los datos obtenidos de la red, en los que se involucran tres revisiones fundamentales, las cuales se explican a continuación:



### **Revisión de la precisión de los datos de entrada**

Para poder revisar que los datos de entrada hayan sido precisos, el US Department of Transportation (2004) recomienda la elaboración de una lista de chequeos, la cual puede dividirse en tres grupos: los relacionados a la geometría y señalización de la red, los que guardan relación con la demanda y los relacionados a las características del vehículo y conductor.

En cuanto al primer grupo, se debe revisar lo siguiente:

- La conectividad de la red
- La geometría de las conexiones (longitud de carril, número de carriles, etc.)
- Dispositivos de control en la intersección
- Giros prohibidos, carriles cerrados y restricciones en intersecciones

Asimismo, para el segundo grupo, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Proporciones de vehículos en cada entrada, acceso o cruce
- Zonas y medios para el tráfico
- Volúmenes que vayan en contra del conteo del aforo
- Porcentajes de giros
- Orígenes y destinos de viajes en la red

Finalmente, en cuanto al tercer grupo, se debe revisar lo que sigue a continuación:

- Dimensiones y tipos de vehículos
- Especificaciones sobre el desempeño de los vehículos

### **Revisión de la animación**

Una manera efectiva de identificar errores en los datos de entrada es realizando una simulación del modelo y revisando la animación resultante. El US Department of Transportation (2004) recomienda que el proceso de revisión de la animación se realice en dos etapas, las cuales son:

- Correr la animación con niveles muy bajos de demanda, tales que no exista congestión. Luego, hacer un seguimiento a los vehículos individuales e identificar cuando estos disminuyen inesperadamente su velocidad. Es en estos puntos donde se suelen presentar errores de ingreso de datos de entrada que

dificultan el movimiento de los vehículos a través de la red. Esta prueba debe repetirse bajo distintos pares de zonas de origen y destino.

- Una vez completada la prueba con niveles bajos de demanda, se procede a efectuar la simulación con la mitad de la demanda existente para el modelo, lo cual aún no es lo suficientemente alto para ocasionar congestión. Si aún se presentan disminuciones repentinas de velocidad, quiere decir que aún existen ligeros errores en los datos de entrada que afectan la distribución de los vehículos.

### **Revisión de errores en el software**

En cuanto al uso de cierto software para efectuar la microsimulación de un modelo, el usuario debe estar al tanto de las últimas actualizaciones del programa, así como de los tipos de inconvenientes que podrían encontrarse en su funcionamiento y las soluciones frente a tales problemas (US Department of Transportation, 2004).

#### **d. Calibración**

El siguiente paso para la microsimulación es la calibración del modelo, en la cual se comparan los parámetros de este último con aquellos que se pueden observar en el campo. Sin este procedimiento, no es posible tener la certeza de que el modelo reproducirá de forma acertada el comportamiento de la zona de estudio (US Department of Transportation, 2004).

Para calibrar el modelo se deben considerar valores estadísticos como el nivel de confiabilidad y un porcentaje de error de la media de los resultados obtenidos por el programa de simulación. Asimismo, se debe elegir un parámetro de dichos resultados para poder compararlo con su equivalente en el campo (Alcalá, 2016).

#### **e. Validación**

Una vez que el modelo ya está calibrado, se debe proceder a verificar que el modelo funcione ante una nueva situación, es decir, con un ingreso de nuevos datos de campo, los cuales se suelen tomar en otro día, a una hora distinta de la del modelo original. Este procedimiento se denomina validación del modelo, y consiste en comprobar que los resultados obtenidos en el programa utilizado, como tiempos de viaje o longitudes de cola, sean similares en ambos escenarios modelados.

#### **f. Análisis de nuevo escenario**

Finalmente, con el modelo debidamente revisado, calibrado y validado, y el alcance definido del proyecto, se prosigue con la puesta en marcha del modelo en el programa de microsimulación.

Con el modelo desarrollado, se procede a definir la demanda futura con la que se buscará analizar los resultados obtenidos. Esto se suele llevar a cabo con estudios de tasas de crecimiento, donde se asume que la demanda del tráfico irá en aumento en el futuro (US Department of Transportation, 2004)

Luego, las alternativas de análisis para el proyecto se deben generar según las mejoras que se buscan en la zona estudiada en base a los problemas encontrados para la demanda definida previamente (US Department of Transportation, 2004). Con la información obtenida y las propuestas de mejora, se evalúan los parámetros de eficiencia para el nuevo escenario (Alcalá, 2016).

Por último, con lo obtenido del análisis del proyecto y de las propuestas de mejora, se realizan conclusiones y recomendaciones fundamentadas por los resultados de la microsimulación con el software elegido, en este caso el Vissim 8.

#### **2.4.5 Software Vissim para la microsimulación**

Vissim es un software utilizado para efectuar microsimulaciones de tránsito y permite modelar la interacción entre distintos modos de transporte como vehículos, transporte público, bicicletas y peatones, tal como se muestra en la Figura 25. Además, es accesible en cuanto a la posibilidad de generar hasta las geometrías viales más complejas y atributos a los vehículos y conductores (PTV Group).



*Figura 25: Microsimulación en software Vissim*

*Fuente: PTV Group (2018)*

En este subcapítulo se indicarán algunos lineamientos para el correcto uso del programa Vissim 8 con el fin de microsimular la intersección de estudio de esta tesis. Se incluirán la interfaz del programa, los objetos de red y los pasos a seguir para poder microsimular un modelo. Todo esto se resume en el esquema mostrado en la Figura 27.

### a. Interfaz del programa

Al ingresar al programa Vissim, se puede observar en la pantalla tres áreas importantes, las cuales son objetos de red (rojo), zona de trabajo (verde) y la zona de listas (azul) (ver Figura 26).

En cuanto a la zona de trabajo, en ella se coloca el objeto de red elegido para ir creando la red e introduciendo las condiciones que asemejarán al modelo a la realidad. Asimismo, dentro de la zona de listas, se observa el resumen de los datos introducidos con los objetos de red, en base a lo recolectado en campo, por ejemplo, aforos vehiculares, de ciclistas y peatones

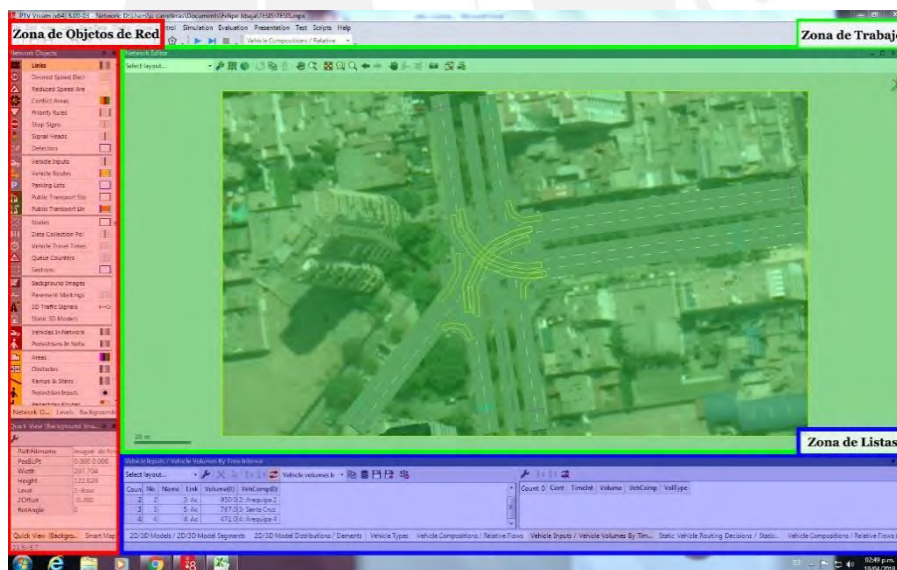


Figura 26: Interfaz del software Vissim

Fuente: Propia

Cabe destacar que es importante configurar el mouse de la computadora adecuadamente para que permita crear nuevos objetos de la red con el click derecho. Esto se realiza ingresando a la pestaña “Edit”, en la opción preferencias del usuario.

## **b. Objetos de red**

Los objetos de red son aquellos que, en conjunto, forman el modelo de la intersección en el programa de microsimulación. Para empezar, dentro de cada objeto de red, se encuentran distintos íconos y pestañas los cuales son los siguientes:

- Ícono del objeto: tiene como fin identificar y ubicar con facilidad el objeto de red
- Candado del objeto: su finalidad es permitir que determinado objeto de red se quede siempre en su posición (cuando el candado está cerrado)
- Descripción: se trata del nombre del objeto de red
- Variantes del tipo de red: algunos objetos de red, como las rutas de vehículos cuentan con una pestaña que despliega una lista de tipos de red, las cuales son estática, dinámica, parcial y de estacionamiento. La que se utilizará en esta tesis es la opción estática.
- Ícono de parámetros gráficos: este ícono da una idea de la forma del objeto de red cuando se le añade al modelo
- Ícono de etiquetas: consiste en determinar si los textos que se generan al añadir cierto objeto de red se pueden o no visualizar en el modelo

Los objetos de red a utilizar para efectuar el modelo de microsimulación son los siguientes:

- Background Image: consiste en la imagen de fondo sobre la cual se colocarán el resto de objetos de red. Puede ser obtenida de una captura de pantalla de Google Earth o de un plano de AutoCAD.
- Links: son los accesos de las vías y sus conectores que conforman la geometría de la intersección. En el programa se define el número y ancho de carriles, así como el tipo de vía (vehicular, de ciclistas o peatonal)
- Reduced Speed Areas: se refiere a las zonas de velocidad reducida, como el área ubicada en medio de la intersección o las trayectorias de giro de los vehículos.
- Conflict Areas: son zonas en las que existe conflicto entre dos vías que se cruzan. Haciendo click sobre estas zonas, se puede decidir cual vía tiene la

prioridad (color verde) cual no (color rojo), o si la prioridad la tiene aquel usuario que llega primero (ambas vías de color rojo).

- Priority Rules: son líneas que se ubican en el modelo para determinar la vía que tiene preferencia de paso. Los usuarios que tienen mayor prioridad son los peatones, después los ciclistas y por último, los vehículos.
- Signal Heads: son las líneas que indican la ubicación de un semáforo, para el cual deben definirse las fases y tiempos de verde, ámbar y rojo de cada fase.
- Vehicle Inputs: con este objeto se coloca la demanda de vehículos de cada vía, así como el porcentaje que le corresponde a cada tipo de vehículo. Esto también se aplica a peatones y ciclistas.
- Vehicle Routes: con este objeto se introducen las opciones de ruta que tienen los accesos de la intersección y también el porcentaje que le corresponde a cada ruta. Se utiliza también para las rutas peatonales y de ciclistas.
- Vehicle Travel Times: se utiliza para definir la sección sobre la cual se tomarán tiempos de viajes y poder calibrar el modelo de microsimulación.

### **c. Procedimiento**

Una vez conocidos la interfaz del programa y los objetos de red, se puede comenzar con la preparación del modelo de microsimulación. Para esto, debe contarse con la imagen que se pondrá de fondo para sobre ella colocar los conectores, puntos de parada y demás objetos de red.

Además, se debe haber realizado la visita a la intersección en estudio, en la cual se recolectaron datos como aforos, velocidades de giro, fases de semáforos, etc., los cuales se introducirán al programa Vissim para microsimular la intersección. Algunos de estos datos recolectados serán comparados con los resultados de la microsimulación del modelo para poder calibrarlo y, posteriormente, validarlo.

Cuando el modelo de microsimulación se encuentre validado, se procederá a implementar mejoras en la intersección, desde los puntos de vista de la accesibilidad, gestión del tránsito y seguridad, en especial la de los ciclistas. Luego, cuando se realice la microsimulación en el programa con el modelo mejorado, se compararán parámetros de eficiencia de este modelo con el original y así se verificará que lo propuesto mejorará la situación de la intersección.

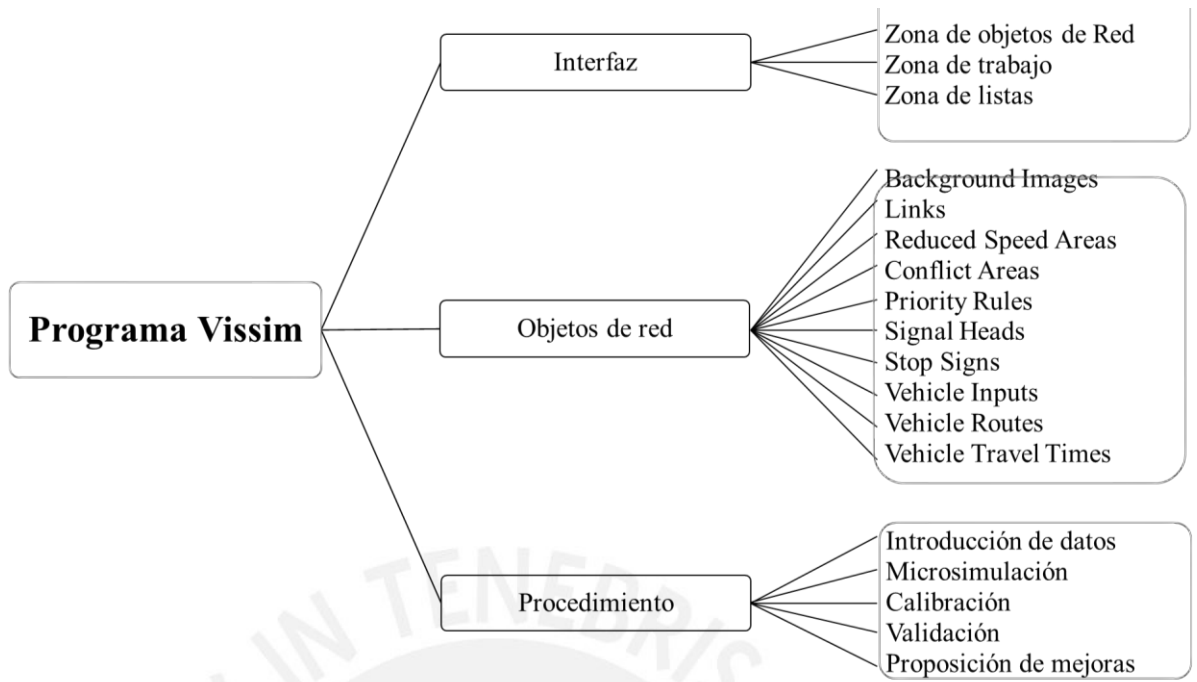


Figura 27: Esquema descriptivo del Programa Vissim  
Fuente: Propia

## CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE TRABAJO

En la Figura 28 se muestra un diagrama de flujo con los pasos incluidos en la metodología de la tesis.

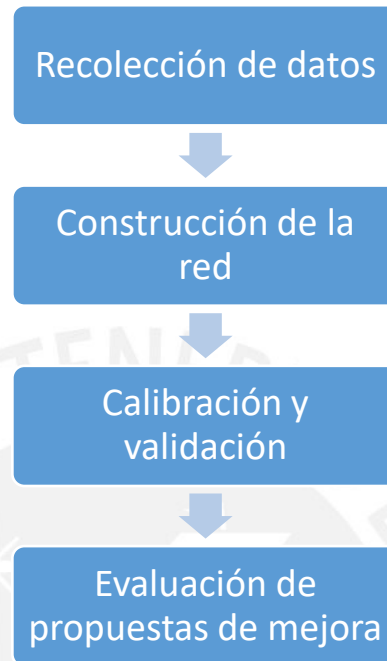


Figura 28: Metodología de trabajo

Fuente: Propia

### 3.1 Recolección de datos de campo

#### 3.1.1 Equipo de trabajo

Para poder recolectar los datos de la intersección que posteriormente se introducirán al programa, se realizaron filmaciones con una cámara Go Pro Hero 3+, utilizando un soporte con el cual la cámara se adhirió a la ventana del apartamento. Luego, los videos recolectados fueron observados en una laptop Dell Inspiron con procesador Core i3, de donde se recolectaron datos como aforos, velocidades y tiempos de semáforos.

#### 3.1.2 Videograbación

Para poder microsimular la intersección de las Avenidas Arequipa y Aramburú, además de calibrar y validar el modelo, fue necesario efectuar dos filmaciones de 1 hora cada una. La primera grabación (hora pico) se realizó el día martes 6 de marzo del 2018 a las 6:25pm, mientras que la segunda (hora valle) se efectuó el día miércoles 28 de marzo del 2018, a las 2:25pm. Estas se llevaron a cabo desde el 11vo piso del edificio situado en la esquina de las Avenidas Arequipa y Santa Cruz. El croquis de la ubicación del punto de filmación se observa en la Figura 29.



A pesar de haber filmado durante una hora el tránsito en la intersección, a partir de cierto punto el control del tránsito fue dirigido por un policía, cuyos tiempos serían complejos para modelar en el programa Vissim. Por ello, se considerarán los datos obtenidos solo durante el periodo en el que el tránsito en la intersección era controlado por semáforos. En el caso de la hora pico se consideraron los primeros 17 minutos, mientras que en el video de la hora valle fueron los primeros 28 minutos de filmación.

En la Figura 29 se muestra un croquis de la intersección, indicando el punto de grabación. Además, en la Figura 30 se puede observar una captura del video obtenido con la cámara para el registro de datos.



*Figura 29: Punto de grabación*

*Fuente: Adaptado de Google Maps (2018)*



*Figura 30: Vista desde el punto de grabación*

*Fuente: Propia*

### 3.1.3 Aforo vehicular

En primer lugar, para poder obtener el aforo vehicular se debe conocer el número de carriles de cada acceso y los tipos de vehículos que transitan. La Avenida Aramburú, es decir, el acceso 1, contaba con tres carriles. Por este acceso ingresaban automóviles, motos y algunos camiones. Los accesos 2 y 4, es decir, los correspondientes a la Avenida Arequipa, contaban con dos carriles cada uno y los tipos de vehículos que por ahí transitaban eran automóviles, buses, motos y camiones. En cuanto al acceso 3, proveniente de la Avenida Santa Cruz, contaba con dos carriles por los cuales transitaban automóviles, motos y algunos camiones.

