UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA CIVIL

CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN BPR EN VÍAS COLECTORAS DE LIMA METROPOLITANA, BASADA EN EL CASO DE LA AVENIDA SAN LUIS

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Carbonell Remigio, Esmirna Géminis (0000-0002-4813-0264)

García Vicente, Sergio Manuel (0000-0002-6548-1437)

Asesor:

Castro Aragón, Fernando Ramiro (0000-0001-7638-5961)

Lima, 14 de Julio del 2020

DEDICATORIA

A nuestros padres, pilares fundamentales de nuestras vidas, con mucho amor les dedicamos todo nuestro esfuerzo en reconocimiento a todo el sacrificio y dedicación para forjarnos como profesionales; se merecen esto y mucho más.

AGRADECIMIENTO

Con profundo agradecimiento a nuestra alma mater, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) por su formación integral durante nuestra vida universitaria, y especial a la facultad de Ingeniería Civil.

Asimismo, agradecemos al Doctor Fernando Castro Aragón por sus conocimientos, orientaciones y su paciencia para guiarnos en esta investigación.

RESUMEN

Para tomar decisiones sobre alternativas para reducir los efectos negativos de la congestión, se debe planificar el transporte. La planificación requiere, según el enfoque clásico, el conjunto secuencial de cuatro (04) modelos de transporte para tomar decisiones pertinentes. El cuarto y último modelo corresponde a la asignación de tráfico, el cual requiere de la función BPR.

La función BPR (Bureau of Public Roads) estima el tiempo de viaje (T_f) respecto al flujo de transporte (V), a la capacidad (C), al tiempo de viaje en flujo libre (t_0) y a los parámetros (α y β), los cuales deben reflejar el desempeño de la infraestructura vial.

En Lima Metropolitana, como en otras ciudades de Latinoamérica, suele emplearse valores estandarizados de α y β en la función BPR, esto significa que dichos valores no están ajustado a las condiciones actuales de la ciudad. A partir de ello, se genera incertidumbre en la estimación de los datos de salida de la función (tiempo de viaje) y en efecto, incertidumbre en la eficiencia de las decisiones para disminuir la congestión.

El objetivo de la presente investigación es calibrar la función BPR, es decir, estimar los valores de α y β . Y, en consecuencia, asegurar que esta represente, de manera confiable, el comportamiento vial en Lima Metropolitana, específicamente en la vía colectora: Avenida San Luis.

La metodología se desarrolla en tres (03) etapas: Levantamiento de información, determinación de los parámetros y análisis de los resultados.

Como resultado de la calibración se obtiene valores de $\alpha=2.22$ y $\beta=1.19$, y se demuestra que la función calibrada representa de forma adecuada los tiempos de viaje observados en la vía en estudio. En cambio, la utilización de valores estandarizados no resulta ser la mejor para dicha representación, y por el contrario, presenta errores significativos.

Palabras clave: Planificación del transporte, modelos de transporte, modelo de asignación de tráfico, calibración, función BPR.

ABSTRACT

In order to take decisions about alternatives to reduce the congestion's negative effects, transport must be planified. Planification requires, according to the classic approach, the four-model transport sequential set to take the pertinent decisions. The fourth and last model corresponds to the traffic allocation, that requires the BPR function.

The BPR function (Bureau of Public Roads) estimates the travel time (T_f) regarding the transport's flow (V), the capacity (C), the travel time in free flow (t_0) and the parameters (α y β), that reflect the performance of the road infrastructure.

In the city of Lima, as in others Latinamerican cities, it is common to use standarised values of α and β in BPR function. That means that those values are not adjusted to the city's current conditions. On that basis, uncertainty arises on the function of the data output (travel time) and also on the efficiency of the decisions taken to diminish the traffic congestion.

The main approach of this investigation is to calibrate the BPR function, that means, to estimate the functions of α y β , and, because of it, ensure that this function represents the traffic behavoir in the city of Lima in a reliable way, specifically in the collector road: San Luis Avenue.

The methodology is developed in three stages: gathering of information, determination of the parameters and analysis of the results.

As a result of the calibration, the values obtained are $\alpha=2.22$ and $\beta=1.19$, and it is demonstred that the calibrated functions represent in a reliable way the travel times observed in the studied avenue. However, the use of standarised values is not the best one for such representation, and, on the contrary, it shows significative errors.

Key words: Transportation planning, modelling transport, traffic Assignment, calibration, BPR function.

CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	11
GENERALIDADES	11
1.1. INTRODUCCIÓN	11
1.2. PROBLEMÁTICA	12
1.3. HIPÓTESIS.....	12
1.4. JUSTIFICACIÓN	13
1.5. OBJETIVOS.....	14
1.5.1. Objetivo general	14
1.5.2. Objetivos específicos	14
1.6. INDICADORES DE LOGRO	14
1.7. METODOLOGÍA	15
1.8. ZONA DE APLICACIÓN.....	16
CAPÍTULO II	19
MARCO TEÓRICO	19
1.1 CLASIFICACIÓN DEL SISTEMA VIAL URBANO.....	19
2.1.1. Vías expresas	19
2.1.2. Vías arteriales	21
2.1.3. Vías colectoras	22
2.1.4. Vías locales.....	23
2.2 PLANIFICACIÓN Y MODELOS DE TRANSPORTE.....	25
2.2.1. Planificación del transporte	25
2.2.2. Modelos de transporte.....	26
2.3 MODELOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO.....	27
2.4 FUNCIÓN BPR	28
2.4.1. Definición de la función BPR.....	28
2.4.2. Elementos de la función BPR.....	29
2.4.3. Parámetros alfa y beta de la función BPR	30
2.5 SISTEMA DE ECUACIONES NO LINEALES	32
2.5.1. Definición de sistema de ecuaciones no lineales.....	32
2.5.2. Métodos de solución de sistemas de ecuaciones no lineales	32
2.6 CRITERIOS DE VALIDACIÓN	35
2.6.1. Indicador GEH	35
2.6.2. Estadístico %RMSE	36
CAPÍTULO III.....	37
LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	37
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ARCO	37
3.1.1. Definición de arco	37
3.1.2. Determinación de las características del arco	37
3.2 VOLUMEN VEHICULAR	38
3.2.1. Definición de volumen vehicular.....	38
3.2.2. Determinación del volumen vehicular	38
3.3 TIEMPO DE VIAJE	40
3.3.1. Definición del tiempo de viaje.....	40
3.3.2. Determinación de los tiempos de viaje	40
3.4 TIEMPO DE FLUJO LIBRE	44
3.4.1. Definición del tiempo de flujo libre	44
3.4.2. Determinación de los tiempos de flujo libre	44