El método para procesar los aforos vehiculares será contar el número de cada tipo de vehículo observado en las filmaciones y obtener el porcentaje del total de cada tipo, además de contar por separado cuantos siguen de frente, cuantos giran a la derecha y cuantos a la izquierda. Los tipos de vehículo a considerar son: autos (incluye automóviles, camionetas, minivans y combis), motos, buses y camiones. En la Tabla 1 se muestra el formato a utilizar para el aforo vehicular.

Tabla 1: Formato de aforo de vehículos

Aforo vehicular		Acceso X			
		Giro izquierda	De frente	Giro derecha	Total
Hora Pico Fecha Periodo	Autos				
	Motos				
	Buses				
	Camiones				
	TOTAL				

Acceso X		
Tipo de vehículo	Cantidad	Ratio
Autos		
Motos		
Buses		
Camiones		
Total		

Acceso X		
Ruta	Cantidad	Ratio
Giro izquierda		
De frente		
Giro derecha		
Total		

Fuente: Propia

### 3.1.4 Aforo de ciclistas

En cuanto al conteo de los ciclistas que cruzan la intersección, se considerarán dos rutas a través de la ciclovía de la Av. Arequipa (ver Figura 43): una en dirección hacia el centro de Lima (E hacia B) y la otra hacia el óvalo de Miraflores (B hacia E). Se contarán también a los ciclistas que crucen por los cruces peatonales. El formato a utilizar para el aforo de ciclistas será incluido en el de aforos peatonales, el cual se muestra en la Tabla 2.

### 3.1.5 Aforo peatonal

En referencia al conteo de peatones, este se realizará en todas las rutas posibles presentadas en la Figura 43. Se aforará también a los peatones que vayan de B hacia E o viceversa, es decir, aquellos que cruzan por la vía peatonal existente en la mediana de la Av. Arequipa. Se tendrá entonces el formato mostrado en la Tabla 2, el cual incluye el conteo de peatones y ciclistas por todas las rutas posibles.

Tabla 2: Aforo peatonal y de ciclistas

Aforo de peatones y ciclistas		RUTAS PEATONALES Y DE CICLISTAS													
		A→B	B→A	B→C	C→B	C→D	D→C	D→E	E→D	E→F	F→E	A→F	F→A	B→E	E→B
Hora Pico Fecha Periodo	Peatones														
	Ciclistas														
	Total (x min.)														

Fuente: Propia

Luego, para cada ruta se obtendrá la proporción de peatones y ciclistas, para lo cual se utilizará la Tabla 3.

Tabla 3: Formato de aforo de peatones y ciclistas con proporciones

Aforo de peatones y ciclistas	RUTAS PEATONALES Y DE CICLISTAS													
	A→B	B→A	B→C	C→B	C→D	D→C	D→E	E→D	E→F	F→E	A→F	F→A	B→E	E→B
Peatones														
Ciclistas														
<b>Total (60 min)</b>														
Ratio Peatones														
Ratio Peatones/2														
Ratio Ciclistas														

Fuente: Propia

### 3.1.6 Tiempos de viaje

Para poder calibrar el modelo, se requiere de tiempos de viaje medidos en campo para poder compararlos con los obtenidos en la microsimulación del modelo. Asimismo, se pueden utilizar para verificar si las propuestas de mejora fueron adecuadas, es decir, si

los tiempos de viaje en el modelo mejorado son menores, significa que se logró uno de los objetivos: mejorar el flujo del tránsito.

Para los tiempos de viaje, se medirá el tiempo que 20 vehículos recorren una sección conocida, la cual también se registrará en el software. En la Tabla 4 se muestra el formato para realizar las mediciones.

Tabla 4: Formato de medición de tiempos

N° Medición	Tiempo (s)
1	
2	
3	
4	
5	
...	...
20	

Fuente: Propia

Cabe resaltar que este formato también será utilizado para registrar los tiempos de parada de 10 buses en el paradero ubicado en la Av. Arequipa, en dirección hacia el centro de Lima. Además, este formato será utilizado para medir los tiempos que tardaron 20 vehículos en girar a la derecha o izquierda desde cada acceso, para poder estimar la velocidad de giro.

### 3.1.7 Tiempo de semáforos

De lo observado en la intersección de estudio, se obtuvo que el ciclo del semáforo contaba con 3 fases, donde los cruces peatonales estaban incluidos en dos de ellas y el cruce de bicicletas en uno de ellos. En la Figura 31 se detallan las tres fases ( $\phi$ ) observadas en el semáforo de la intersección, además de los números correspondientes a los accesos indicados en la Figura 42.

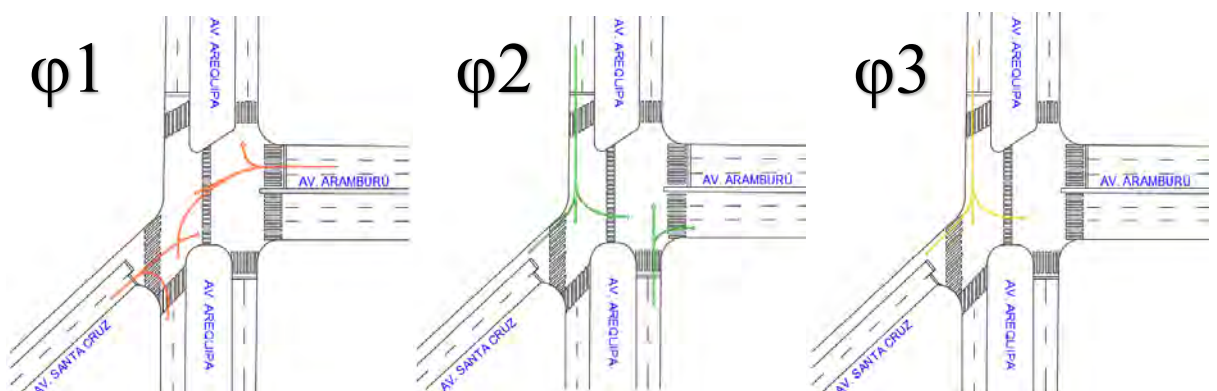


Figura 31: Fases del semáforo

Fuente: Propia

### **3.1.8 Lista de chequeos**

Para poder verificar las deficiencias de seguridad en la intersección de estudio de manera ordenada y sistemática, se utilizarán las listas de chequeo para proyectos urbanos (CONASET, 2003). Se elegirán los parámetros que más se adecúen a las condiciones de la intersección en estudio. La lista de chequeos para la intersección en estudio se encuentra en el Anexo 8.

## **3.2 Construcción del modelo**

### **3.2.1 Imagen de fondo**

Para poder introducir la imagen que se utilizará como base para crear el modelo en el programa, se utilizó el objeto de red “Background Image” para seleccionar la imagen capturada desde Google Earth de la intersección en estudio. Asimismo, para poder escalarla, se hizo click derecho y se midió un ancho de calzada en la imagen de fondo y se colocó la medida real obtenida en Google Earth. La imagen utilizada como fondo para el modelo es la que se muestra en la Figura 32.



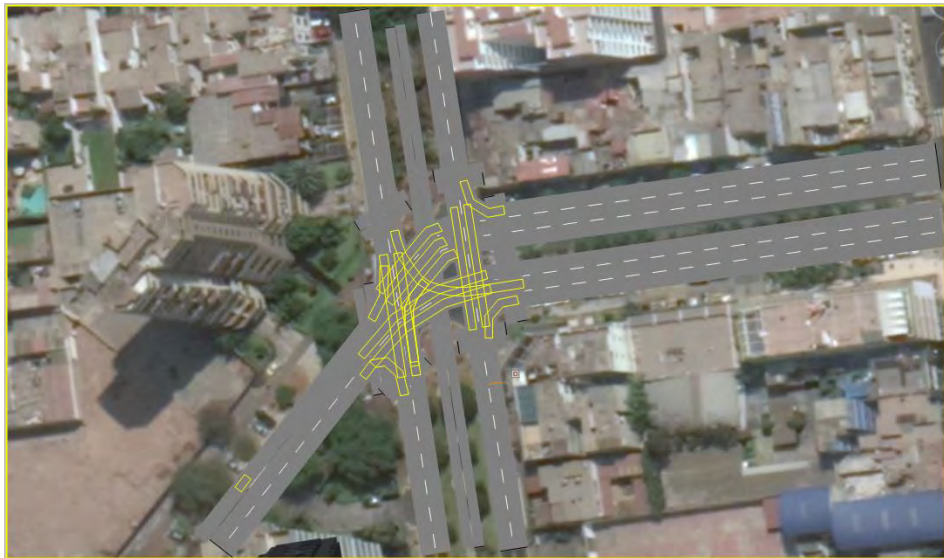
*Figura 32: Imagen de fondo*

*Fuente: Google Earth*

### **3.2.2 Links y conectores**

En primer lugar, con el objeto de red “Links” se colocaron las vías de los cuatro accesos en el sentido correspondiente, colocando el número y ancho de carriles. En el caso de las peatonales, se colocaron vías en cada sentido del crucero.

En segundo lugar, para los giros a la derecha e izquierda se dibujaron conectores, los cuales contaban con puntos medios para suavizar la curva. Para estos objetos, fue importante indicar el carril de destino y el de llegada, así como la velocidad deseada utilizando el objeto de red “Reduced Speed Areas”. En la Figura 33 se observan los links y conectores del modelo, así como las zonas de velocidad reducida donde corresponde (ver Tabla 16).



*Figura 33: Links y conectores con velocidad reducida*

*Fuente: Propia*

### **3.2.3 Composiciones y demandas vehiculares, peatonales y de ciclistas**

En el comando “Traffic”, se ingresó a la opción de composición de vehículos y luego, en las listas, se colocaron los ratios por tipo de vehículo (automóvil, bus, camión y moto) para cada acceso. En cuanto a las vías peatonales, se ingresó el ratio de peatones y el de ciclistas para cada ruta. Cabe resaltar que cada composición tuvo un nombre adecuado para asociarla a las demandas de cada acceso de la red. En la Figura 34 se observan los nombres de las dieciocho composiciones creadas para la red, donde se incluyen cuatro composiciones vehiculares y catorce peatonales y ciclistas (dos para cada ruta).

Para introducir los datos correspondientes a las demandas se ingresó al objeto de red “Vehicle Inputs” y en la columna “Volume” (ver Figura 34) se colocó el total de vehículos que ingresa por cada acceso o ruta. Asimismo, se asoció cada vía con la composición vehicular definida previamente, en la columna “VehComp”.

Count	No	Name	Link	Volume(0)	VehComp(0)
1	1		1: Acceso 1: Aramburú	1024.0	1: Aramburú
2	2		3: Acceso 2: Arequipa hacia Ovalo Miraflores	950.0	2: Arequipa 2
3	3		5: Acceso 3: Santa Cruz	767.0	3: Santa Cruz
4	4		4: Acceso 4: Arequipa hacia Centro de Lima	471.0	4: Arequipa 4
5	5		22: A-B	220.0	5: A-B
6	6		23: B-A	471.0	6: B-A
7	7		25: B-C	216.0	7: B-C
8	8		27: C-B	411.0	8: C-B
9	9		36: C-D	135.0	9: C-D
10	10		7: D-C	68.0	10: D-C
11	11		32: D-E	216.0	11: D-E
12	12		30: E-D	93.0	12: E-D
13	13		15: E-F	269.0	13: E-F
14	14		14: F-E	96.0	14: F-E
15	15		20: F-A	92.0	16: F-A
16	16		18: A-F	227.0	15: A-F
17	17		8: B-E	150.0	17: B-E
18	18		9: E-B	96.0	18: E-B

Figura 34: Demandas y composiciones

Fuente: Propia

### 3.2.4 Rutas estáticas

Para introducir los ratios correspondientes a las rutas seguidas por los vehículos al ingresar a la red (de frente, giro a la izquierda y a la derecha) se ingresó al objeto llamado “Vehicle Routes”. Para cada acceso, se colocaron los ratios en la parte derecha de la zona de listas, tal como se observa en el ejemplo del acceso de la Av. Arequipa en dirección al Óvalo de Miraflores (Figura 35).

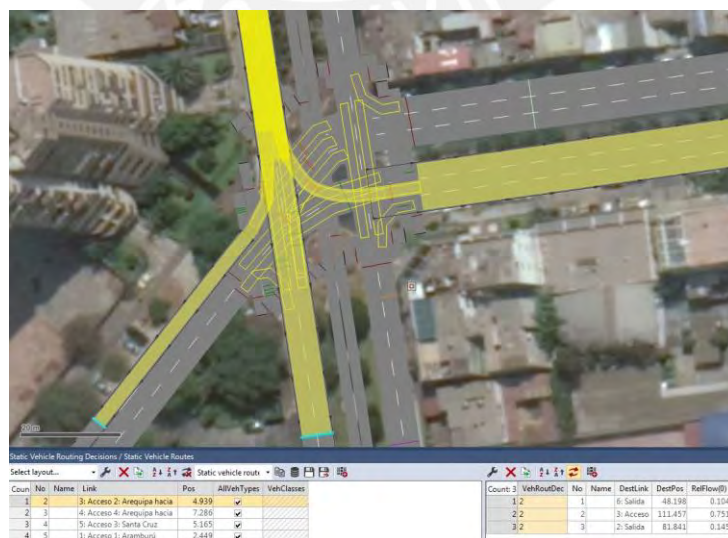


Figura 35: Rutas estáticas de acceso 2 (Av. Arequipa)

Fuente: Propia

### 3.2.5 Fases de semáforos

Para introducir los tiempos de verde, ámbar y rojo de las fases del semáforo en la intersección, se ingresó al comando “Signal Control”. En primer lugar, se crearon los tres grupos de señal correspondientes a las tres fases del semáforo registradas. En segundo lugar, en la opción “Signal Program”, se eligió la secuencia de señal “rojo, verde y ámbar” para los tres grupos. Luego, se definió el tiempo total del ciclo, para después ajustar el diagrama de fases a los tiempos registrados en la intersección (ver Figura 36).

Una vez completado el programa de señales, utilizando el objeto de red “Signal Heads”, se colocaron las líneas de parada de los semáforos de cada acceso (ver Figura 36), indicando el grupo (fase) que le corresponde.

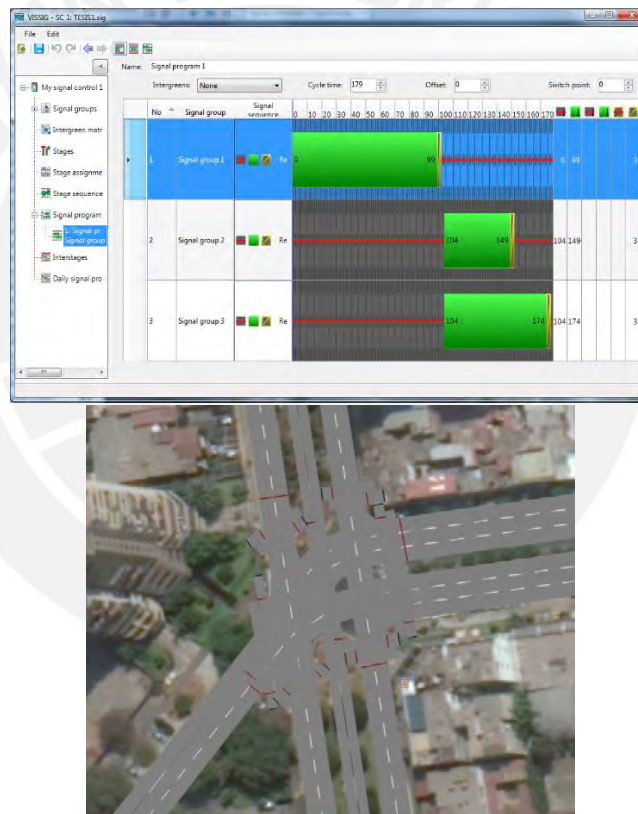


Figura 36: Grupos, programas y líneas de parada de semáforos

Fuente: Propia

### 3.2.6 Zonas de conflicto

Para determinar las zonas de conflicto en el modelo de la intersección, se selecciona el objeto de red “Conflict Areas”. Luego, se identifican las vías que tienen prioridad y, en el cruce de dos vías, se presiona click derecho hasta que la que tiene prioridad



sea de color verde. Por ejemplo, siempre las vías peatonales y de ciclistas tienen prioridad sobre las vehiculares, por lo que son de color verde y las vehiculares de color rojo. En el caso de tener dos vías en las que la prioridad la tiene el primer vehículo que llega, ambas se colocaron de color rojo. Las zonas de conflicto definidas se observan en la Figura 37.



*Figura 37: Zonas de conflicto*

*Fuente: Propia*

### **3.2.7 Tiempos de Viaje**

Para obtener los tiempos de viaje de las corridas del programa, en primer lugar, se definió la sección en la cual se tomarán los datos. Para esto, se seleccionó el objeto de red “Vehicle Travel Times” y se presionó click derecho en el inicio de la sección y en el final de la misma. Para informar al programa sobre el registro de tiempos de viaje en la sección, se ingresó al comando “Evaluation”, y en la opción de configuración se seleccionó la opción de “Vehicle Travel Times” (ver Figura 38). Además, se colocó el intervalo de tiempo para el registro de resultados, el cual incluyó un tiempo de warm-up de 10 minutos (600 segundos).

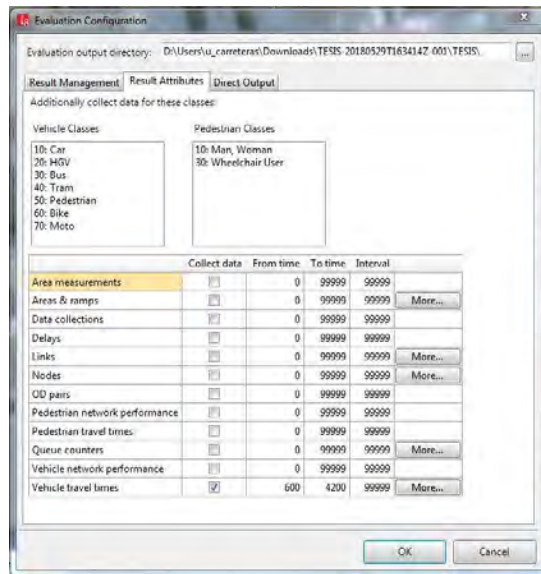


Figura 38: Configuración de evaluación

Fuente: Propia

### 3.3 Calibración y validación

#### 3.3.1 Corrección de errores y corridas del programa

En primer lugar, se corrigieron los errores en el modelo construido con los datos de la hora pico, como, por ejemplo, los vehículos cruzándose entre sí o con los peatones o ciclistas. Esto se efectuó realizando más de una corrida y observando atentamente los puntos de conflicto en la animación 3D.

En segundo lugar, al haber corregido los errores del modelo, se realizaron las corridas del programa para obtener los resultados, comenzando con un número base de 15 corridas. Antes de esto, se definieron los parámetros de simulación en la opción “Simulation”, “Parameters”, donde se incluyen el número de corridas, duración de una simulación, entre otros.

Al culminar con las corridas, se analizan los tiempos de viaje obtenidos en el programa, y, mediante la siguiente ecuación, se determina si el número de corridas fue adecuado o no:

$$n \geq (t_{n-1} * \frac{S}{e})^2$$

Ecuación 1: Número de Corridas

Donde:

n: número de corridas

t: coeficiente t-student (obtenido de tabla de acuerdo al grado de libertad “n-1” y al intervalo de confianza)

S: desviación estándar de los resultados del programa  
e: se aproxima al 10% de la media de los resultados del programa

En un inicio, el número de corridas no era suficiente. Luego de efectuar numerosos intentos, finalmente el número de corridas se definió en 30.

### **3.3.2 Resultados y análisis estadístico**

Después de efectuar las 30 corridas, se compararon los tiempos de viaje que resultaron del programa (Vehicle Travel Times) con los medidos en campo, para lo cual se empleó la herramienta Stat Key (ver Bibliografía) para efectuar una prueba de aleatoriedad de diferencia de medias. De esta manera, se buscó obtener una distribución normal, donde la diferencia de medias de un total de 10,000 muestras pertenezca al intervalo de confianza del 95%.

En el caso de que dicha diferencia de medias no se encuentre en el intervalo de confianza, se procedió a editar los parámetros de Wiedemann, los cuales definen el comportamiento de los conductores del modelo, hasta que se logre calibrar el modelo. En la realidad limeña, estos valores suelen ser menores a los que aparecen por defecto en el programa.

### **3.3.3 Validación**

En cuanto a la validación, el procedimiento fue el mismo que para la calibración, pero utilizando los datos registrados en la hora valle. Utilizando la ecuación descrita previamente, se verificó que al realizar 15 corridas del programa, este era un número adecuado respecto a los resultados obtenidos. De esta manera, se verificó que el modelo construido funcionaba para distintos escenarios.

## **3.4 Evaluación de propuestas de mejora**

### **3.4.1 Situación actual**

Para comenzar a proponer mejoras, se deben detectar los problemas encontrados en las animaciones 3D del programa (modelo calibrado) y en las filmaciones (en la realidad). Para esto último se deben observar atentamente los videos durante la hora pico y, en conjunto con la inspección de seguridad, elaborar las listas de chequeo para detectar las falencias en la intersección actual. En el caso de la intersección en estudio, se consideraron los siguientes ítems (ver Anexo 8):

- Areas congestionadas
- Legibilidad
- Anchos

- Señalización vertical
- Regulación y delineación
- Diseño
- Vallas peatonales
- Semáforos
- Peatones
- Ciclistas
- Transporte público

### **3.4.2 Nuevo modelo**

Para construir el nuevo modelo de microsimulación (el que incluya las propuestas de mejora), se creó una copia del modelo calibrado y se editó la red existente en el programa. Para esto ya se debió definir la nueva geometría de la sección, lo cual se visualizó mejor al dibujar las propuestas de mejora en un plano de AutoCAD. Para poder editar el número o anchos de carriles de alguna vía, se hizo doble click en el link en la zona de trabajo (con el objeto de red “Links” seleccionado). Asimismo, para editar su forma o posición, se añadieron puntos intermedios en las curvas con click derecho.

En cuanto a las demandas y composiciones, estas se mantuvieron iguales ya que la idea es replicar las condiciones más críticas en la intersección (hora pico). En cuanto a las rutas vehiculares, fases del semáforo, líneas de parada y posición de la ciclovía, estas fueron editadas de la misma forma en que se construyó el modelo (ítem 3.2). Para poder editar el color de alguna de las vías, se ingresó al comando “Base Data”, opción Display Types y se puso el nombre de “Ciclovía”, cambiando el color a verde (ver Figura 39). Luego, se le dio a la ruta B-E esta característica, editando el link como se mencionó líneas arriba.

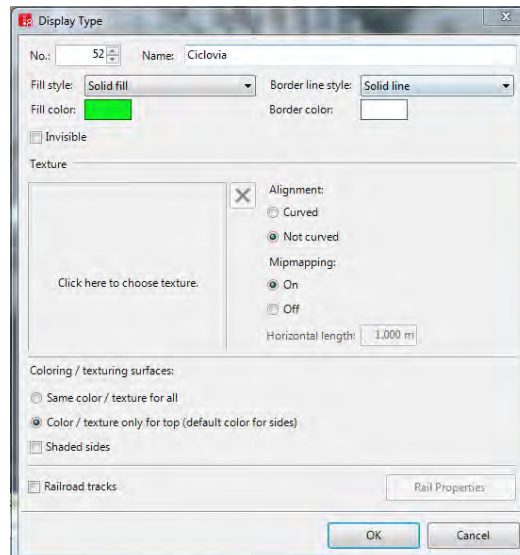


Figura 39: Ventana de modificación de estilo de vía

Fuente: Propia

Para poder evaluar las propuestas de mejora en el programa, fue necesario considerar más parámetros de eficiencia como demoras y velocidades, además de los tiempos de viaje. Esto debió añadirse en ambos modelos (el actual y el nuevo). Para esto, se utilizó el objeto de red “Data Collection” en los tres carriles del acceso de la Av. Aramburú y uno en la ruta B-E. En esta última ruta, también se colocó una sección para medir tiempos de viaje. Finalmente, en el comando “Evaluation”, opción “Measurement Definition”, se definieron las secciones elegidas para la recolección de los parámetros y en la opción “Configuration”, se seleccionaron los parámetros que se esperan comparar entre ambos modelos, los cuales fueron Data Collections, Delays, Vehicle Network Performance y Vehicle Travel Times.

## **CAPITULO 4: PROCESAMIENTO DE DATOS**

### **4.1 Área de análisis**

En primer lugar, la intersección elegida para esta tesis fue la que corresponde al cruce de las Avenidas Aramburú y Arequipa, donde la Avenida Santa Cruz es la prolongación de la Avenida Aramburú y está ubicada en la ciudad de Lima, entre los distritos de San Isidro y Miraflores. A continuación, se detallarán puntos importantes referentes al tránsito en este cruce, como tipos de vehículos, accesibilidad, señalización, tipo de ciclovía, entre otros.

#### **4.1.1 Tránsito en la intersección**

La intersección en estudio cuenta con un alto flujo de tránsito en la mayoría del tiempo, así como distintos modos de transporte como el transporte público (SIT), bicicletas, peatones y automóviles. Existen semáforos para todos los accesos vehiculares, peatonales y para ciclistas. El ciclo de los semáforos está dividido en tres fases.

Por otro lado, la señalización horizontal es confusa debido a que la antigua pintura de algunos cruces peatonales no ha sido borrada adecuadamente. Además, el cruce de la ciclovía de la Avenida Arequipa es bastante inseguro para los ciclistas, ya que el tramo que estos deben cruzar es bastante largo y es constantemente obstaculizado por vehículos detenidos.

Asimismo, tres de los cuatro accesos que existen en esta intersección cuentan con señales reglamentarias que prohíben el giro a la izquierda, siendo el único en el que está permitido el de la Av. Arequipa en dirección al Óvalo de Miraflores. Sin embargo, estas señalizaciones no son respetadas por los conductores que transitan por la intersección. Por ejemplo, en la Figura 40 se observan las señales de restricción de giro a la izquierda para el acceso de la Av. Aramburú.



*Figura 40: Señales de restricción de giro a la izquierda para acceso de Av. Aramburú*

*Fuente: Propia*

En el acceso de la Avenida Arequipa, en dirección al Centro de Lima, existe un paradero para los buses del corredor de la municipalidad (ver Figura 41). Este dificulta el flujo del tránsito debido a que en ambos sentidos de la Avenida Arequipa existen dos carriles, siendo uno de ellos ocupado por buses detenidos por cierto tiempo.



*Figura 41: Paradero en acceso de Av. Arequipa*

*Fuente: Propia*

Un punto importante que dificulta el flujo en la intersección es que los tres carriles con los que cuenta el acceso de la Avenida Aramburú se convierten en un solo carril en la Avenida Santa Cruz en dirección al Óvalo Gutiérrez. Teniendo en cuenta que más adelante en la Av. Santa Cruz existe otra intersección semaforizada, muchas veces la

cola en esta avenida ocasiona que muchos vehículos que buscan cruzar la Av. Arequipa desde la Av. Aramburú se queden detenidos en medio de la intersección, obstaculizando las vías de la Av. Arequipa, la ciclo vía y los cruces peatonales.

#### 4.1.2 Accesos y rutas

Para poder simplificar la recolección de datos de la intersección en estudio, se definirán los cuatro accesos vehiculares provenientes de las avenidas Arequipa, Aramburú y Santa Cruz (ver Figura 42):

- 1) Acceso de Avenida Aramburú, con dirección al Óvalo Gutiérrez
- 2) Acceso de Avenida Arequipa, con dirección al Óvalo de Miraflores
- 3) Acceso de Avenida Santa Cruz, con dirección a la Vía Expresa Paseo de la República
- 4) Acceso de Avenida Arequipa, con dirección al Centro de Lima

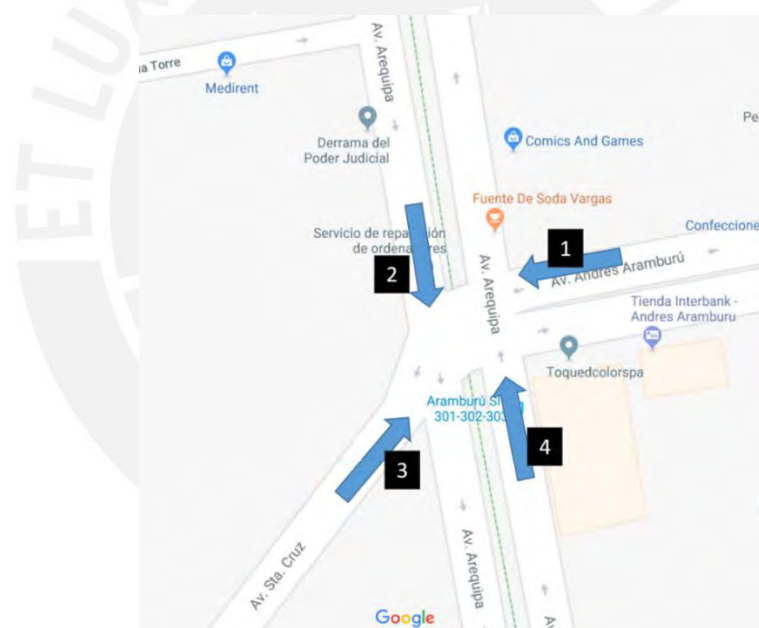


Figura 42: Accesos vehiculares

Fuente: Adaptado de Google Maps (2018)

Cada vehículo que llega a la intersección por alguno de estos accesos tiene tres opciones, las cuales son seguir de frente, girar a la izquierda o girar a la derecha. Como ya se mencionó, el único acceso que tiene permitido el giro a la izquierda es el acceso 2.

Asimismo, se definirán puntos de partida y destino por parte de peatones, para poder modelar su comportamiento en el programa. Estas rutas peatonales y de ciclistas se pueden observar en la Figura 43.



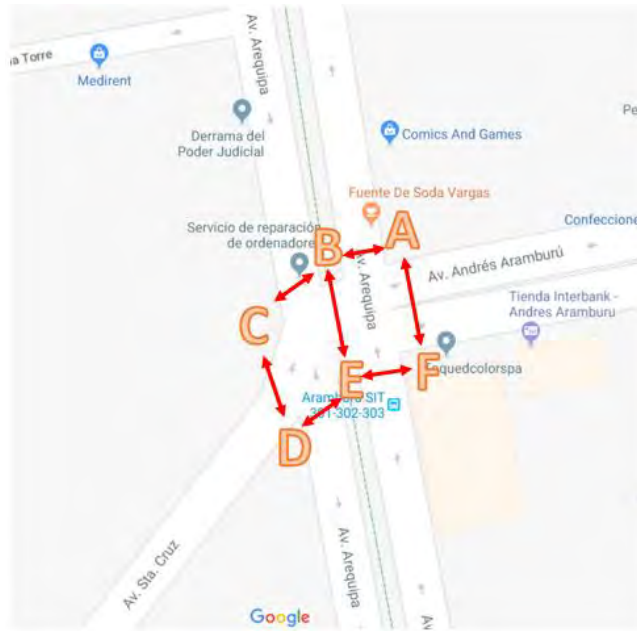


Figura 43: Rutas peatonales y de ciclistas

Fuente: Adaptado de Google Maps (2018)

#### 4.1.3 Geometría de la zona de estudio

De acuerdo a los tipos de cicloavía definidos en el marco teórico, la ubicada en la Av. Arequipa es una cicloavía bidireccional situada en el separador central, con lo cual es una vía segregada. El separador central de esta avenida cuenta también con una vía peatonal, motivo por el cual los que cruzan por la mediana de la Av. Arequipa en la intersección son ciclistas y peatones. Cabe resaltar que la señalización horizontal de la cicloavía, es decir, la pintura en el pavimento, era deficiente y poco notoria para los usuarios.

Asimismo, la distribución de los carriles y sus anchos se muestran en la Tabla 5, así como una imagen donde se muestran las secciones medidas en Google Earth (Figura 44).

Tabla 5: Datos de carriles por acceso

Avenida	Dirección del flujo	Nº de carriles	Ancho de calzada	Ancho por carril
Aramburú	Hacia Óvalo Gutiérrez	3	10 m	3.33 m
	Hacia Vía Expresa	3	10 m	3.33 m
Arequipa	Hacia Óvalo de Miraflores	2	6.50 m	3.25 m
	Hacia Centro de Lima	2	6 m	3 m
Santa Cruz	Hacia Vía Expresa	2	9.50 m	3.15 m
	Hacia Óvalo Gutiérrez	1		3.15 m

Fuente: Propia

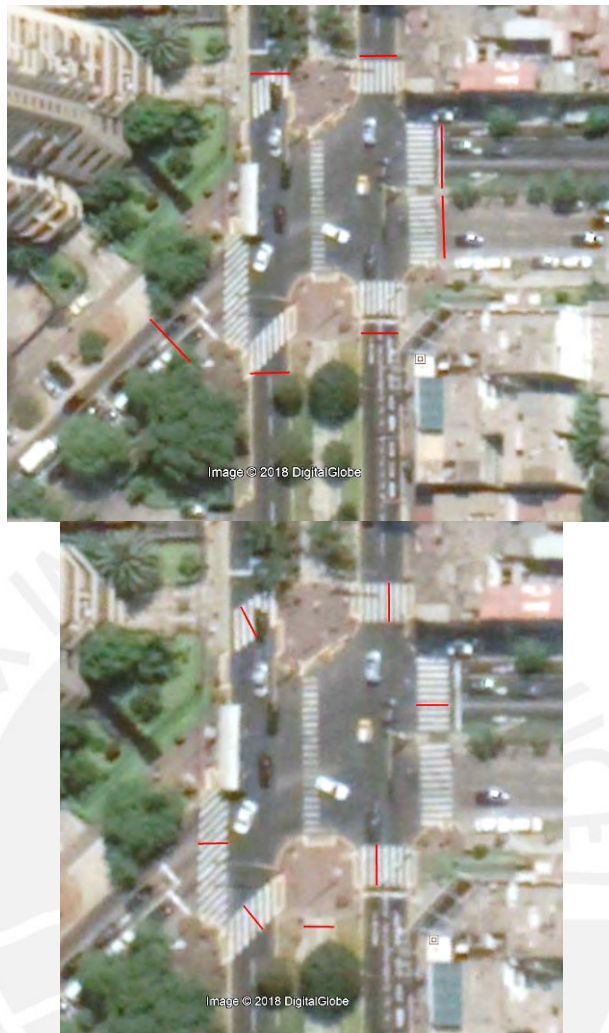


Figura 44: Secciones para anchos de calzada, cruces peatonales y de ciclistas  
 Fuente: Adaptado de Google Earth (2018)

En cuanto a los cruces peatonales y a las ciclovías, se detalla en la Tabla 6 el ancho de cada uno, y en la Figura 44 se muestran las secciones medidas en Google Earth.