3.5	VELOCIDAD DE VIAJE.....	46
3.5.1.	Definición de velocidad de viaje	46
3.5.2.	Determinación de las velocidades de viaje.....	46
3.6	CAPACIDAD VIAL	47
3.6.1.	Definición de capacidad vial.....	47
3.6.2.	Determinación de la capacidad vial	47
CAPÍTULO IV		62
CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN BPR		62
4.1	PROCESO DE CALIBRACIÓN	62
4.2	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS ALFA Y BETA	63
4.3	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	65
CAPÍTULO V		67
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS		67
5.1.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS FUNCIONES VOLUMEN-DEMORA 67	
5.2.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS TIEMPOS Y VELOCIDADES DE VIAJE 73	
CONCLUSIONES		76
RECOMENDACIONES.....		77
BIBLIOGRAFÍA.....		78
ANEXOS.....		81
ANEXO 01:.....		81
ANEXO 02:.....		84
ANEXO 03:.....		90
ANEXO 04:.....		92
ANEXO 05:.....		92
ANEXO 06:.....		94
ANEXO 07:.....		95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Valores de α y β de la función BPR del Highway Capacity Manual 2010	30
Tabla N° 2 Valores de α y β de la función BPR del Plan maestro de transporte urbano de Lima y Callao	31
Tabla N° 3 Valores de α y β de la función BPR del Ministerio de Transportes y Comunicaciones	31
Tabla N° 4 Características del arco, Av. San Luis.....	38
Tabla N° 5 Factores de equivalencia por tipo de vehículo.....	39
Tabla N° 6 Volumen de vehículos equivalentes por hora	39
Tabla N° 7 Porcentaje de composición vehicular del periodo de análisis en el arco..	40
Tabla N° 8 Valores de Z para varios niveles de confianza	42
Tabla N° 9 Composición vehicular horaria en el arco.....	42
Tabla N° 10 Tamaño mínimo de muestra horaria para cada tipo de vehículo	43
Tabla N°11 Tiempo de viaje promedio en horas de máxima demanda.	43
Tabla N°12 Tamaño de la muestra necesario para estudios de tiempo con un nivel de confianza de 95%	45
Tabla N°13 Tiempo de flujo libre promedio en el arco.....	45
Tabla N°14 Velocidades de viaje promedio en horarios de máxima demanda	46
Tabla N°15 Tiempo de las fases del Semáforo	48
Tabla N°16 Ancho de Carril	50
Tabla N°17 Resultados de las mediciones en campo	62
Tabla N°18 Valores de las variables X e Y.....	63
Tabla N°19 Valores los parámetros calibrados de la función BPR	64
Tabla N°20 Validación de los parámetros α y β obtenidos	66
Tabla N°21 Comparación de valores para los parámetros α y β	67

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1 Zona de aplicación: Avenida San Luis	17
Gráfico N° 2 Avenida Javier Prado Este	20
Gráfico N° 3 Tramo de Avenida Angamos	21
Gráfico N° 4 Avenida San Luis.....	23
Gráfico N° 5 Jirón Aldebarán	24
Gráfico N° 6 Secuencia de los modelos de planificación de transporte	25
Gráfico N° 7 Funciones V/C vs tiempo de viaje.....	68
Gráfico N° 8 Funciones V/C vs tiempo de viaje – $V/C < 1$	69
Gráfico N° 9 Funciones V/C vs tiempo de viaje – $V/C > 1$	70
Gráfico N° 10 Funciones V/C vs velocidad de viaje	71
Gráfico N° 11 Funciones V/C vs velocidad de viaje	72
Gráfico N° 12 Diagrama de barras de los tiempos asignados y observados	73
Gráfico N° 13 Comportamiento de los tiempos de viaje asignado y observado.....	74
Gráfico N° 14 Diagrama de barras de las velocidades observadas y asignadas	75
Gráfico N° 15 Comportamiento de las velocidades de viaje observadas y asignadas .	75

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen N° 1 Modos de Transporte de la avenida San Luis	18
Imagen N° 2 Vista de Avenida Javier Prado Este	20
Imagen N° 3 Vista de tramo de Avenida Angamos	22
Imagen N° 4 Vista de Avenida San Luis	23
Imagen N° 5 Vista de Jirón Aldebarán	24
Imagen N° 6 Vista de Avenida San Luis.....	51
Imagen N° 7 Vista de los vehículos pesados	52
Imagen N° 8 Vista de los vehículos pesados	52
Imagen N° 9 Vista del carril de estacionamiento	54
Imagen N° 10 Vista desde la panadería San Luis	56
Imagen N° 11 Vista de la panadería San Luis.....	57
Imagen N° 12 Vista de Nori Sushi bar.....	57
Imagen N° 13 Vista de Banco BanBif.....	58
Imagen N° 14 Vista de Galería los Portales de San Borja.....	58
Imagen N° 15 Vista de Sastrería, Piñatería.....	59
Imagen N° 16 Vista de Caja Sullana	59
Imagen N° 17 Vista de ciclista	61

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Los efectos de la congestión vehicular están relacionados con mayores tiempos de viaje, y para reducir estos efectos negativos, las autoridades deben decidir sobre distintas alternativas de intervención, por ello deben enfrentar el reto de planificar el transporte¹. A partir de las teorías de la ingeniería de tránsito, se infiere que para elaborar una exitosa planificación del transporte, se debe partir por elaborar modelos de transporte que representen, lo más exacto posible, la realidad de una red vial².

Los modelos de transporte, según el enfoque clásico, es el conjunto secuencial de cuatro (04) etapas: modelo de generación de viajes, modelo de distribución de viajes, modelo de partición modal y el modelo de asignación de tráfico.

En cuanto a la última etapa, el modelo de asignación considera normalmente la función BPR para estimar el tiempo requerido para recorrer, en un vehículo, un segmento de vía (arco) en función al flujo. Esta función tiene parámetros críticos denominados alfa y beta (α y β), los cuales deben ser calibrados para reflejar el comportamiento observado de los usuarios respecto a la elección de rutas³.

Actualmente, en muchas ciudades de Latinoamérica, como Lima Metropolitana, los valores de α y β de la función BPR son estandarizados a fin simplificar su uso, ya que resulta difícil, para las autoridades encargadas, invertir esfuerzos en calibrar estos parámetros según las distintas condiciones presentes en la ciudad. A partir de lo mencionado, los resultados de la función BPR no reflejarían las condiciones observadas en el sistema de transporte de la ciudad, por lo cual afectaría en las decisiones para reducir los efectos negativos de la congestión.

¹ Cfr. Santos et al., 2010

² Cfr. Ortúzar & Willumsen, 2008

³ Marquez et al., 2014

La presente investigación tiene como objetivo determinar los valores de los parámetros α y β de la función BPR que representen, lo más exacto posible, el comportamiento observado en el caso de estudio. A este proceso se le denomina: calibración⁴.

La metodología empleada en la presente tesis fue la investigación científica, pues se basa en la aplicación metodologías de la ingeniería de tránsito, las matemáticas y estadísticas para determinar las condiciones del caso de estudio y los objetivos propuestos en la investigación.

A partir de los resultados de la investigación se espera obtener parámetros α y β ajustados a la realidad de la ciudad de Lima Metropolitana, específicamente en vías colectoras como la Avenida San Luis. Asimismo, realizar un análisis e interpretación del comportamiento obtenido.

1.2. PROBLEMÁTICA

¿Los valores de los parámetros α y β que suelen emplearse en la función BPR se aproximan a representar la realidad vial de Lima Metropolitana?

¿Qué parámetros α y β de la función BPR deben utilizar para elaborar el modelo de asignación de tráfico y obtener éxito en la planificación del transporte?

Existe la incertidumbre por qué valores de α y β utilizar para elaborar el modelo de asignación de tráfico, ya que para obtener un resultado exitoso en la planificación del transporte, los modelos debe representar -lo más exacto posible- la realidad vial de un sistema; a partir de ello se cuestiona si debe utilizar valores α y β estándares o si estos deben ser calibrados.

1.3. HIPÓTESIS

Se debe utilizar parámetros α y β calibrados, pues el proceso de calibración implica que el resultado de estos valores se obtenga a partir de condiciones actualizadas y específicas de un sistema vial; entonces, de esta manera, se infiere que el modelo de asignación de tráfico representará la realidad vial con mayor exactitud.

⁴ SCT, 2006

1.4. JUSTIFICACIÓN

En términos conceptuales, la modelización del transporte no es específicamente la planificación, sin embargo, es una herramienta importante al momento de tomar decisiones en la planificación, pues su propósito es reflejar el comportamiento real de un sistema vial mediante conceptos matemáticos con el fin de predecir situaciones⁵. Entonces, mientras mejor exactitud se logre en la modelización del transporte, mejor refleja la realidad y las predicciones.

Bajo este concepto, para garantizar la representación de la realidad, los parámetros α y β de la función BPR deberían involucrar los escenarios actuales en cuanto a espacio, tiempo y características de la red⁶. Sin embargo, en Lima Metropolitana, se utilizan parámetros propuestos del “Highway Capacity Manual” (HCM, 2010), o los calibrados en el 2005 en el Plan Maestro de Transporte Urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú (JICA, 2005), o los recomendados en la “Metodología de actualización del modelo de transporte del área Metropolitana de Lima y Callao” (MTC, 2010)

Los parámetros propuestos por el “Highway Capacity Manual” están establecidos para cada categoría de vía; sin embargo, estas investigaciones se han realizado en base a investigaciones experimentales en otros países. Los parámetros presentados en el “Plan Maestro de Transporte Urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú” se han realizado también para cada categoría de vía y en función a las condiciones presentes en el año 2005, sin embargo, estas han variado notablemente entre ese año y la actualidad. Por último, la “Metodología de actualización del modelo de transporte del área Metropolitana de Lima y Callao” recomienda –en caso de no realizar una calibración- adoptar los parámetros α y β según el Plan Maestro o emplear valores típicos para todas categorías de vías.

⁵ Cfr. Ortúzar & Willumsen, 2008

⁶ Cfr. SCT, 2006

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Determinar valores de los parámetros α y β de la función BPR que reflejen las condiciones observadas en el caso de estudio; es decir, calibrar la función BPR.

1.5.2. Objetivos específicos

- Identificar una avenida representativa de las vías colectoras, y a partir de ella, determinar un arco representativo de la misma, para recolectar los principales elementos de las características de la vía: flujo vehicular, tiempos de viaje, tiempo de flujo libre y capacidad, con el fin de identificar el comportamiento del tránsito vehicular en la avenida en estudio.
- Calibrar la función BPR mediante una metodología para obtener valores de los parámetros α y β ajustados a las condiciones actuales del caso en estudio. Asimismo, validar los resultados mediante indicadores estadísticos GEH y %RMSE.
- Analizar e interpretar el comportamiento e implicancias de utilizar los parámetros calibrados y los estándares en la función BPR, en base al comportamiento observado en el caso de estudio.

1.6. INDICADORES DE LOGRO

- Verificar que los datos tomados en campo cumplan con los requerimientos mínimos propuestos por las teorías estadísticas de muestro.
- Obtener valores de α y β diferentes al estándar. Asimismo, obtener como resultado del indicador estadístico $\%RMS \leq 30\%$ y en cuanto al GEH, el 100% de los resultados debe ser menor a 12.
- Evidenciar diferencias entre el comportamiento de los resultados obtenidos frente al estándar, mediante un análisis gráfico de las funciones.