Tabla 6: Anchos de cruces

Ruta	Ancho de cruce
A→B	5.35 m
B→C	4.75 m
C→D	4.05 m
D→E	4.10 m
E→F	5.45 m
A→F	4.40 m
B→E (ciclovía + vereda)	4.05 m

Fuente: Propia

Además, se midieron los radios de giro a la izquierda y derecha en la intersección, para posteriormente tomar los tiempos y poder obtener la velocidad de giro de los vehículos.

En la Tabla 7 se detallan dichos radios y se muestra una imagen referencial donde se observa la nomenclatura de los giros (Figura 45).

Tabla 7: Radios de giro

Dirección	Giros		Radio de giro	N°
	Desde	Hacia		
Derecha	Aramburú	Arequipa	19.34 m	1
	Arequipa	Santa Cruz	27.94 m	2
	Santa Cruz	Arequipa	12.36 m	3
	Arequipa	Aramburú	16.86 m	4
Izquierda	Arequipa	Aramburú	35.86 m	5
	Aramburú	Arequipa	34.5 m	6

Fuente: Propia

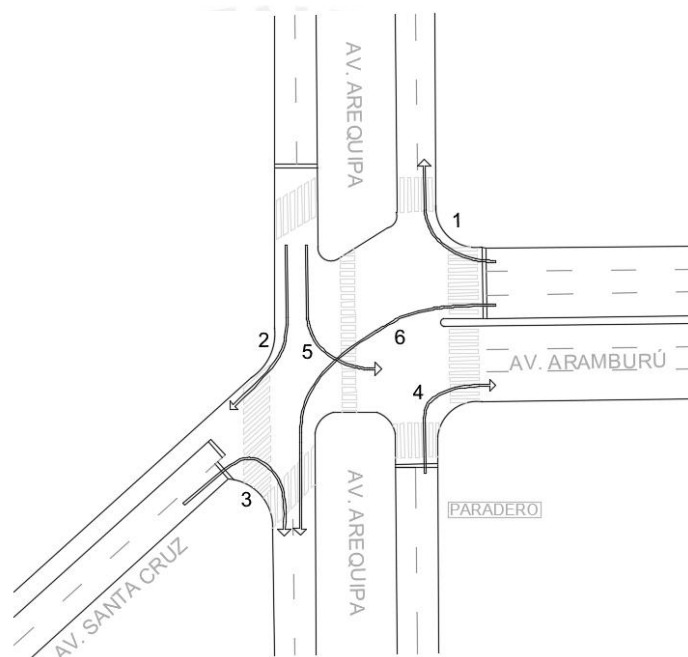


Figura 45: Radios de giro

Fuente: Propia

## 4.2 Aforo vehicular

Como ya se mencionó anteriormente, los datos que son de utilidad para crear el modelo en el programa son los registrados durante el tiempo en que el control de la intersección era a través de semáforos. En el caso de la hora pico, se consideraron los primeros 17 minutos, mientras que en la hora valle, los primeros 28 minutos. Luego, los aforos registrados durante estos tiempos, son extrapolados a un tiempo de 1 hora, mediante una regla de 3 simple, o, en otras palabras, multiplicándolos por un factor igual a la división del tiempo total (60 minutos) entre el tiempo medido (17 o 28 minutos).

#### 4.2.1 Hora pico

Debido a que se contó con 17 minutos de registro de datos, se realizó el aforo cada 5 minutos, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8: Resumen de aforo vehicular en hora pico

Aforo vehicular		Acceso 1: Av. Aramburú			
		Giro izquierda	De frente	Giro derecha	Total
Hora Pico Martes 6 de marzo del 2018 Periodo 18:25-18:42	Autos	22	219	31	<b>272</b>
	Motos	0	14	3	<b>17</b>
	Buses	0	0	0	<b>0</b>
	Camiones	0	1	0	<b>1</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>22</b>	<b>234</b>	<b>34</b>	<b>290</b>
Aforo vehicular		Acceso 2: Av. Arequipa (hacia el Óvalo de Miraflores)			
		Giro izquierda	De frente	Giro derecha	Total
Hora Pico Martes 6 de marzo del 2018 Periodo 18:25-18:42	Autos	33	181	23	<b>237</b>
	Motos	6	14	5	<b>25</b>
	Buses	0	7	0	<b>7</b>
	Camiones	0	0	0	<b>0</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>39</b>	<b>202</b>	<b>28</b>	<b>269</b>

Aforo vehicular		Acceso 3: Av. Santa Cruz		
		De frente	Giro derecha	Total
Hora Pico Martes 6 de marzo del 2018 Periodo 18:25-18:42	Autos	205	4	<b>209</b>
	Motos	7	0	<b>7</b>
	Buses	0	0	<b>0</b>
	Camiones	1	0	<b>1</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>213</b>	<b>4</b>	<b>217</b>
Aforo vehicular		Acceso 4: Av. Arequipa (hacia el Centro de Lima)		
		De frente	Giro derecha	Total
Hora Pico Martes 6 de marzo del 2018 Periodo 18:25-18:42	Autos	99	21	<b>120</b>
	Motos	7	0	<b>7</b>
	Buses	6	0	<b>6</b>
	Camiones	0	0	<b>0</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>112</b>	<b>21</b>	<b>133</b>

Fuente: Propia

Asimismo, en el Anexo 1 se observa el número de autos, motos, buses y camiones que ingresaron por cada acceso durante una hora, así como el porcentaje de cada tipo de vehículo respecto al total. Para obtener los flujos por hora, se multiplicaron los obtenidos en 17 minutos por un factor de 60/17.

En cuanto a las rutas tomadas por los vehículos al ingresar a la intersección, se obtuvieron los flujos vehiculares por hora correspondientes a los que seguían de frente y a los que realizaban giros a la izquierda o derecha, con sus respectivos ratios. Todo lo descrito se observa en el Anexo 1. De los resultados obtenidos, se obtuvo el flujograma en vehículos por hora mostrado en la Figura 46.

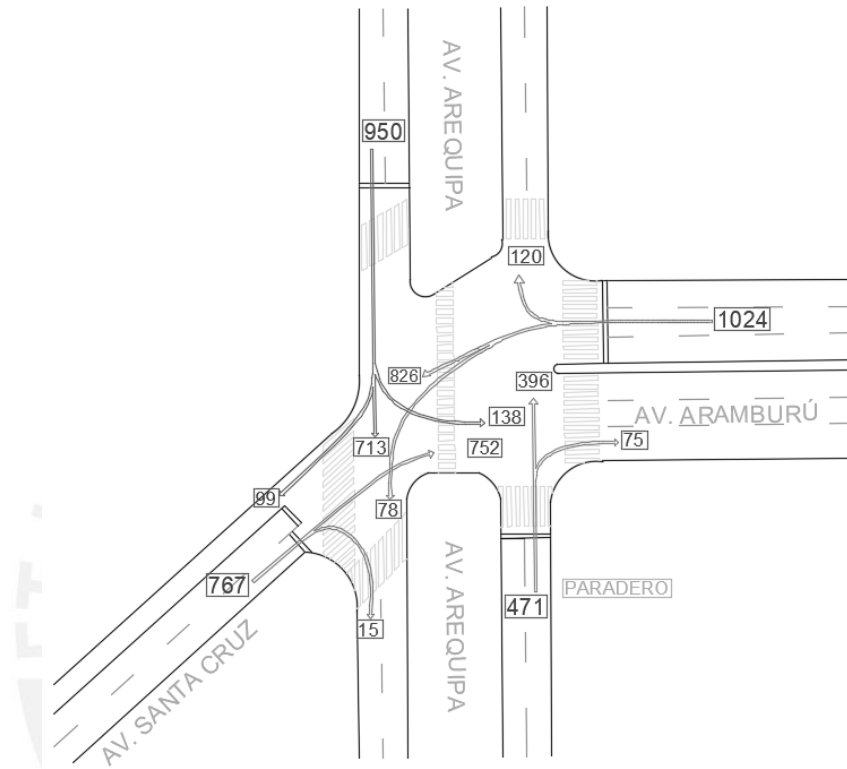


Figura 46: Flujograma vehicular en hora pico  
Fuente: Propia

De lo observado en el flujograma, se concluye que el acceso por el que ingresan más vehículos es el de la Av. Aramburú, siendo mayor el número de vehículos que sigue de frente. En cuanto a los vehículos que giran a la izquierda, solo se contaron los que lo efectuaban desde el acceso de la Av. Aramburú ya que el resto eran despreciables para el análisis. Asimismo, se observó que el flujo de vehículos que giran a la derecha desde el acceso de la Av. Santa Cruz fue bajo, mientras que son mayores aquellos vehículos que giran a la derecha desde la Av. Aramburú.

#### 4.2.2 Hora valle

Debido a que se contó con 28 minutos de registro de datos, se realizó el aforo cada 15 minutos, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9: Resumen de aforo vehicular en hora valle

Aforo vehicular		Acceso 1: Av. Aramburú			
		Giro izquierda	De frente	Giro derecha	Total
Hora Valle Miércoles 28 de marzo del 2018 Periodo 14:25-14:53	Autos	53	342	37	<b>432</b>
	Motos	1	21	2	<b>24</b>
	Buses	1	0	0	<b>1</b>
	Camiones	3	3	1	<b>7</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>58</b>	<b>366</b>	<b>40</b>	<b>464</b>

Aforo vehicular		Acceso 2: Av. Arequipa (hacia el Óvalo de Miraflores)			
		Giro izquierda	De frente	Giro derecha	Total
Hora Valle Miércoles 28 de marzo del 2018 Periodo 14:25-14:53	Autos	37	408	96	<b>541</b>
	Motos	5	28	7	<b>40</b>
	Buses	0	9	1	<b>10</b>
	Camiones	1	4	0	<b>5</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>43</b>	<b>449</b>	<b>104</b>	<b>596</b>

Aforo vehicular		Acceso 3: Av. Santa Cruz		
		De frente	Giro derecha	Total
Hora Valle Miércoles 28 de marzo del 2018 Periodo 14:25-14:53	Autos	247	10	<b>257</b>
	Motos	23	1	<b>24</b>
	Buses	0	0	<b>0</b>
	Camiones	4	0	<b>4</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>274</b>	<b>11</b>	<b>285</b>

Aforo vehicular		Acceso 4: Av. Arequipa (hacia el Centro de Lima)		
		De frente	Giro derecha	Total
Hora Valle Miércoles 28 de marzo del 2018 Periodo 14:25-14:53	Autos	594	30	<b>624</b>
	Motos	17	5	<b>22</b>
	Buses	14	0	<b>14</b>
	Camiones	6	0	<b>6</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>631</b>	<b>35</b>	<b>666</b>

Fuente: Propia

Asimismo, en el Anexo 2 se observa el número de autos, motos, buses y camiones que ingresaron por cada acceso durante una hora, así como el porcentaje de cada tipo de vehículo respecto al total. Para obtener los flujos por hora, se multiplicaron los obtenidos en 28 minutos por un factor de 60/28.

En cuanto a las rutas tomadas por los vehículos al ingresar a la intersección, se obtuvieron los flujos vehiculares por hora correspondientes a los que seguían de frente y a los que realizaban giros a la izquierda o derecha, con sus respectivos ratios. Todo lo mencionado se observa también en el Anexo 2. De los resultados obtenidos, se obtuvo el flujograma mostrado en la Figura 47.

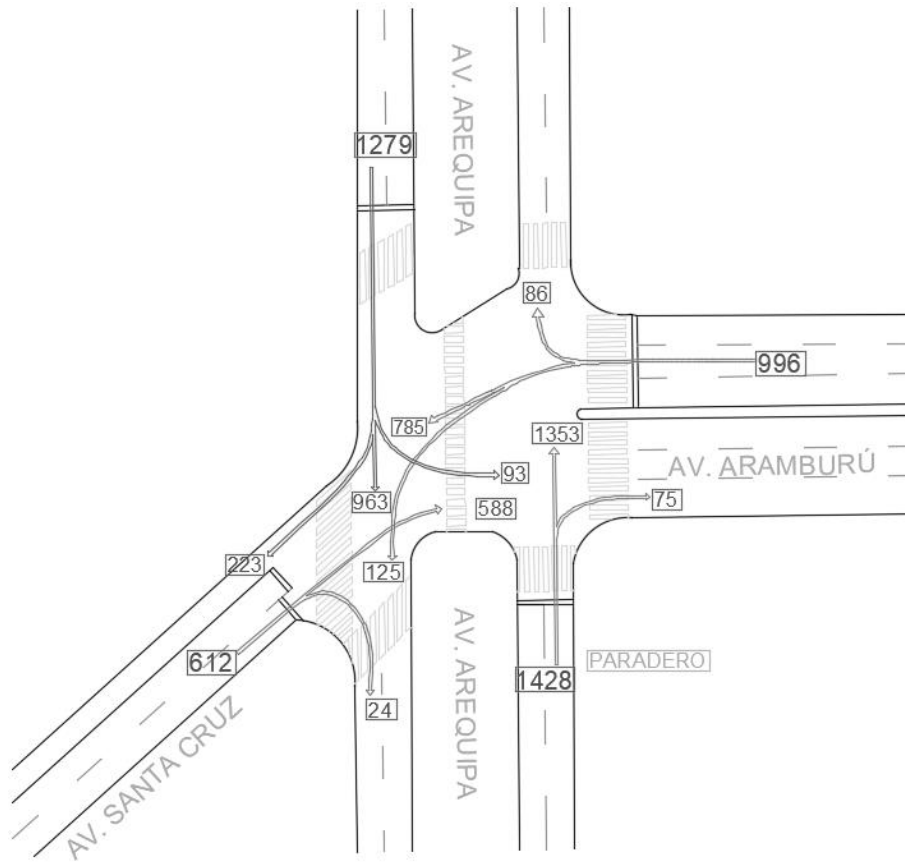


Figura 47: Flujograma vehicular hora valle  
Fuente: Propia

### 4.3 Aforo de ciclistas y peatones

#### 4.3.1 Hora pico

En cuanto al aforo de ciclistas y peatones, se obtuvo el total en los 17 minutos de medición (ver Tabla 10) y luego se extrapolaron los valores a flujos por hora. Estos flujos, así como los ratios correspondientes a cada usuario para las 14 rutas posibles, se muestran en el Anexo 3.

Tabla 10: Resumen de aforo peatonal y de ciclistas en hora pico

Aforo de peatones y ciclistas		RUTAS PEATONALES Y DE CICLISTAS													
		A→B	B→A	B→C	C→B	C→D	D→C	D→E	E→D	E→F	F→E	A→F	F→A	B→E	E→B
Hora Pico Martes 6 de marzo de 2018 18:25-18:42	Peatones	57	131	50	114	38	19	58	25	68	26	61	26	19	7
	Ciclistas	5	2	11	2	0	0	3	1	8	1	3	0	23	20
	Total (17 min)	<b>62</b>	<b>133</b>	<b>61</b>	<b>116</b>	<b>38</b>	<b>19</b>	<b>61</b>	<b>26</b>	<b>76</b>	<b>27</b>	<b>64</b>	<b>26</b>	<b>42</b>	<b>27</b>

Fuente: Propia

También se incluyó el 50% del ratio de peatones para introducirlo al programa como composiciones de hombres y mujeres, asumidos por igual para el modelo. Lo mencionado se detalla en el Anexo 3. Además, con estos flujos se obtuvo el flujograma observado en la Figura 48.

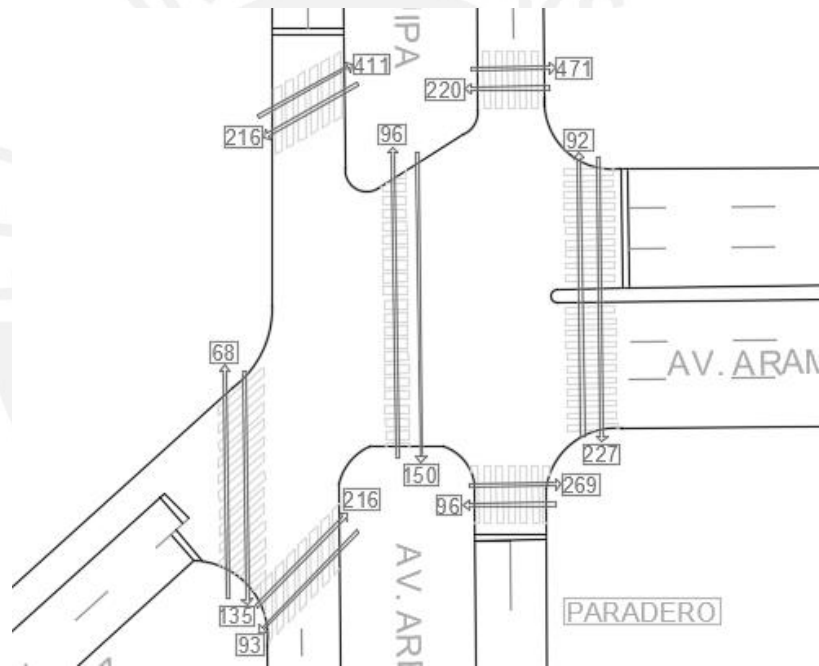


Figura 48: Flujograma peatonal y de ciclistas en hora pico

Fuente: Propia

En referencia al flujograma observado, así como las tablas de aforos, se deduce que las rutas por las que cruzan más ciclistas son entre los puntos B y E, siendo la ruta con mayor flujo la B-E. Asimismo, se observa que un mayor número de peatones se desplaza desde la Av. Santa Cruz hacia la Av. Aramburú. Esto puede deberse a que la estación Aramburú del Metropolitano se encuentra en esa dirección. Además, es mayor el número de peatones que se desplaza por la Av. Arequipa en dirección al óvalo de Miraflores, posiblemente debido a que el paradero del sistema de buses se encuentra en esa dirección (en el punto F).