1.7. METODOLOGÍA

La metodología empleada en la presente tesis fue la investigación científica, la cual se caracteriza, principalmente, por ser metódica, pues se aplican metodologías de la ingeniería de tránsito, las matemáticas y estadísticas para determinar las condiciones del caso de estudio y los objetivos propuestos en la investigación.

La presente investigación consta de tres (03) etapas que deben ser desarrolladas según las metodologías adecuadas.

- Primera etapa: Levantamiento de información.
- Segunda etapa: Calibración de la función.
- Tercera etapa: Análisis e interpretación de los resultados.

En la primera etapa se aplicaron métodos estadísticos para determinar los tamaños de muestra mínimo que requieren algunos datos de entrada que requiere la función: tiempos de viaje, tiempos en flujo libre y velocidades de viaje. La capacidad vial, se determinó a partir de las recomendaciones del HCM 2010. Asimismo, se utilizó técnicas de recolección para los datos mencionados y el volumen vehicular.

En la segunda etapa se aplicó métodos matemáticos, específicamente para la solución matricial de ecuaciones, a fin de obtener valores para los parámetros α y β . Asimismo, en esta etapa se validaron los resultados obtenidos a partir de indicadores estadísticos de validación.

La última etapa consistió en realizar un análisis e interpretación gráfico de los resultados obtenidos frente al estándar.

1.8. ZONA DE APLICACIÓN

En la elección de la zona de aplicación se estableció analizar una vía representativa en la ciudad de Lima Metropolitana, para lo cual se consideraron las siguientes características:

- Presencia de efectos negativos debido a la congestión.
- Presencia de transporte público y privado.
- Relevancia en el sistema vial de la ciudad.

A partir de ello se infirió realizar la investigación en una vía colectora y específicamente en la Avenida San Luis. Posteriormente, se escogió un segmento representativo de la vía para realizar la recolección de datos.

El arco se encuentra entre la avenida San Borja Sur y la calle Hadraza, en el sentido de sur a norte, como se muestra en el gráfico N°2. La recolección de datos se realizó según las consideraciones del Manual de modelación preparado para la secretaria de Comunicaciones y Transportes de México.

El periodo de análisis se efectuó durante los días 23, 24 y 25 de agosto del año 2016 durante dos turnos. El turno diurno de 7:00 a.m. a 10:00 a.m. y el nocturno de 6:00 p.m. a 9:00 p.m.

Gráfico N° 1 Zona de aplicación: Avenida San Luis

Fuente: Elaboración propia.

Los modos de transporte que existen en nuestra zona de investigación son los que se muestran en el siguiente gráfico:

Camión Pequeño

Taxi

Moto Lineales

Microbús

Bicicletas

Camioneta 4x4

Otros vehículos

Otros vehículos

Imagen N° 1 Modos de Transporte de la avenida San Luis

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1.1 CLASIFICACIÓN DEL SISTEMA VIAL URBANO

El Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG) consideran dentro del manual de diseño geométrico de vías urbanas la clasificación del sistema vial urbano y las define tal como se menciona en los siguientes puntos. Además, se refuerza dichas definiciones con los conceptos que maneja el Plan Maestro de Transporte Urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao de la República del Perú.

2.1.1. Vías expresas

Las vías expresas son para el tránsito de altos volúmenes y considerable velocidad en las que las entradas y salidas son controladas por los intercambios que se conectan con otras vías expresas o vías arteriales por intersecciones a desnivel. Estas vías establecen la relación entre el sistema interurbano y el sistema vial urbano. Así mismo, facilitan a una movilidad óptima para el tráfico cuando es directo. Son exclusivos para los viajes largos entre las grandes áreas de viviendas o concentraciones comerciales. El flujo en esta vía es ininterrumpido. Presenta una magnitud mayor de vehículos livianos que vehículos pesados. En esta vía está prohibido el uso de vehículos menores como bicicletas, la descarga de mercaderías, el estacionamiento, ni la circulación de peatones. Este tipo de vías también han sido llamadas “autopistas”⁷.

⁷ Cfr ICG 2013

Gráfico N° 2 Avenida Javier Prado Este

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

Imagen N° 2 Vista de Avenida Javier Prado Este

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

2.1.2. Vías arteriales

Las vías arteriales tienen como función principal de servir al tránsito que son originados en las vías colectoras y son llamadas también con el nombre de Avenidas o Corredores Viales. Es importante saber que las intersecciones de las vías arteriales con las vías expresas o entre dos vías arteriales deberían ser a desnivel; sin embargo, en la actualidad la gran mayoría de estas intersecciones existentes son a nivel, donde los semáforos no funcionan adecuadamente a estas intersecciones, generando que los policías de tránsito ordenen el flujo vehicular del tránsito. Las vías arteriales permiten el tránsito vehicular con media o alta fluidez. Estas vías deben ser integradas dentro del sistema de vías expresas y permitir una buena distribución y repartición del tráfico a las vías colectoras y locales. Las bicicletas están permitidas en ciclo vías; sin embargo, el estacionamiento y descarga de mercancías en este tipo de vía está prohibido⁸.

Gráfico N° 3 Tramo de Avenida Angamos

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

⁸ Cfr. ICG 2013

Imagen N° 3 Vista de tramo de Avenida Angamos

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

2.1.3. Vías colectoras

Estas vías sirven para llevar el tránsito de las vías locales a las arteriales y en algunos casos a las vías expresas como lo indica el plan maestro de transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao. Las vías colectoras están conectadas con las vías locales por intersecciones a nivel para las entradas y salidas habitualmente no son semaforizadas. Han recibido muchas veces el nombre genérico de Jirón, Vía Parque, e inclusive Avenida. Pueden ser colectoras distritales o interdistritales, correspondiendo esta clasificación a las Autoridades Municipales⁹. El estacionamiento de vehículos se realiza en estas vías en áreas adyacentes. Reciben soluciones especiales para los cruces peatonales, donde existían volúmenes de vehículos y/o peatones de magnitud apreciable.

⁹ Cfr. JICA 2005

Gráfico N° 4 Avenida San Luis

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

Imagen N° 4 Vista de Avenida San Luis

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

2.1.4. Vías locales

El plan maestro del transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao considera también que las vías locales sirven a los distritos y su función principal es permitir el acceso a las propiedades urbanas. La mayoría de las vías locales tienen dos carriles para ambas direcciones y generalmente son llamadas como calles. Por ellas transitan vehículos livianos, ocasionalmente semipesados.

Se permite estacionamiento vehicular y existe tránsito peatonal irrestricto. Las vías locales se conectan entre ellas y con las vías colectoras¹⁰.

Gráfico N° 5 Jirón Aldebarán

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

Imagen N° 5 Vista de Jirón Aldebarán

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

¹⁰ Cfr. JICA, 2005

2.2 PLANIFICACIÓN Y MODELOS DE TRANSPORTE

2.2.1. Planificación del transporte

Debido a la complejidad en los sistemas de transporte, es oportuno realizar la planificación del transporte, con el fin de tomar decisiones a corto o largo plazo. Es necesario, para la planificación, utilizar herramientas analíticas que permitan reflejar la realidad; es el uso de modelos matemáticos la herramienta de gran utilidad para la planificación del transporte.

El enfoque clásico de la planificación general de transporte se basa en el modelo equilibrio entre oferta y demanda, las cuales constan de 4 etapas, como se muestra en el gráfico N°1. Los tres primeros responden a los modelos de demanda del transporte, mientras que el último, a la oferta.¹¹

Gráfico N° 6 Secuencia de los modelos de planificación de transporte

Fuente: Ortúzar & Willumsen, 2008

¹¹ Cfr. Ortúzar & Willumsen, 2008

2.2.2. Modelos de transporte

Los modelos de transporte son una representación simplificada de la realidad del sistema vial en un determinado espacio. Se utiliza para lograr mayor claridad conceptual sobre la realidad con el fin de reducir la variabilidad y la complejidad de tal forma que permita comprenderse y especificarse de forma adecuada para su análisis.

El esquema clásico de la planificación de transporte consta de cuatro etapas; cada una de ellas se basa en un modelo de transporte representado por la generación de viajes, distribución de viajes, partición modal y asignación de tráfico, respectivamente. A partir de los conceptos presentados por Ortúzar y Willumsen, se puede extraer las siguientes definiciones de los modelos de transporte en cada etapa.

El modelo de generación de viajes permite representar la demanda vehicular. La generación de viaje identifica y cuantifica los viajes realizados por personas en una determinada área.

El modelo de distribución de viajes permite ver cómo se distribuyen la demanda vehicular en el sistema, es decir, a dónde se dirigen los usuarios. Se utiliza para predecir flujos entre zonas de origen y destino.

El modelo de partición modal permite conocer el tipo de transporte que utilizan los usuarios en determinar zonas. Se utilizan para analizar y predecir la elección de las personas al escogerlos modos de transporte utilizados para cada tipo de viaje.

Los modelos de asignación de tráfico permiten modelar la oferta. Se caracteriza el comportamiento del usuario con relación a la ruta que eligen para realizar el viaje¹².

¹² Cfr. Lizarbe, 2015

2.3 MODELOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO

En esta última etapa se inserta el nuevo concepto de modelizar la oferta. La oferta de transporte está constituida por la red vial, representada por arcos (rutas) y por sus costos (tiempo de viaje).

Los modelos de asignación de tráfico caracterizan el comportamiento del usuario en relación con la ruta que realizan en una red vial de transporte. El modelo está basado en dos principios de Wardrop¹³.

El primer principio: Equilibrio del usuario, supone que los usuarios eligen una ruta buscando minimizar sus costos –o tiempo- de viaje. Entonces, se espera que los usuarios opten por las rutas más cortas, pues el tiempo destinado en recorrerlo se supone menor. Sin embargo, debido a la existencia de la congestión vehicular, cuando muchos usuarios usan las mismas rutas cortas, el tiempo de recorrido resulta mayor al esperado.

En consecuencia, bajo este escenario, los usuarios consideran otras rutas, que sin necesidad de ser las más cortas, puedan resultarle un menor costo. Cuando todos los usuarios hayan encontrado la ruta que implique menor costo, entonces se encuentra en equilibrio la red de transporte.

El segundo principio: Óptimo del sistema, se contrasta con el primero. Supone que, si todos los usuarios perciben el tiempo de los viajes del mismo modo, bajo las condiciones de equilibrio, todas las rutas, desde el origen al destino, tienen el mismo tiempo mínimo; mientras que las no utilizadas requieren un tiempo mayor o igual.

El primer principio es utilizado para modelar el comportamiento de los usuarios, mientras que el segundo va dirigido al planificador como un criterio para diseñar la red de transporte.

Si no se considerase la congestión vehicular, los dos principios de Wardrop serían equivalentes, ya que los arcos operarían en condiciones de flujo libre. Sin embargo, evidentemente, la realidad no es ajena a la congestión; por ello los efectos de la congestión son representados mediante las curvas costo-tiempo.

¹³ Ortúzar & Willumsen, 2008

Los métodos de asignación que consideran los efectos de la congestión utilizan funciones que relacionan las características del arco (capacidad, velocidad de flujo libre) y el flujo respecto a la red (velocidad de recorrido y costos de viaje resultantes). Existen varias propuestas que pueden representar esta relación, este es el caso de las curvas costo-flujo o también llamadas función volumen-demora.

Las funciones volumen-demora relacionan el tiempo de viaje de cada arco con el flujo. Las principales funciones utilizadas son las siguientes: Smock (1962), Oberggaard (1967), BPR (1964), Departamento de Transporte del Reino Unido (1985) y Akcelik (1991) ¹⁴.