### 4.3.2 Hora valle

En cuanto al aforo de ciclistas y peatones en la hora valle, se obtuvo el total en los 28 minutos de medición (ver Tabla 11) y luego se extrapolaron los valores a flujos por hora. Estos flujos, así como los ratios correspondientes a cada usuario para las 14 rutas posibles, se muestran en el Anexo 4.

Tabla 11: Resumen de aforo peatonal y de ciclistas en hora valle

Aforo de peatones y ciclistas		RUTAS PEATONALES Y DE CICLISTAS													
		A→B	B→A	B→C	C→B	C→D	D→C	D→E	E→D	E→F	F→E	A→F	F→A	B→E	E→B
Hora Valle Miércoles 28 de marzo del 2018 14:25-14:53	Peatones	78	74	78	53	27	19	64	40	66	53	49	33	6	8
	Ciclistas	5	3	3	3	1	1	3	4	3	1	1	0	31	19
	Total (28 min)	83	77	81	56	28	20	67	44	69	54	50	33	37	27

Fuente: Propia

Así como en la hora pico, se muestran también los ratios peatonales, la mitad de estos valores y los ratios de ciclistas. En la Figura 49 se muestra el flujograma obtenido de estos datos.

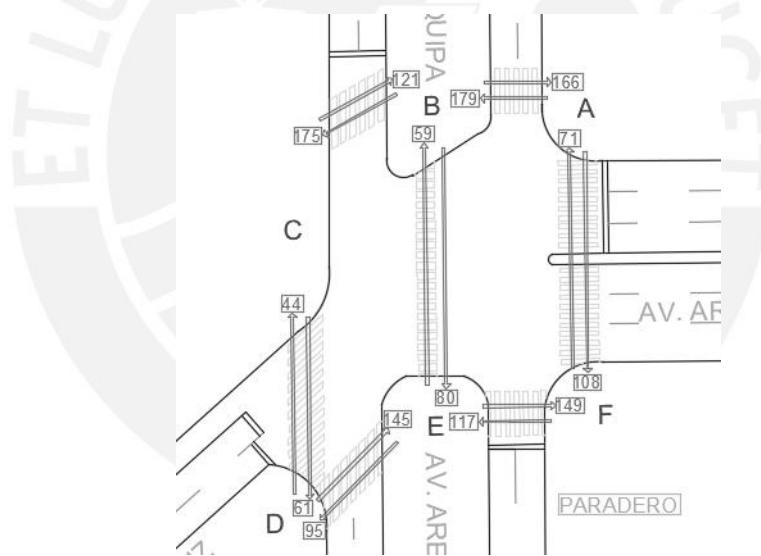


Figura 49: Flujograma peatonal y de ciclistas en hora valle

Fuente: Propia

### 4.4 Tiempos de viaje

Los resultados obtenidos en cuanto a tiempos de viaje se muestran en el Anexo 5. Estos son los siguientes:

- Tiempos de giro (para hallar velocidades de giro)
- Tiempos de parada de buses (Acceso 4: Av. Arequipa)
- Tiempos de viaje en sección de Av. Aramburú para calibrar (hora pico)
  - o Tiempos medidos en campo

- Tiempos obtenidos de las corridas del programa Vissim
- Tiempos de viaje en sección de Av. Arequipa para validar (hora valle)
  - Tiempos medidos en campo
  - Tiempos obtenidos de las corridas del programa Vissim

Con los tiempos de giro obtenidos, así como los radios de giro de la Tabla 7, se pudieron hallar las velocidades de giro que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Tiempos promedio y velocidades de giro

	Giro 1	Giro 2	Giro 3	Giro 4	Giro 5	Giro 6
t prom(s)	5.86	5.77	3.47	5.27	7.42	8.61
Vprom (km/h)	12	17	13	12	17	14

Fuente: Propia

#### 4.5 Tiempo de semáforos

De lo observado en campo durante la hora punta en la intersección de estudio, se obtuvieron los datos referentes a tiempos de verde, ámbar y rojo para cada fase, así como el tiempo de duración total del ciclo. Esta información se resume en la Tabla 13. Asimismo, con esa información se elaboró el diagrama de fases para la intersección (ver Figura 50).

Tabla 13: Tiempos del semáforo en hora pico

Fase ( $\phi$ )	Tiempo de semáforos (seg)			Ciclo total
	Verde (V)	Ámbar (A)	Rojo (R)	
1	99	3	77	179
2	45	3	131	
3	70	3	106	

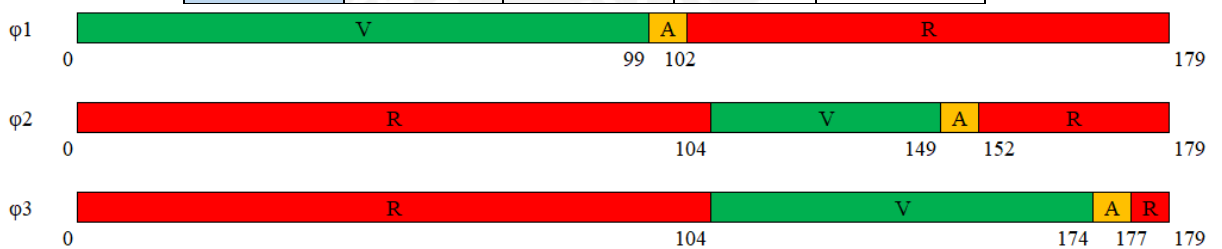


Figura 50: Diagrama de fases del semáforo en hora pico

Fuente: Propia

Por otro lado, los tiempos del semáforo variaron al momento de realizar la medición en la hora valle, obteniendo los resultados de la Tabla 14. Además, el diagrama de fases del semáforo para la hora valle se observa en la Figura 51.

Tabla 14: Tiempos del semáforo en hora valle

Fase ( $\phi$ )	Tiempo de semáforos (seg)			Ciclo total
	Verde (V)	Ámbar (A)	Rojo (R)	
1	40	3	77	120
2	60	3	57	
3	71	3	46	

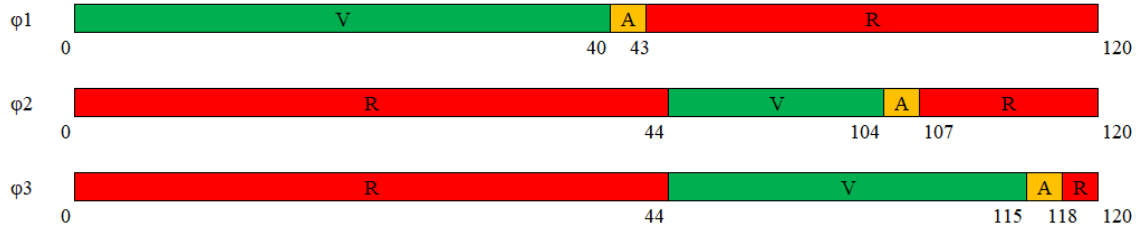
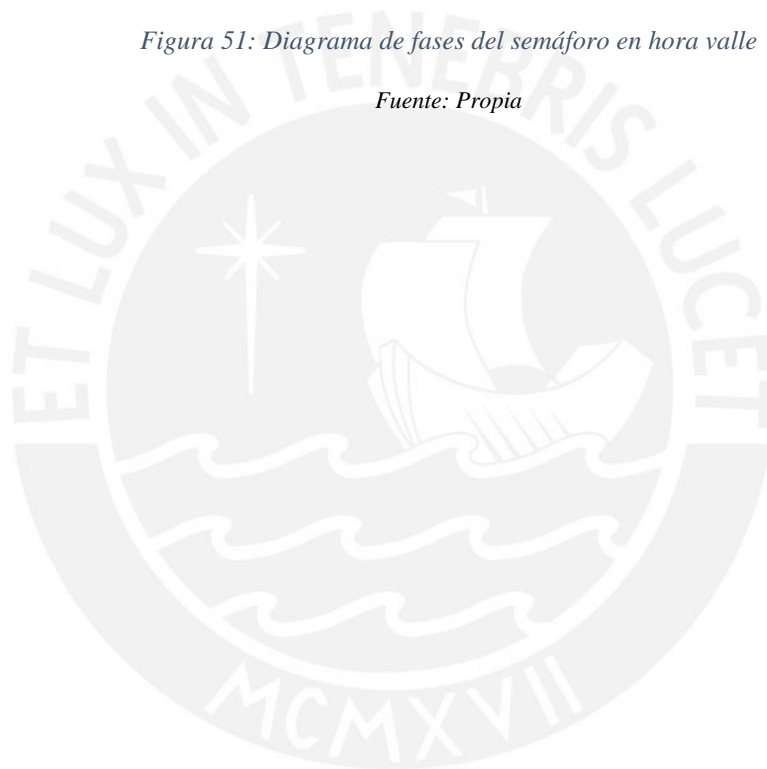


Figura 51: Diagrama de fases del semáforo en hora valle

Fuente: Propia



## CAPITULO 5: CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Para poder construir el modelo de microsimulación en el programa Vissim, se requiere de información recolectada en las filmaciones, la cual se detalla en el capítulo 4. A continuación, en la Tabla 15 se presenta la información necesaria de acuerdo a los pasos a seguir durante la construcción del modelo en el programa Vissim.

*Tabla 15: Información y procedimientos para construir el modelo*

Procedimiento en Vissim	Información Recolectada						
	Tránsito en la intersección	Accesos y rutas	Geometría del sistema	Aforo vehicular	Aforo de ciclistas y peatones	Tiempos de Viaje	Tiempos de semáforo
Imagen de fondo			X				
Links y conectores		X	X			X	
Composiciones		X		X	X		
Demandas		X		X	X		
Rutas estáticas		X		X			
Fases de semáforo		X					X
Zonas de conflicto	X	X					
Parámetros de eficiencia						X	

*Fuente: Propia*

### 5.1 Imagen de fondo, links y conectores

Para colocar adecuadamente los links y conectores en el programa, fue necesario conocer la geometría de la intersección, para lo cual se introdujeron los datos observados en la Tabla 5 y Tabla 6. Asimismo, se colocaron las zonas de velocidad reducida en los giros y en las zonas de cruce, tal como se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16: Zonas de velocidad reducida

Zona	Nombre	Link o conector	Velocidad
1	Giro 1	10005: Giro 1 - 1	12: 12 km/h
2	Giro 2	10000: Giro 2 - 1	15: 15 km/h
3	Giro 3	10004: Giro 3 - 1	12: 12 km/h
4	Giro 4	10002: Giro 4 - 1	12: 12 km/h
5	Giro 5	10007: Giro 5 - 1	15: 15 km/h
6	Giro 6	10006: Giro 6 - 1	15: 15 km/h
7	Salida Santa Cruz	6: Salida Santa Cruz - 1	5: 5 km/h
8	Acceso Santa Cruz	10003: Santa Cruz hacia Aramburú - 2	30: 30 km/h
9	Acceso Santa Cruz	10003: Santa Cruz hacia Aramburú - 1	30: 30 km/h
10	Acceso Arequipa 2	3: Acceso 2: Arequipa hacia Ovalo Miraflores - 1	30: 30 km/h
11	Acceso Arequipa 2	3: Acceso 2: Arequipa hacia Ovalo Miraflores - 2	30: 30 km/h
12	Acceso Arequipa 4	4: Acceso 4: Arequipa hacia Centro de Lima - 2	30: 30 km/h
13	Acceso Arequipa 4	4: Acceso 4: Arequipa hacia Centro de Lima - 1	30: 30 km/h
14	Acceso Aramburu	1: Acceso 1: Aramburú - 1	15: 15 km/h
15	Acceso Aramburu	1: Acceso 1: Aramburú - 2	15: 15 km/h
16	Acceso Aramburu	1: Acceso 1: Aramburú - 3	15: 15 km/h

Fuente: Propia

Las zonas reducidas en los giros (1-6) se colocaron aproximando lo obtenido en la Tabla 12, la zona 7 correspondía a un artificio para simular la cola que se formaba en la salida de la Av. Santa Cruz, y el resto de zonas (8-16) corresponden al tramo del link comprendido en el mismo cruce, donde los vehículos suelen reducir la velocidad. En cuanto a las zonas correspondientes al acceso de la Av. Aramburú, la velocidad es menor debido a la reducción en la calzada de tres carriles a uno.

## 5.2 Composiciones y demandas vehiculares, peatonales y de ciclistas

Para poder ingresar esta información al programa, era necesario tomar en cuenta los aforos vehiculares, peatonales y de ciclistas. En cuanto a composiciones, se requería de los porcentajes de tipos de vehículos y sus velocidades, mientras que para las demandas se requería de los aforos observados en el Anexo 2 para vehículos y en el

Anexo 4 para peatones y ciclistas. Cabe resaltar que se consideró una velocidad de llegada a la intersección para cada tipo de vehículo, de acuerdo a la Tabla 17.

*Tabla 17: Velocidades por tipos de vehículo*

Tipo de Vehículo	Velocidad (km/h)
Automóvil	40
Moto	40
Bus	30
Camión	30
Ciclista	15
Peatón	5

*Fuente: Propia*

### **5.3 Rutas estáticas**

En cuanto a las rutas estáticas, se necesitó del porcentaje de rutas vehiculares para cada acceso observado en el Anexo 2. Debido a que los ciclistas y peatones siempre contaban con una sola opción de ruta, no se requirió de dicho porcentaje para estos usuarios. Para los accesos 1 y 2 se consideraron las tres rutas posibles (de frente, giro a la derecha y a la izquierda), mientras que para los accesos 3 y 4 solo se tomaron en cuenta a los vehículos que seguían de frente y a los que giraban a la derecha.

### **5.4 Fases de semáforos**

La información requerida para este procedimiento consistía en conocer el número de fases del semáforo y los movimientos correspondientes a cada una (Figura 31), así como los tiempos de verde, rojo y ambar de cada fase (Figura 50). Asimismo, fue importante conocer la posición de las líneas de parada semafóricas de cada acceso, para colocar adecuadamente las “Signal Heads” en los links del modelo.

### **5.5 Zonas de conflicto**

Lo que se debe considerar al determinar las prioridades en las zonas de conflicto del modelo son los distintos modos que interactúan en la intersección y cuáles son los links que estos utilizan. Es así como a los peatones y ciclistas se les dio prioridad sobre los vehículos, es decir, en la zona de conflicto, los links por donde se desplazaban ciclistas y peatones se determinó como verde y los de vehículos como rojo. En los cruces de solo vehículos motorizados, debido a que en estos casos el que llega primero es el que

tiene la prioridad, ambas vías fueron de color rojo. En la Figura 37 se observan las zonas de conflicto del modelo a calibrar.

### 5.6 Parámetros de eficiencia

Para determinar la sección del modelo donde se registrarían los tiempos de viaje, se debió conocer previamente la sección de la intersección real sobre la cual se tomaron los tiempos de viaje en campo. Debido a que la Av. Aramburú es la que cuenta con mayor flujo de vehículos y, además, es la que puede verse con mayor claridad desde el punto de filmación, es que se eligió la sección mostrada en la Figura 52. Asimismo, como se explicará en el capítulo 6, para comparar el modelo actual con el que incluya las propuestas de mejora, se incluirán en los resultados más parámetros de eficiencia, como demoras y velocidades para vehículos, ciclistas y peatones.



*Figura 52: Sección para tiempos de viaje en Av. Aramburú*  
*Fuente: Propia*

### 5.7 Calibración

Luego de haber corregido los errores en el modelo construido, se obtuvo finalmente el modelo mostrado en la Figura 53.



*Figura 53: Modelo calibrado*  
*Fuente: Propia*

La sección de la cual se obtuvieron los tiempos de viaje para calibrar el modelo se encontró en la Av. Aramburú. Mediante ajustes en los parámetros de Wiedemann (aquellos que definen la agresividad de los conductores), se logró finalmente que el modelo represente lo que realmente ocurre en la intersección de estudio, es decir, que la diferencia de medias total sea parte del intervalo de confianza definido (ver Figura 54) y, por lo tanto, que el modelo este calibrado. Los parámetros de Wiedemann considerados en el modelo calibrado se observan en la Figura 55.

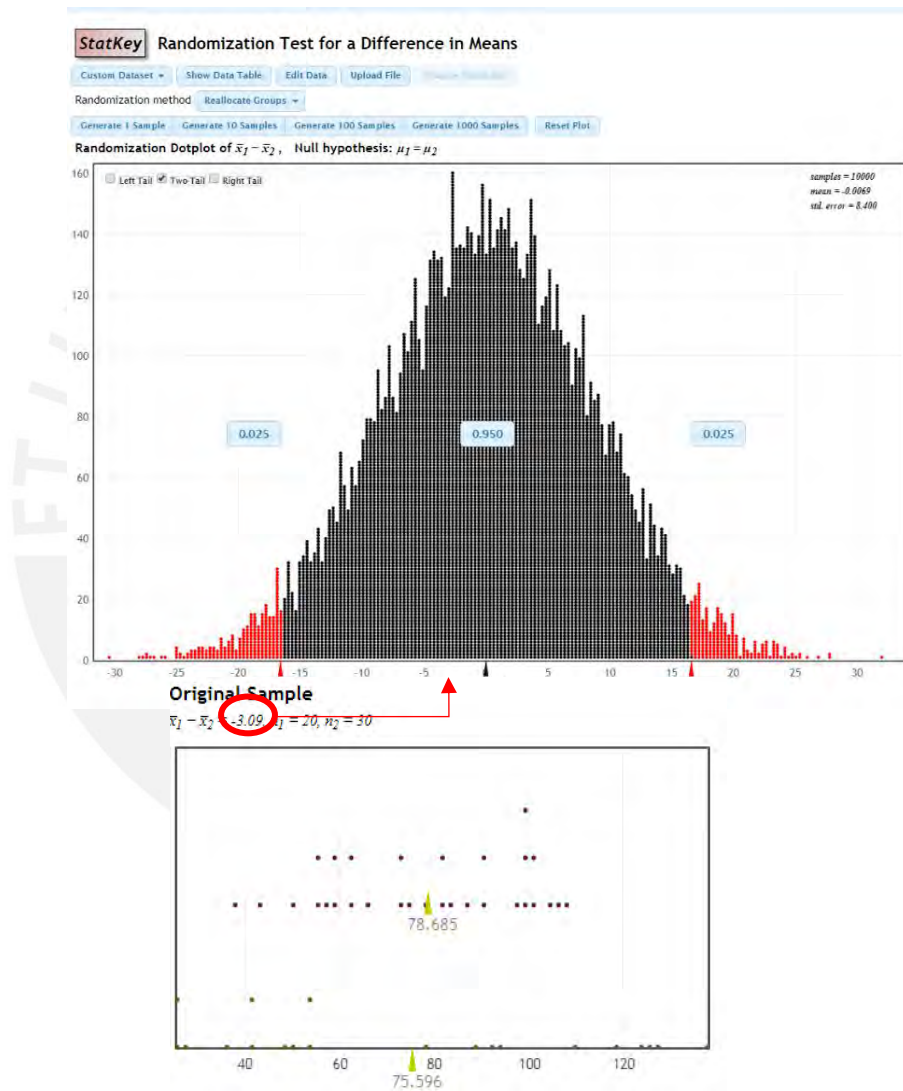


Figura 54: Análisis estadístico para calibración

Fuente: Propia



Asimismo, los resultados de la calibración del modelo se encuentran en el Anexo 6. Un resumen de estos se observa en la Tabla 18, donde el número mínimo de corridas fue hallado utilizando la ecuación descrita en el ítem 3.3.1.