2.4 FUNCIÓN BPR

2.4.1. Definición de la función BPR

La función BPR (Bureau of Public Roads, también llamada en la actualidad Federal Highway Administration) es, sin duda, la más usada posiblemente a su simplicidad. Esta función es de uso muy común en los modelos de flujo de tránsito y su sencilla formulación permite una interpretación útil de sus parámetros. (Márquez, 2014)

La recomendación más común en referencias básicas y manuales de software es usar la BPR estándar con $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4$; estos valores son usuales en modelación de redes urbanas. Esta función BPR estándar se obtuvo mediante ajustes de ecuaciones polinomiales con datos colectados en carreteras exclusivamente norteamericanas no congestionadas a finales de la década de los años 1950, en el desarrollo de los procedimientos de análisis del *Highway Capacity Manual* (HCM, 2010).

La función BPR determina el tiempo de viaje del arco en función al flujo y a la capacidad del mismo, además involucra los parámetros α y β . El parámetro α determina la relación entre la velocidad de flujo libre con la velocidad de

¹⁴ Cfr. Márquez et al 2014

congestión, mientras que el parámetro β , la rapidez con que disminuye la velocidad al aumentar la relación del volumen y la capacidad.¹⁵ La función tiene la siguiente forma:

$$T_f = t_o * \left[1 + \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right] \quad [1]$$

Donde,

- T_f : Tiempo de recorrido del arco
- T_o : Tiempo de recorrido del arco a velocidad de flujo libre
- V : Volumen vehicular del arco/hora
- C : Capacidad de la vía en vehículo/hora/carril
- α : Relación entre la velocidad de flujo libre con la velocidad de congestión
- β : Rapidez con que disminuye la velocidad al aumentar la relación del volumen y la capacidad (V/C)

2.4.2. Elementos de la función BPR

Volumen vehicular del arco/hora

Volumen vehicular del arco/hora, es el flujo total en el arco en estudio, es la unidad que permite representar vehículos de diferente tamaño autos, buses, etc. Se expresa en vehículos equivalentes/hora.

Capacidad de la vía en vehículo/hora/carril

Capacidad de la vía en vehículo/hora (número de carriles) expresado en vehículos equivalentes/hora. Depende de las condiciones de la vía.

Tiempo de recorrido del arco a velocidad de flujo libre

¹⁵ Cfr. Lizarbe 2015

Tiempo de recorrido del arco a velocidad de flujo libre (sin flujo vehicular).

Tiempo que tardaría cada usuario en recorrer la arista en condiciones ideales. Se expresa en minutos.

Tiempo de recorrido del arco

Tiempo de recorrido del tramo de la red vial que se expresa en minutos.

2.4.3. Parámetros alfa y beta de la función BPR

Los valores de α y β son los parámetros a estimar en esta tesis. El parámetro α representa la relación entre la velocidad de flujo libre con la velocidad de congestión, mientras que el parámetro β representa la rapidez con que disminuye la velocidad al aumentar la relación del volumen y la capacidad (V/C).

Los primeros estudios de estos parámetros fueron calibrados en los Estados Unidos para vías con distintas velocidades de diseño. La tabla N°1 muestra algunos valores que se obtuvieron con base en los procedimientos del HCM 2010, Esta metodología funciona para vías con características muy representativas para el lugar de estudio como Estados Unidos, representando los coeficientes de α y β tanto para autopistas y multicarriles de diferentes velocidades.

Tabla N° 1 Valores de α y β de la función BPR del Highway Capacity Manual 2010

Vías Arteriales	Velocidad a flujo libre (km/h)	Separación de señales (señales/km)	Velocidad a la capacidad (km/h)	α	β
Clase III	55	2	17	0.96	5
	55	3	13	1	5
	55	4	10	1.4	5

Fuente: HCM, 2010

Los estudios más recientes realizados en la ciudad de Lima que fue desarrollado en el 2005 es el “Plan Maestro de Transporte Urbano para el área Metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú”. Obteniendo los valores de α y β para la función BPR. (JICA 2005). En la siguiente tabla N°2 muestran los datos calculados para este estudio realizado.

Tabla N° 2 Valores de α y β de la función BPR del Plan maestro de transporte urbano de Lima y Callao

Código	Vía	Capacidad	Velocidad	α	β
1	Arterial	1200	45	3.75	3.35
2	Colectora	960	30	1.10	3.20
3	Expresas Metropolitanas	1400	80	2.55	2.65
4	Expresas Regionales	1400	80	2.55	2.55
5	Locales	940	25	1.38	2.35

Fuente: JICA, 2005

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones junto con el Viceministro de Transportes y la Secretaria Técnica del Consejo de Transporte de Lima y Callao adjuntan en la Metodología de Actualización del Modelo de Transportes del área Metropolitana de Lima y Callao (MTC, 2010) valores similares al estudio antes realizado en el Plan maestro de transporte urbano de Lima y Callao (JICA, 2005) como lo muestra la tabla N°3.

Tabla N° 3 Valores de α y β de la función BPR del Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Código	Vía	α	β
1	Arterial	3.75	3.35
2	Colectora	1.10	3.20
3	Vías Expresas	2.55	2.65
4	Locales	1.38	2.35
5	Típicas	0.15	4.00

Fuente: MTC, 2010

2.5 SISTEMA DE ECUACIONES NO LINEALES

2.5.1. Definición de sistema de ecuaciones no lineales

Un sistema de ecuaciones, se dice que es no lineal cuando no es lineal, es decir, un sistema de ecuaciones en donde cada ecuación es de primer grado.

Los sistemas no lineales representan sistemas cuyo comportamiento no es expresable como la suma de los comportamientos de sus descriptores. Más formalmente, un sistema físico, matemático o de otro tipo es no lineal cuando las ecuaciones de movimiento, evolución o comportamiento que regulan su comportamiento son no lineales.

2.5.2. Métodos de solución de sistemas de ecuaciones no lineales

Solución de valores aproximados

El cálculo de los parámetros de α y β haciendo uso de los valores aproximados sigue la secuencia que a continuación se muestra:

Sea la ecuación:

$$T_f = t_o * \left[1 + \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right] \quad [2]$$

$$\frac{T_f}{t_o} = 1 + \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \quad [3]$$

$$\frac{T_f - t_o}{t_o} = \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \quad [4]$$

Aplicamos logaritmos:

$$\text{Ln}.\left(\frac{T_f - t_o}{t_o}\right) = \text{Ln}(\alpha) + \beta \cdot \text{Ln}\left(\frac{V}{C}\right) \quad [5]$$

Se despeja β :

$$\beta = \frac{\text{Ln}.\left(\frac{T_f - t_o}{t_o}\right) - \text{Ln}(\alpha)}{\text{Ln}\left(\frac{V}{C}\right)} \quad [6]$$

Aproximando valores de α la siguiente forma,

$$\alpha \approx \frac{S_o}{S_c} - 1 \quad [7]$$

Entonces, con la toma de datos en la hora punta se obtiene α , y se reemplaza su valor en la ecuación despejada de β . De esta forma se obtiene los valores aproximados de los parámetros.

Solución matricial

El cálculo de los parámetros de α y β , haciendo uso de la solución matricial tiene los siguientes pasos:

Sea la ecuación:

$$T_f = t_o * \left[1 + \alpha \left(\frac{V}{C}\right)^\beta\right] \quad [8]$$

$$\frac{T_f}{t_o} = 1 + \alpha \left(\frac{V}{C}\right)^\beta \quad [9]$$

$$\frac{T_f - t_o}{t_o} = \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \quad [10]$$

Aplicando logaritmos,

$$\text{Ln} \left(\frac{T_f - t_o}{t_o} \right) = \text{Ln}(\alpha) + \beta \cdot \text{Ln} \left(\frac{V}{C} \right) \quad [11]$$

$$Y = \text{Ln} \left(\frac{T_f - t_o}{t_o} \right) \quad [12]$$

$$X = \text{Ln} \left(\frac{V}{C} \right) \quad [13]$$

$$A = \text{Ln}(\alpha) \quad ; \quad \alpha = e^A \quad [14]$$

Se obtendrá una ecuación lineal de 2 variables del tipo

$$Y = A + \beta \cdot X \quad [15]$$

Siendo [Yi], la matriz en función de los tiempos de viaje (Tf) tomados en el tiempo i:
[Xi], la matriz en función del volumen en el tiempo i.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} ; \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_1 \\ 1 & X_2 \\ 1 & X_3 \\ 1 & \dots \\ 1 & X_n \end{bmatrix} \quad [16]$$

Cuya solución es:

$$[Y] = \begin{bmatrix} A \\ \beta \end{bmatrix} \times [X] \quad [17]$$

$$[X^T][Y] = \begin{bmatrix} A \\ \beta \end{bmatrix} \times [X^T][X] \quad [18]$$

$$\begin{bmatrix} A \\ \beta \end{bmatrix} = ([X^T][X])^{-1} \times [X^T][Y] \quad [19]$$

2.6 CRITERIOS DE VALIDACIÓN

A continuación, se mencionará los criterios de validación recomendados por la metodología de actualización del modelo de transporte de Lima Metropolitana elaborado por el MTC en el año 2010.

2.6.1. Indicador GEH

El indicador GEH (Geoffrey E.Havers) es un método empírico utilizado para validar análisis de tráfico con el propósito de obtener una calibración.¹⁶

Su formulación es:

$$GEH_i = \sqrt{\frac{(Ci - Ai)^2}{\frac{Ci + Ai}{2}}} \quad [20]$$

Donde,

Ci : Dato observado

Ai : Es el dato asignado por el modelo en el enlace i

Criterio de aceptación,

- Al menos el 60% de los arcos obtengan $GEH \leq 5$
- El 95% de los arcos obtengan $GEH \leq 10$
- El 100% de los arcos obtengan $GEH \leq 12$

¹⁶ Cfr. MTC, 2010

Sin embargo, valores de GEH mayores pueden ser aceptados, solo si los datos observados y asignados estos estén muy lejanos entre sí.

2.6.2. Estadístico %RMSE

El indicador %RMSE (Root Mean Square Error) permite verificar el porcentaje de diferencia entre datos observados y asignados. Este indicador se representa mediante la raíz cuadrada de las diferencias al cuadrado entre el número de observaciones menos uno, y el análisis de los datos observados divididos entre el número de observaciones¹⁷.

Su formulación es:

$$\%RMSE = 100 * \frac{\sqrt{\frac{\sum(Ci - Ai)^2}{(N-1)}}}{\frac{\sum Ci}{N}} \quad [21]$$

Donde,

Ci: Dato observado

Ai: Es el dato asignado por el modelo en el enlace i

N: Cantidad de observaciones

Criterio de aceptación,

- %RMSE ≤ 30%

Se puede aceptar valores mayores de %RMSE, solo si los datos observados y asignados estos estén muy lejanos entre sí.

¹⁷ Cfr. MTC 2010

CAPÍTULO III

LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

El presente capítulo trata de la recolección de datos necesarios para iniciar la calibración de la función BPR. Determinar las características de las vías, tales como volumen vehicular, tiempos de viaje (bajo influencia o no de la congestión), velocidades de viaje y capacidad será la acción preliminar y necesaria para la calibración.

Cabe resaltar que es deseable recolectar datos utilizando buenas prácticas de muestreo a fin dar confianza a los resultados de la calibración.¹⁸

Los periodos de recolección de datos se realizan de lunes a viernes, en las horas punta correspondiente al día y la noche, en un tramo representativo de la avenida San Luis, el cual será en adelante mencionado como arco.

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ARCO

3.1.1. Definición de arco

Los arcos representan tramos o calles de vías, homogéneas entre intersecciones. Los arcos se caracterizan por varios atributos, tales como la longitud del enlace, sección transversal y capacidad asociada al número de carriles.

Para el caso en particular de avenida San Luis, el arco está comprendido longitudinalmente en la dicha avenida, entre las intersecciones con la avenida San Borja Norte y calle Hadraza.

3.1.2. Determinación de las características del arco

Las características del arco se determinaron mediante la observación y se utilizó un odómetro y flexómetro; así mismo, algunas mediciones se corroboraron con la ayuda del Google Earth.

¹⁸ Cfr. SCT 2006

El tipo de señalización presenta en el arco es la semafórica, la cual controla la entrada y salida de vehículos

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla N°4.