Tabla 18: Resumen de resultados de calibración (tiempos de viaje)

n	t(n-1)	Desv. Estándar	Media	Núm. Mínimo de corridas
30	2.0452	20.5	78.69	28.39=29

Fuente: Propia

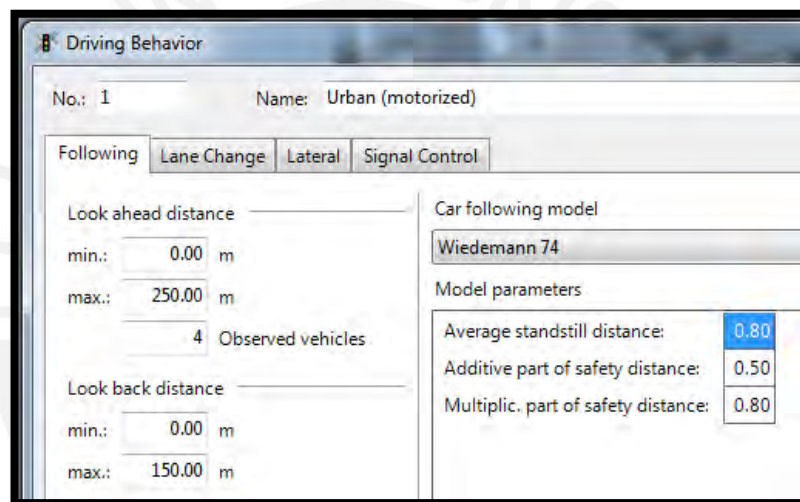


Figura 55: Parámetros de Wiedemann

Fuente: Propia

## 5.8 Validación

En cuanto a la validación, el procedimiento fue el mismo que para la calibración, pero utilizando los datos registrados en la hora valle. El modelo validado se observa en la Figura 56, donde se incluyó una zona de velocidad reducida en la salida de la Av. Aramburú, dadas las condiciones durante la hora valle. Utilizando la ecuación descrita en el ítem 3.3.1, se verificó que al realizar 15 corridas del programa, este era un número adecuado respecto a los resultados obtenidos.



Figura 56: Modelo validado  
Fuente: Propia

Asimismo, la sección considerada para validar el modelo se ubicó en la Av. Arequipa. Además, los tiempos del semáforo cambiaron, así como algunas zonas de velocidad reducida. Al estar validado el modelo (ver Figura 57), se verificó que este funciona para más de un escenario en la intersección de estudio.

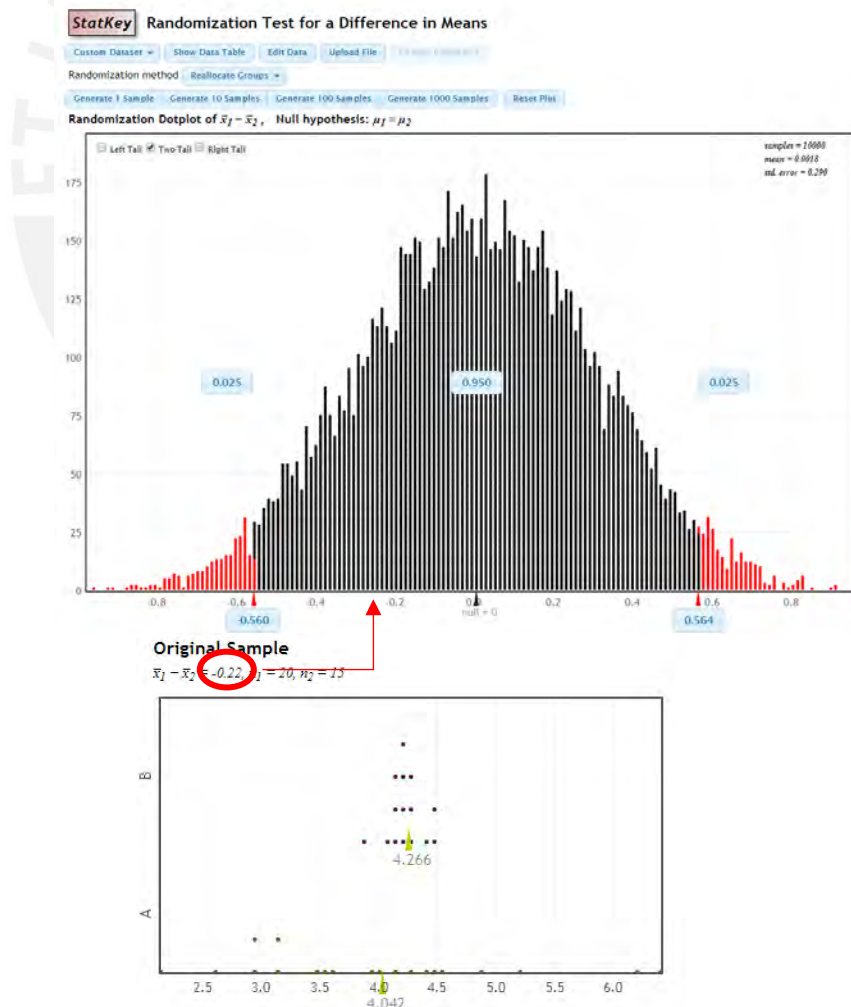


Figura 57: Análisis estadístico para validación

Fuente: Propia

Por último, el resumen de la validación se encuentra en la Tabla 19 y los resultados se aprecian en el Anexo 7.

Tabla 19: Resultados de resultados de validación (tiempos de viaje)

n	t(n-1)	Desv. Estándar	Media	Núm. Mínimo de corridas
15	2.1448	0.09	4.42	0.19=1

Fuente: Propia



## CAPITULO 6: PROPUESTAS DE MEJORA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

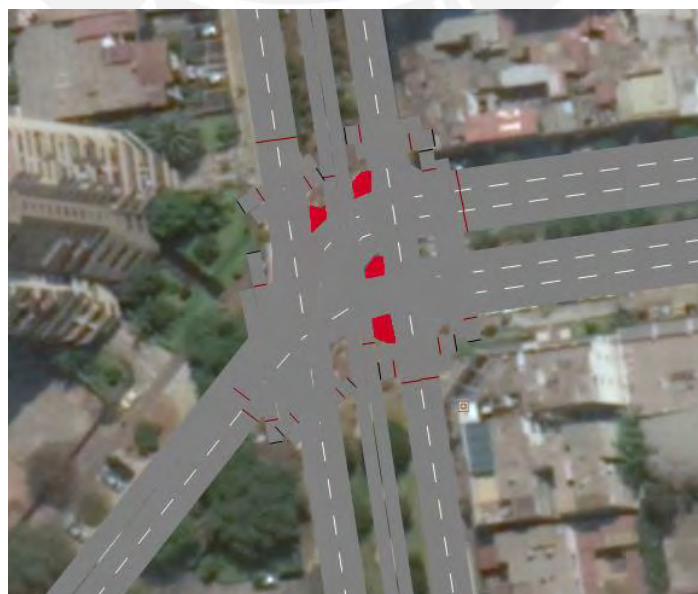
### 6.1 Problemas encontrados

Los problemas observados en la intersección de estudio se pueden dividir en los encontrados en las filmaciones y los vistos en el modelo calibrado y validado.

Dentro de los problemas observados en las filmaciones, además de la inspección de seguridad vial efectuada para obtener una lista de chequeos, se detectaron problemas relacionados a la gestión del tránsito, seguridad y accesibilidad de los usuarios. Entre estos se encuentran la falta de una isla de refugio en la ruta B-E, una excesiva cantidad de carriles de acceso de la Av. Aramburú y la falta de señalización informativa que indique la presencia de ciclistas en el cruce.

En cuanto a los problemas encontrados al microsimular el modelo en el programa Vissim, se destacan la presencia de autos detenidos en medio de la intersección, los cuales bloquean el paso a los ciclistas y peatones, y la congestión que generan los vehículos que buscan doblar a la izquierda.

Asimismo, se detectó que existen ciertas zonas no utilizadas en la intersección, las cuales se observan de color rojo en la Figura 58. Esto se basa en el espacio ocupado por los links y conectores en el modelo. Además, como se verá posteriormente, existen espacios no utilizados o que podrían no utilizarse por los vehículos que cruzan por la intersección real.



*Figura 58: Zonas en desuso en Programa Vissim*

## 6.2 Nuevo modelo

Para el nuevo modelo se consideraron dos propuestas de mejora principales, las cuales son las referentes a la geometría de la intersección y las relacionadas a los dispositivos de control del tránsito. Estas propuestas pueden visualizarse en la Figura 61. Además, como Anexo a esta tesis, se presenta un plano en A3 que incluye la intersección en estudio con las propuestas de mejora.

### 6.2.1 Mejoras en la geometría

En primer lugar, se pensó utilizar las zonas en desuso en el cruce para brindar mayor espacio a los ciclistas, que les brinde mayor seguridad y prioridad frente a los conductores, y también para mejorar el flujo del tránsito. Esto se logrará con las siguientes mejoras:

- **Aumento de la extensión de la mediana de la Av. Arequipa desde el acceso 2**

Esto permitirá que los ciclistas requieran de menos espacio en el pavimento para llegar al otro lado de la intersección, entre los puntos B y E (ver Figura 59). Asimismo, obligará a que los vehículos que transiten por el carril derecho del acceso de la Av. Aramburú giren a la derecha, dejando solo los dos carriles restantes para los que siguen de frente. Esta mejora incluye la colocación de una señal de giro a la derecha en dicho acceso.

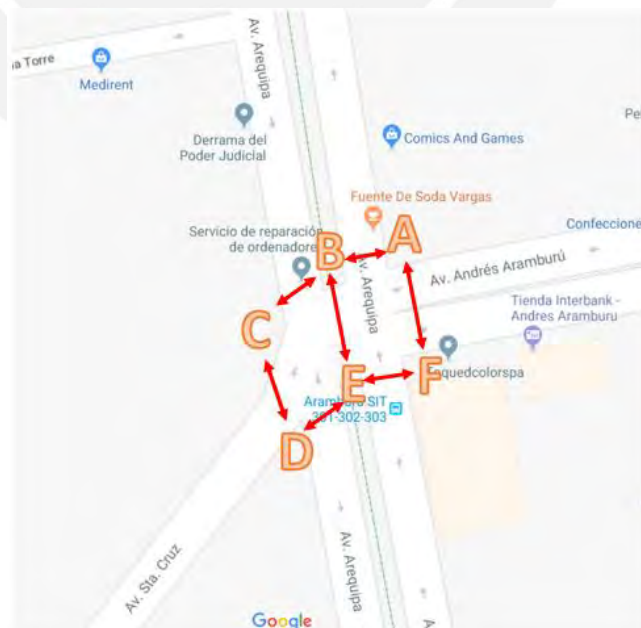


Figura 59: Rutas peatonales y de ciclistas  
Fuente: Adaptado de Google Maps (2018)

- **Isla de refugio entre los puntos B y E**

La idea de esta propuesta de mejora es proteger a los ciclistas y peatones que no logren cruzar del punto B al E o viceversa durante el tiempo de verde de su fase. Además, la isla servirá para restringir los giros vehiculares a la izquierda que no estén permitidos en la intersección. La colocación de esta isla se complementa con un cambio en la trayectoria del cruce de ciclistas y peatones entre dichos puntos. Además, se propone colocar semáforos para estos usuarios en la isla.

- **Aumento de áreas de espera peatonal**

o Punto D

Para aumentar el área de espera en este punto, se restringirá el giro a la derecha desde el acceso de la Av. Santa Cruz, tomando en cuenta la poca cantidad de vehículos que realiza este movimiento en una hora (15 vehículos). Esto permitirá que el desplazamiento de los peatones entre los puntos C y D sea más corto, aumentando su seguridad.

o Punto medio entre puntos A y F

Esto se logrará ensanchando la mediana de la Av. Aramburú en la zona del cruce peatonal entre los puntos mencionados, hacia la salida de dicha avenida. Esto debido a que los autos que siguen de frente desde el acceso de la Av. Santa Cruz solo ocupan dos de los tres carriles con los que cuenta dicha salida.

### **6.2.2 Mejoras en el control del tránsito**

En segundo lugar, se buscó proponer mejoras relacionadas a la gestión del tránsito, como semaforización y señalización.

- **Cambio de fases del semáforo**

Considerando la duración excesiva de ciclo durante la hora pico (179 s), se propondrá utilizar la fórmula de Webster para hallar el ciclo óptimo en función a las demandas de cada acceso y a un flujo de saturación asumido (S) de 1800 vehículos/hora/carril.

- o Las fases seguirán siendo tres. La primera, la que permite el movimiento a los accesos de las Avenidas Aramburú y Santa Cruz, la segunda, para la Av. Arequipa en dirección al Centro de Lima, y la

tercera para la Av. Arequipa en dirección al Óvalo de Miraflores (ver Figura 60).

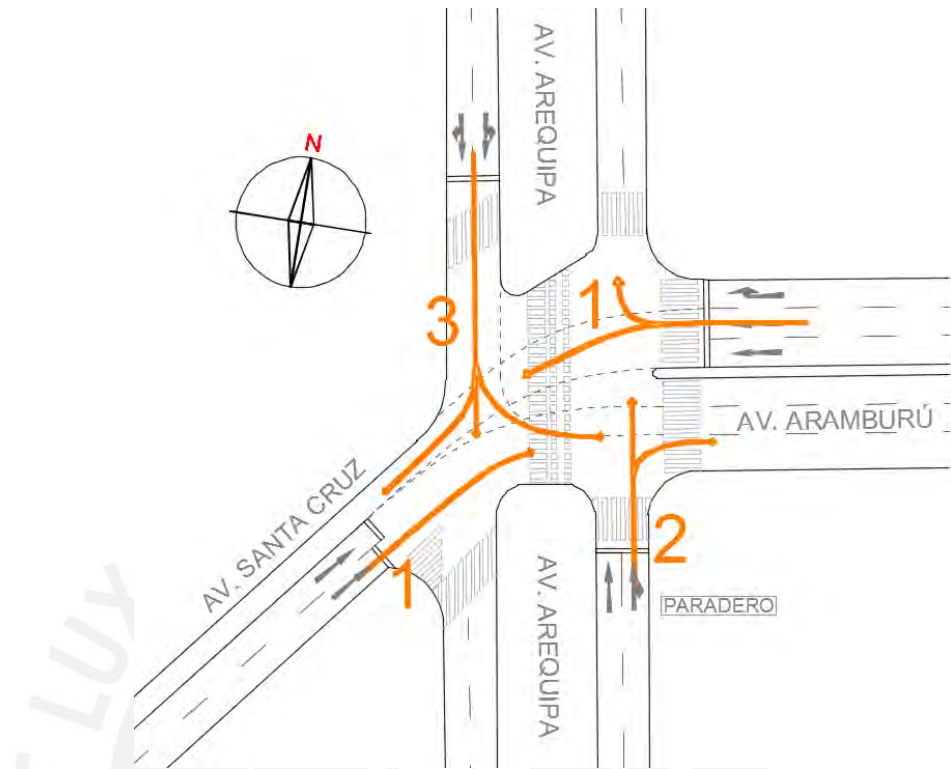


Figura 60: Fases y movimientos para el nuevo modelo

Fuente: Propia

- A continuación se presenta el cálculo de entreverdes, donde se considera un tiempo de percepción reacción ( $t_r$ ) de 1 segundo, una tasa de desaceleración ( $a$ ) de  $3.05\text{m/s}^2$ , una longitud de vehículo ( $L$ ) de  $6.10\text{m}$  y una velocidad ( $V_o$ ) de  $40\text{ km/h}$ :

$$I_i = (\text{Ámbar}) + (\text{Todo Rojo})$$

$$I_i = \left( \frac{t_r + V_o}{2a} \right) + \left( \frac{W + L}{V_o} \right)$$

Donde  $W$  corresponde al ancho de la intersección medido desde la línea de parada. Los mayores valores de  $W$  para cada fase se midieron en Google Earth, obteniendo los valores de  $35.5\text{m}$  para la fase 1 y  $42.2\text{ m}$  para las fases 2 y 3.

- Efectuando los cálculos, se obtuvo que para cada fase, el tiempo de ámbar era de 3 segundos y el de todo rojo de 4 segundos aproximadamente.

- A continuación se muestran las relaciones entre la máxima demanda (ver Figura 46) y el flujo de saturación de cada fase:

- $y_1 = \frac{q_{1max}}{s} = \frac{1024}{3*1800} = 0.19$

- $y_2 = \frac{q_{2max}}{s} = \frac{471}{2*1800} = 0.13$

- $y_3 = \frac{q_{3max}}{s} = \frac{950}{2*1800} = 0.26$

- Para hallar el ciclo óptimo, se utilizó la fórmula de Webster:

$$Co = \frac{1.5 * Lp}{1 - \sum yi} = 87 \approx 90 \text{ segundos}$$

Donde Co es el ciclo óptimo y Lp el tiempo perdido, igual a la suma de entreverdes de todas las fases  $((3+4)*3=21)$ .

- Para calcular el tiempo de verde de cada fase, se utilizó la proporción de cada una dada por los valores de “y”, considerando que la suma de los verdes debe ser igual al ciclo total menos el tiempo perdido:

$$\frac{0.19}{y1} = \frac{0.13}{y2} = \frac{0.26}{y3}$$

$$v1 + v2 + v3 = 90 - 21 = 69$$

- Tiempos de verde:

- $v1=23s$

- $v2=15s$

- $v3=31s$

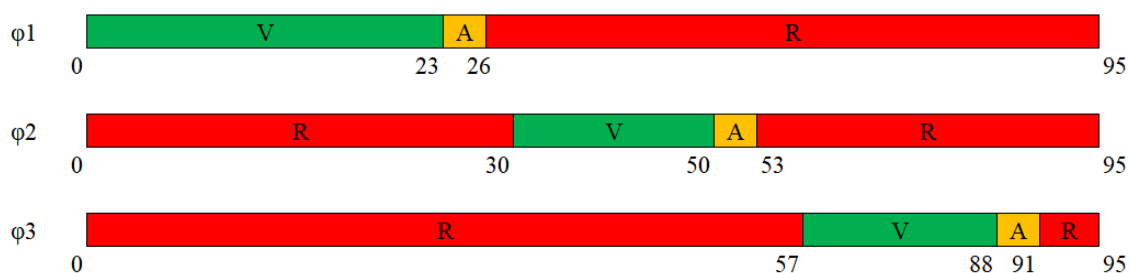
- Verificación de tiempo de verde para peatones en crucero más largo (ruta B-E):

$$tp = 5 + \frac{long.crucero}{velocidad\ peaton} = 5 + \frac{19.1}{1.4} = 18.6s \approx 20s > 15s$$

Se debe aumentar 5 segundos a la fase correspondiente a esta ruta, es decir a la fase 2, ya que los peatones no cuentan con tiempo suficiente para cruzar. El ciclo ahora será de 95 segundos.



o Diagrama de fases:



- **Pavimento de color verde para ciclovía**

De acuerdo a los manuales, en una intersección el pavimento de la ciclovía debe ser de un color llamativo con el fin de llamar la atención de los conductores de vehículos sobre la presencia de ciclistas (ver Figura 14)

- **Señalización reguladora, de prevención y de información**

En el acceso de la Av. Aramburú, al lado derecho del carril de solo giro a la derecha, se propone colocar una señal que advierta a los conductores sobre este movimiento. Luego, en el acceso de la Av. Santa Cruz, se propone colocar una señal de giro prohibido a la derecha. Además, en los accesos perpendiculares a la ciclovía (Avenidas Aramburú y Santa Cruz) se propone colocar señales que indiquen la presencia de ciclistas en la intersección (ver Figura 61). Asimismo, para los accesos en los que el giro a la izquierda sea restringido, se propone colocar señales de pre señalización, donde se indique al conductor la vía por la que debe continuar para evitar este giro (ver Figura 62).



Figura 61: Propuestas de mejora  
Fuente: Propia

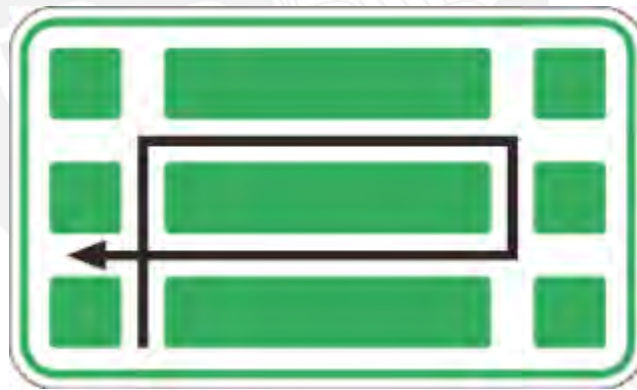


Figura 62: Señal de pre señalización  
Fuente: MTC (2016)

### 6.3 Parámetros de eficiencia

Para poder comparar entre el modelo que representa a la intersección en estudio y el que contenga las propuestas de mejora, se deben medir en ambos casos parámetros de eficiencia, con el fin de comparar los resultados y verificar si efectivamente las propuestas logran que el tránsito en la intersección mejore. Se colocaron puntos de colección de datos (Data Collection) y de medición de tiempos de viaje (secciones),

en la misma posición para ambos modelos. En la Figura 63 se muestra la ubicación de dichos puntos en el modelo con las propuestas de mejora.



Figura 63: Secciones y puntos para medir parámetros de eficiencia

Fuente: Propia

Luego de efectuar las corridas para ambos modelos, se obtuvieron las siguientes tablas de resultados en el programa:

- Vehicle Travel Times
- Vehicle Network Performance Evaluation
- Delay
- Data Collection

De estas tablas, se obtuvieron los siguientes parámetros de eficiencia:

- Tiempos de viaje (Travel Times): se refiere al tiempo que tarda un vehículo, peatón o ciclista en viajar de un punto a otro, en una determinada sección.
- Demoras (Delays): corresponde al tiempo que pierde un usuario en una sección definida
- Velocidades (Speeds): son medidas en puntos de recolección de datos dentro de una sección de análisis.

## 6.4 Análisis del modelo actual

En primer lugar, se hará un análisis de los datos obtenidos durante la hora pico en la intersección de estudio (ver ítem 4.2.1). A continuación se mostrarán gráficos que representan el porcentaje de rutas y de tipo de vehículo de dos accesos durante la hora pico, el de la Av. Aramburú (acceso 1) y el de la Av. Arequipa (acceso 2) en dirección al Óvalo de Miraflores.

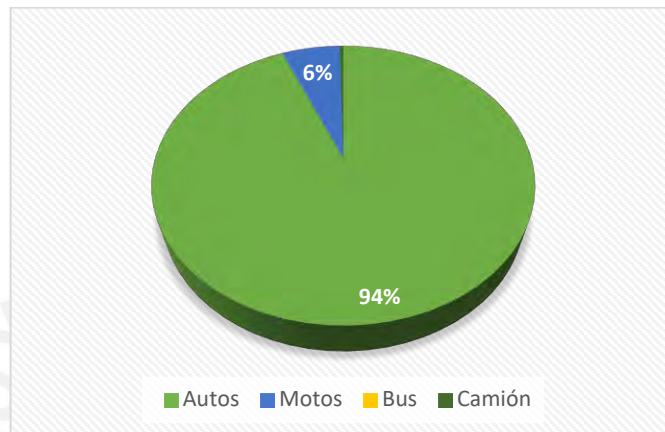


Figura 64: Tipo de vehículos en acceso de Av. Aramburú

Fuente: Propia

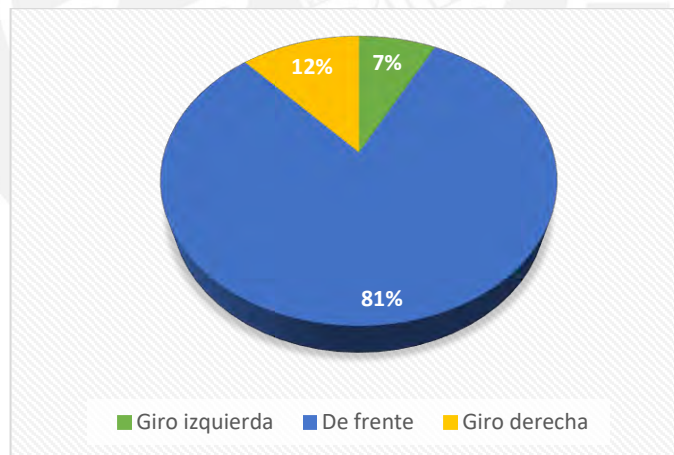


Figura 65: Rutas vehiculares en acceso Av. Aramburú

Fuente: Propia

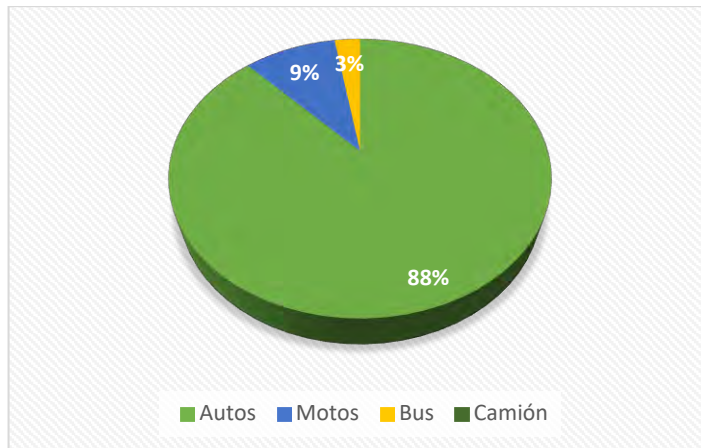


Figura 66: Tipo de vehículos en acceso 2 de Av. Arequipa

Fuente: Propia

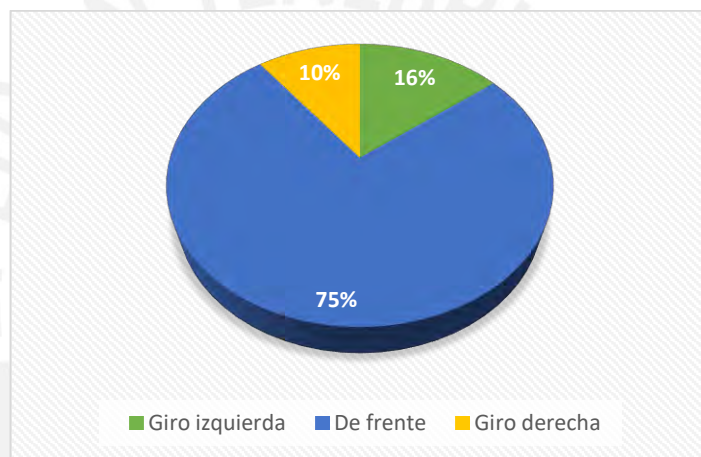


Figura 67: Rutas vehiculares en acceso 2 de Av. Arequipa

Fuente: Propia

De lo observado en los gráficos, se deduce que la mayor parte de vehículos sigue de frente. Además, la mayor parte de vehículos en la intersección son automóviles y motos. Se observa también que la presencia de buses en la Av. Arequipa es mayor debido a que es por esta avenida que pasa el sistema de transporte público. Finalmente, los giros a la izquierda desde el acceso de la Av. Aramburú son pocos en relación a la demanda total del acceso, por lo cual es adecuado restringirlo. Por otro lado, estos giros desde el acceso de la Av. Arequipa (acceso 2) si representan un mayor porcentaje, por lo cual se debe mantener ese giro como permitido.

En todos los accesos de la intersección, se observó que el mayor flujo vehicular correspondió a los que siguen de frente, lo cual se puede explicar con la importancia de las avenidas del cruce y los distritos y puntos que estas unen. Por ejemplo, la Av.

Aramburú va desde San Borja (donde se llama Av. Parque Sur), luego divide los distritos de San Isidro y Surquillo y cruza la Vía Expresa Paseo de la República. Luego, su continuación, es decir, la Av. Santa Cruz, cruza el Óvalo Gutiérrez y llega hasta el malecón de Miraflores. Por otro lado, la Av. Arequipa cruza gran parte de la ciudad de forma paralela a la Vía Expresa Paseo de la República, uniendo puntos importantes como lo son el Centro de Lima y el Óvalo de Miraflores.

En cuanto a los ciclistas y peatones, se muestra a continuación las gráficas que representan el porcentaje de usuarios que pasa por las rutas que tienen mayor demanda de ciclistas (entre los puntos B y E):

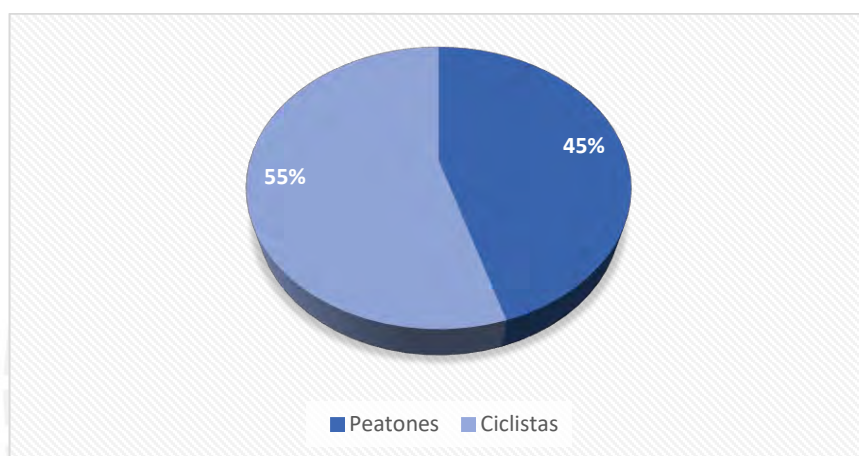


Figura 68: Tipo de usuarios en ruta B-E

Fuente: Propia



Figura 69: Tipo de usuarios en ruta E-B

Fuente: Propia

De las gráficas se deduce que la demanda es mayor en dirección hacia el Óvalo de Miraflores y que en ambos casos el flujo de ciclistas es mayor. El motivo de esto podría ser la presencia de numerosas ciclovías hacia esa dirección (distrito de Miraflores), por

ejemplo, la que recorre el Malecón de este distrito, el cual cuenta con facilidades para este tipo de usuarios. Cabe resaltar que en las filmaciones se observó que el cruce para ciclistas y el peatonal no eran exclusivos para sus respectivos usuarios, razón por la cual se consideraron dos rutas que incluían a peatones y ciclistas.

### **6.5 Análisis del modelo con propuestas de mejora**

Como ya se mencionó anteriormente, los datos correspondientes a los flujos vehiculares, peatonales y de ciclistas fueron los registrados durante la hora pico. De acuerdo a las propuestas indicadas en el capítulo 6, se obtuvo el modelo observado en la Figura 70.



*Figura 70: Modelo con propuestas de mejora  
Fuente: Propia*

Para este modelo se consideró que los vehículos que giraban a la izquierda desde el acceso de la Av. Aramburú seguían de frente. Esto mismo se tomó en cuenta para los que giraban a la derecha desde el acceso de la Av. Santa Cruz. Además, aquellos vehículos que giraban a la derecha desde la Av. Aramburú, cuentan ahora con un carril exclusivo.

Debido a los largos recorridos que deben realizar los vehículos para cruzar la intersección (35.5 y 42 m), con los tiempos de verde hallados, se observó que no muchos vehículos podían cruzar la intersección. Es por esto que se optó por un ciclo total de 120 segundos, considerando tiempos de verde en base a las proporciones halladas para cada una de las tres fases. Es así como se obtuvo un nuevo diagrama de fases, el cual se observa en la Figura 71.

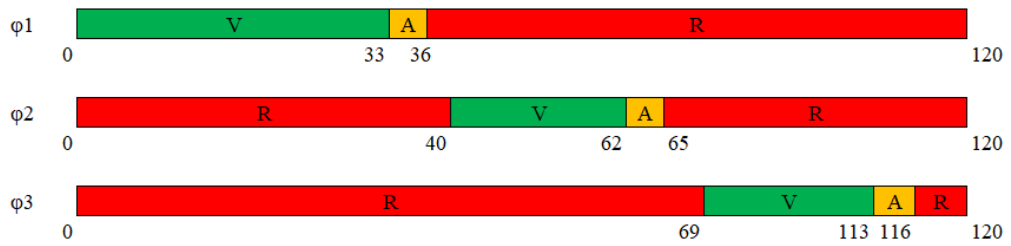


Figura 71: Nuevo diagrama de fases con ciclo de 120 segundos  
Fuente: Propia

Por otro lado, los ciclistas y peatones que cruzan entre los puntos B y E cuentan con una isla de refugio, las cuales tienen líneas de parada semafóricas en ambos sentidos. En la Figura 72 se observa una captura de pantalla de la animación 3D del nuevo modelo en el programa Vissim, en la cual se pueden observar las mejoras en las condiciones del tránsito y seguridad de los usuarios.



Figura 72: Captura de pantalla de animación 3D del nuevo modelo  
Fuente: Propia

## 6.6 Comparación de ambos modelos

A continuación se mostrarán gráficos comparativos entre el modelo original y el modelo con las propuestas de mejora (nuevo). Estos han sido obtenidos de acuerdo a los resultados del programa Vissim, en referencia a los parámetros de eficiencia mencionados en el ítem 6.3.



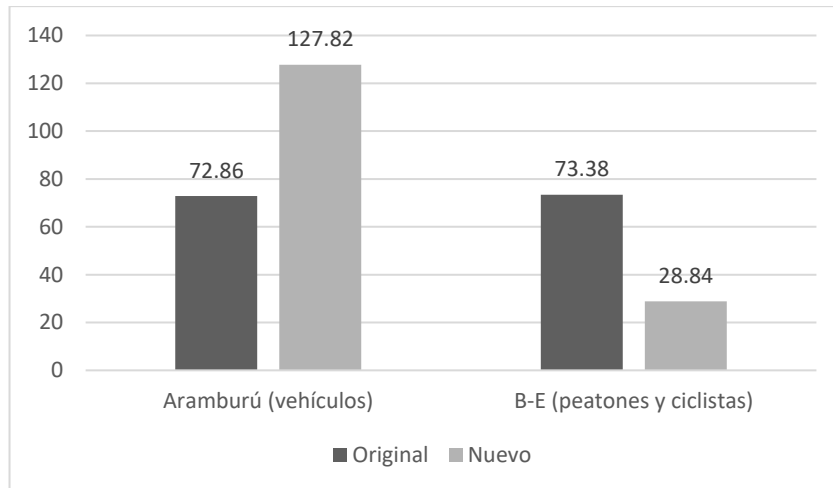


Figura 73: Tiempos de viaje (s)

Fuente: Propia

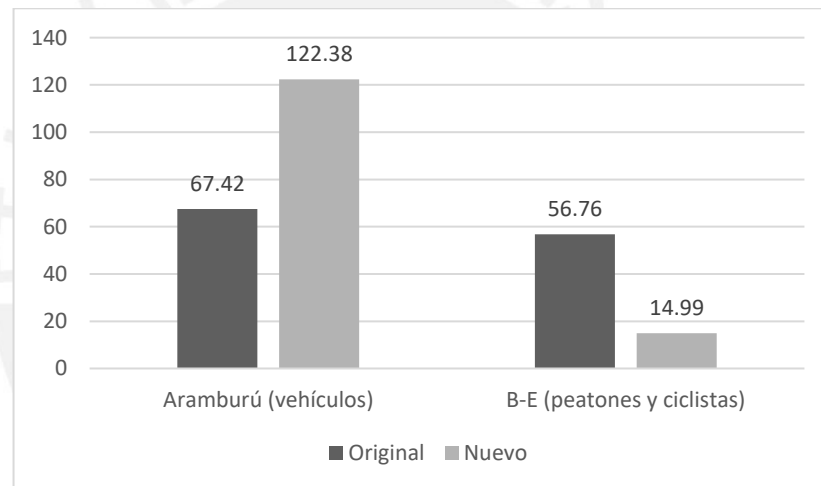


Figura 74: Demoras (s)

Fuente: Propia

De acuerdo a los gráficos de la Figura 73 y la Figura 74, se observa que los tiempos de viaje y las demoras son mayores para los vehículos motorizados que transitan por la Av. Aramburú en el nuevo modelo. Esto se puede deber a la disminución de tres a dos carriles para los que siguen de frente, además que la demanda de los vehículos que siguen de frente aumentó ya que se restringió el giro a la izquierda para este acceso.

Por otro lado, estos parámetros fueron menores en el modelo nuevo para los ciclistas y peatones que circulan por la ruta B-E. Uno de los motivos principales es la disminución de la longitud del cruce entre los puntos B y E, además del cambio en

las fases del semáforo, permitiendo que exista una fase en las que dichos usuarios puedan cruzar por esta ruta sin entrar en conflicto con ningún vehículo motorizado.

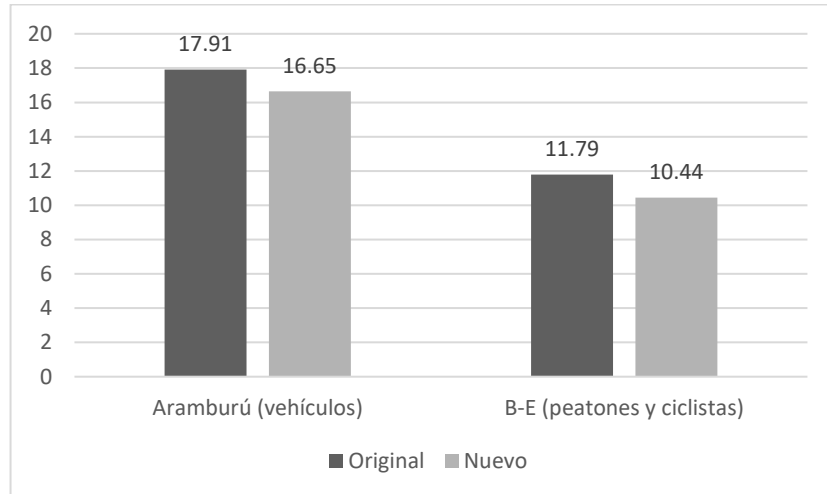
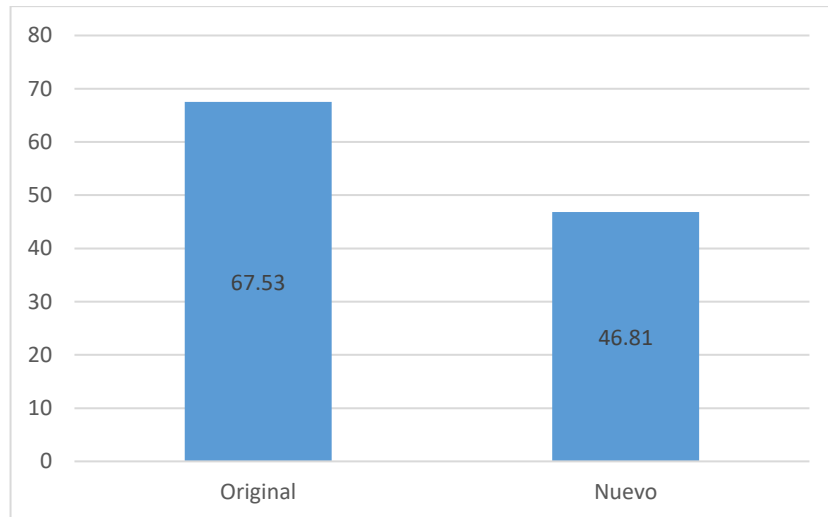


Figura 75: Velocidades (km/h)

Fuente: Propia

De acuerdo a las velocidades promedio en las dos secciones analizadas (Figura 75), se observa que estas disminuyeron para vehículos motorizados, peatones y ciclistas. Asimismo, se realizó un análisis de parámetros estadísticos con la herramienta Stat Key, donde se observó que para el caso de los vehículos, la disminución de la velocidad no fue significativa, mientras que para los peatones y ciclistas sí lo fue. Si se relaciona una disminución en la velocidad con un aumento en la seguridad, se puede concluir que los cambios efectuados en la intersección benefician en mayor medida a los usuarios de vehículos no motorizados que a los conductores de automóviles. La disminución de la velocidad se puede deber a que las fases de los semáforos son más cortas, además de contar con demandas mayores en accesos donde se busca restringir el giro a la izquierda de los vehículos.



*Figura 76: Rendimiento de la red: Demoras (s)*

*Fuente: Propia*

Este último gráfico (Figura 76) muestra una disminución de las demoras de toda la red del nuevo modelo al implementar las propuestas de mejora. Esto se presenta debido a que es mayor la reducción en las demoras para los ciclistas y peatones que el aumento en las mismas para los vehículos motorizados.

## **CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **- Conclusiones**

Luego de realizar el análisis de la microsimulación del modelo actual de la intersección de las avenidas Arequipa y Aramburú, así como el correspondiente al modelo con las propuestas de mejora, se desprenden las siguientes conclusiones.

En primer lugar, existen mejoras cuantitativas en el modelo nuevo, dentro de las que se encuentran la disminución de 40 segundos en el tiempo de demoras de la ruta para ciclistas y peatones. Además, la demora global de la red disminuyó en 20 segundos, así como la velocidad de todos los usuarios (1 km/h aproximadamente). Por otro lado, las demoras en el acceso de la Av. Aramburú se incrementaron. Debido a que la tesis está enfocada en la seguridad del ciclista, se deben priorizar los parámetros que representen mejor a estos usuarios y a los peatones. Es por esto que si bien algunos parámetros mejoran para peatones y ciclistas en el nuevo modelo, estos pueden empeorar para los usuarios motorizados, pero en menor medida.

Las mejoras cuantitativas están dadas principalmente por los cambios efectuados en las fases del semáforo. La fórmula utilizada para el cálculo del ciclo óptimo busca reducir las demoras, mientras que la geometría de la intersección y características de los usuarios como su velocidad influyen en el tiempo de todo rojo de todos los accesos. Se observó en el modelo actual que el tiempo de todo rojo no era suficiente para que los vehículos de un acceso abandonen la intersección al cambiar la luz de verde a rojo. Es por esto que, considerando la extensa longitud a recorrer por los vehículos que acceden al cruce, se obtuvo un tiempo de 4 segundos de todo rojo para cada fase.

En segundo lugar, las mejoras cualitativas vienen dadas por la señalización informativa que se propone implementar en la intersección, así como el color llamativo que se plantea para el cruce de la ciclovía. Estas mejoras se verán reflejadas en la percepción de seguridad que tengan los usuarios más vulnerables. En cuanto a la seguridad real, es decir, a la reducción de conflictos entre los distintos tipos de usuarios que interactúan en el cruce, se incrementará debido al cambio en las fases de los semáforos y la colocación de la isla de refugio, la cual brindará protección a ciclistas y peatones.

Además, mediante la colocación de señalización que brinde información de rutas alternativas a los conductores frente a los giros a la izquierda no permitidos, se busca lograr una mejora en el flujo de tránsito en la intersección y evitar las obstrucciones que estos generen en medio del cruce.

#### - **Recomendaciones**

En cuanto a las recomendaciones para que los resultados del análisis de la microsimulación sean más parecidos a la realidad son, primeramente, 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. Por ejemplo, en la intersección de la Av. Santa Cruz con Prolongación Arenales, ubicada a dos cuadras de la zona de estudio hacia el óvalo Gutiérrez, generaba colas de vehículos que llegaban hasta la intersección en estudio. Esto tuvo que modelarse colocando una zona de velocidad reducida en la salida mencionada que simule el apilamiento de vehículos.

En segundo lugar, en el modelamiento de la red se presentaron dificultades debido a la transición de tres carriles del acceso de la Av. Aramburú a un solo carril en la salida de la Av. Santa Cruz. Esto presenta serios problemas en el flujo del tránsito, ya que los vehículos cruzan muy lentamente la intersección y usualmente terminan detenidos en el medio de esta al cambiar la luz del semáforo a rojo, bloqueando el paso a otros accesos o a los ciclistas y peatones.

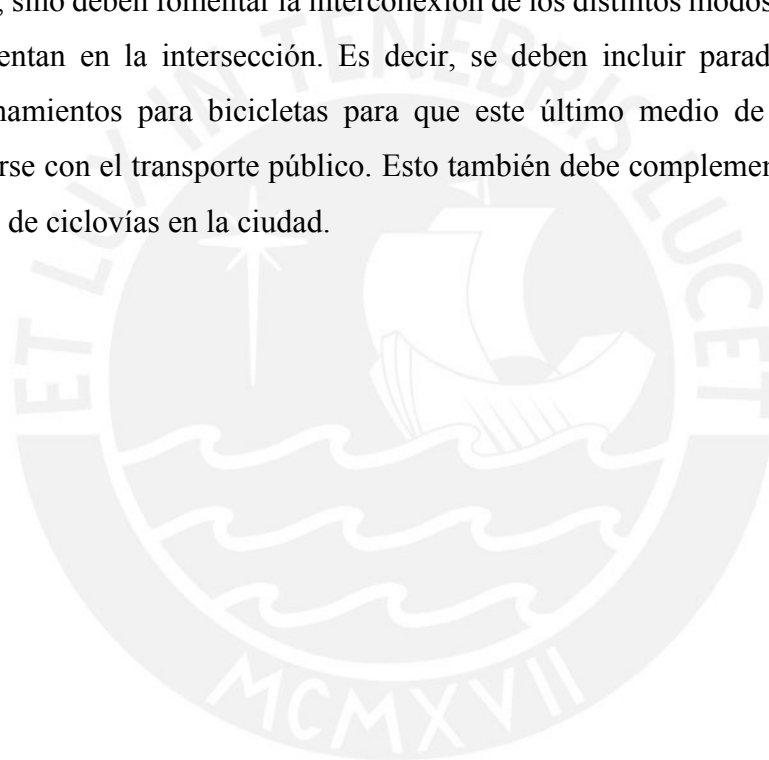
Una limitación del estudio fue que la recolección de datos no fue precisa debido a la presencia de policías de tránsito controlando el flujo en la intersección. Se recomienda efectuar la recolección de datos durante la hora punta y hora valle cuando el tránsito del cruce este siendo controlado íntegramente por las luces de los semáforos, con el fin de obtener flujos vehiculares por hora más reales.

En cuanto al diseño de la intersección, el acceso de la Av. Santa Cruz debería ser perpendicular al cruce, tal como los demás accesos, para evitar cruceros peatonales muy largos y en diagonal.

Además, considerando que la vía para ciclistas de la Av. Arequipa es bidireccional, su ancho debe ser por lo menos de 8 pies (2.45 metros) de acuerdo al manual de NACTO (2011). Actualmente, este ancho es de solo 2 metros.

Por otro lado, se recomienda que antes de efectuar la filmación para la recolección de datos, se defina la sección de vía sobre la cual se medirán los tiempos de viaje, ya sea para calibrar, validar o comparar el modelo. Esto es, para conseguir un ángulo adecuado de la cámara que permita visualizar correctamente la sección del acceso elegido.

Finalmente, este proyecto no busca solucionar la problemática del tránsito de la ciudad de Lima, sino que propone mejoras a una intersección con el fin de ver los resultados y, de ser favorables, implementar las mejoras en otros puntos de la ciudad que presenten una situación similar. Estas 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.



## BIBLIOGRAFIA

ALCALÁ, Moisés

2016 *Micro Simulación Del Tráfico De La Intersección De Las Avenidas Bolivar, Córdoba Y Calle Andalucía Empleando El Software Vissim 6*. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú.

CABRERA, Félix

2018 *Curso de Gestión del Tránsito: Manual para el uso de Vissim 8*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú

CONASET

2003 *Guía para Realizar una Auditoría de Seguridad Vial*. Santiago.

DEFENSORÍA DEL PUEBLO

2008 *El Transporte Urbano en Lima Metropolitana: Un desafío en defensa de la vida*. Lima: Biblioteca Nacional del Perú

DEXTRE, Juan y AVELLANEDA, Pau

2014 *Movilidad en zonas urbanas*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial

DEXTRE, Juan, Mike HUGHES y Lotte BECH

2015 *Ciclistas y ciclismo alrededor del mundo*. Lima: Pontificia 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: Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial.

FONTALVO, Ketty

2013 *Modelación del tráfico vehicular con el software PTV Vissim -Tramo Bomba El gallo - Bomba El Amparo*. Cartagena: Universidad de Cartagena

INEI

2016 *V Censo Nacional de Comisarías 2016*. Consulta: 19 de Marzo de 2018

[http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1461/index.html](http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1461/index.html)

BICIRED

2005 *Manual de Diseño para Infraestructura de Ciclovías*. Lima.

INSTITUTO DE OPINIÓN PÚBLICA DE LA PUCP

2016 *Encuesta Lima Como Vamos 2016*. Lima: Asociación Unacem

KITSUTA, Andrés

2017 *GUÍA DE PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE BICICLETAS PÚBLICAS EJEMPLO PARA EL DISTRITO DE SAN MIGUEL*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú.

LOSKORN, Jeff y otros

2013 *Effects of Bicycle Boxes on Bicyclist and Motorist Behavior at Intersections in Austin, Texas*. *Journal of Transportation Engineering*. 139 (10)

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES (MTC)

2016 *Manual de Dispositivos de Control de Tránsito Automotor para Calles y Carreteras*. Resolución Directoral N° 16-2016-MTC/14

MUNICIPALIDAD DE LIMA

2017 *Manual de Criterios de Diseño de Infraestructura Ciclo-inclusiva y Guía de Circulación del Ciclista*. Lima.



NATIONAL ASSOCIATION OF CITY TRANSPORTATION OFFICIALS  
(NACTO)

2011 *Urban Bikeway Design Guide*. Estados Unidos.

PTV GROUP

*PTV Vissim*. Consulta: 20 de marzo de 2018

RANJITKAR, Prakash y otros

2005 Car-Following Models: An Experiment Based Benchmarking. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp 1582-1596

ROWANGOULD, Gregory y Mohammad TAYARANI

2016 Effect of Bicycle Facilities on Travel Mode Choice Decisions. *Journal of Urban Planning and Development*. 142 (4)

SUÁREZ, Liliana

2007 *Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante la microsimulación*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

STAT KEY

*StatKey: Randomization Test for a Difference in Means*. Consulta: 11 de junio de 2018

[http://www.lock5stat.com/StatKey/randomization\\_1\\_quant\\_1\\_cat/randomization\\_1\\_quant\\_1\\_cat.html](http://www.lock5stat.com/StatKey/randomization_1_quant_1_cat/randomization_1_quant_1_cat.html)

TRANSMILENIO S.A.

2016 *Manual del Usuario para Cicloparqueaderos*. Consulta: 23 de mayo de 2018

[http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/nuestro\\_sistema/como\\_utilizar\\_el\\_sistema/manual\\_del\\_usuario/Cicloparqueaderos](http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/nuestro_sistema/como_utilizar_el_sistema/manual_del_usuario/Cicloparqueaderos)

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD

2016 *Guidance to Improve Pedestrian and Bicycle Safety at Intersections*.  
Consulta: 4 de octubre de 2017.

<http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=4048>

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION

1992 *Revised Monograph on Traffic Flow Theory*. Federal Highway  
Administration. Consulta: 21 de noviembre de 2017

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/>

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION

2004 *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic  
Microsimulation Modeling Software*. Virginia. Federal Highway  
Administration.

VELOZ, Jimena

2012 *Acupuntura Urbana*. Consulta: 16 de noviembre de 2017

<http://transeunte.org/articulos/acupuntura-urbana/>