Tabla N° 4 Características del arco, Av. San Luis

CARACTERÍSTICAS DEL ARCO	
Ubicación	Avenida San Luis
Dirección	Sur a Norte
Punto de inicio	Av. San Borja Sur
Punto de salida	Calle Hadraza
# de carriles	2
Pavimento	Flexible
Longitud	144.00 m.
Ancho	4.50 m

Fuente: Elaboración propia

3.2 VOLUMEN VEHICULAR

3.2.1. Definición de volumen vehicular

Se define como volumen vehicular al número total de vehículos que pasa por un punto durante un periodo determinado.

Dada la naturaleza de la investigación, el volumen a determinar es el volumen horario de máxima demanda (VHMD), el cual representa el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección del carril durante 60 minutos consecutivos representativo de los periodos de máxima demanda presentados.

3.2.2. Determinación del volumen vehicular

Para la recolección de estos datos del volumen vehicular se utiliza el método de aforo manual. El método de aforo manual permite obtener datos de volumen de tránsito a través del uso de personal de campo conocido como aforadores. Este método permite la clasificación de vehículos por tamaño, tipo y otras características, según el caso¹⁹.

¹⁹ Cfr. Lauro & Gabriel 2005

Cabe resaltar que en el volumen vehicular correspondiente a la presente investigación se consideraron los factores de equivalencia correspondientes a cada tipo de vehículo, los cuales se muestran en la siguiente tabla N°5.

Tabla N° 5 Factores de equivalencia por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Factor de equivalencia
Motocicleta	0.50
Mototaxi	0.75
Auto	1.00
Taxi	1.00
Auto Colectivo	1.00
Camioneta rural	1.25
Microbús	2.50
Bus	3.00
Otros buses	3.00
Camión pequeño	1.50
Camión grande	2.50
Camión Articulado	6.00

Fuente: JICA, 2005

De tal forma, los resultados de los volúmenes equivalentes en la hora de máxima demanda para los turnos mañana y noche se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla N° 6 Volumen de vehículos equivalentes por hora

Fecha	Día	Turno	Tipos de vehiculo								TOTAL VEH. EQUIV. (veh/h)
			C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros	
23/08/2016	Martes	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	2.5	33.0	82.5	3.8	808.0	18.5	1.0	0.8	950.0
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	2.5	16.5	72.5	5.0	930.0	24.5	3.0	1.5	1,055.5
24/08/2016	Miercoles	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	17.5	22.5	77.5	11.3	709.0	12.0	3.0	3.0	855.8
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	5.0	7.5	60.0	3.8	818.0	14.5	3.0	0.8	912.5
25/08/2016	Jueves	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	20.0	22.5	92.5	2.5	852.0	14.0	2.0	1.5	1,007.0
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	2.5	12.0	62.5	1.3	912.0	20.5	4.0	1.5	1,016.3

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en la tabla N°7 se muestra los resultados del porcentaje de composición vehicular en el arco de estudio para el periodo de análisis.

Tabla N° 7 Porcentaje de composición vehicular del periodo de análisis en el arco

Fecha (23/08/2016; 24/08/2016; 25/08/2016)	Día (Martes; Miercoles, Jueves;	Turno (Mañana; Noche)	COMPOSICIÓN VEHICULAR HORARIA								TOTAL VEH. EQUIV. (Veh/h; %)
			C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros	
Volumen veh. Total del periodo de análisis			50.0	114.0	447.5	27.5	5,029.0	104.0	16.0	9.0	5,797.0
Composición veh. Total del periodo de análisis			0.86%	1.97%	7.72%	0.47%	86.75%	1.79%	0.28%	0.16%	100.00%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los aforos en campo se encuentran en el anexo N°01

3.3 TIEMPO DE VIAJE

3.3.1. Definición del tiempo de viaje

El tiempo de viaje es el tiempo que dura un vehículo para transitar por un segmento de vía. Debido a la congestión, el tiempo de viaje en la red vial es una función creciente que depende del flujo²⁰; por ello para realizar la estimación del tiempo de viaje promedio durante la hora de máxima de demanda, se consideró teorías estadísticas de muestreo, ya que el comportamiento del tiempo de viaje no es lineal.

3.3.2. Determinación de los tiempos de viaje

Para determinar los tiempos de viaje en el arco se utilizó el método de placas en la hora pico. Este procedimiento consiste en anotar el momento en que los vehículos que recorren el arco pasan por los puntos de control, identificándolos por su placa de matrícula.

Luego, en gabinete se revisa los números de placas y se seleccionan aquellos que coincidan en los puntos de control, se clasifican por tipo de vehículo y se obtiene el tiempo de viaje promedio en el arco.

La eficiencia del método depende, en gran parte, del número de vehículos que pasen por el arco; si el flujo es intenso, puede obtenerse una muestra aceptable.

²⁰ Cfr. Sheffi, 1985

La distribución de las velocidades individuales de los vehículos se aproxima a la Distribución Normal (Campana de Gauss) por lo que se supone que la distribución de las medias de tiempos de viaje también es Normal²¹

Por ello, el número mínimo de observaciones está determinado por la siguiente expresión [22]:

$$N = \left(\frac{Z \cdot S}{E}\right)^2 \quad [22]$$

Donde:

N=Tamaño de la muestra

S= Desviación estándar de la muestra (km/h)

Z= Valor de variable normal estándar para el nivel de confiabilidad deseado

E= Error permitido en la estimación de la velocidad (km/h)

Cabe resaltar que la ecuación anterior determina el número mínimo de observaciones necesarias; sin embargo, de ningún modo el tamaño de la muestra puede ser menor que 30.

Los valores de S, Z y E se tomaron de las siguientes sugerencias mencionadas en el Manual de modelación de Demanda (2006):

- Box y Oppenlander (1985) sugieren una desviación estándar (S) de 8.00 km/h como valor emperico en cualquier tipo de vía y de tránsito.
- Los niveles de confianza más usados en las mediciones son 90% y 95%²²
- El error máximo tolerable de la media aritmética (E) está comprendida entre 1-5km/h.
- El valor de la variable normal (Z) dependerá del nivel de confianza y se obtiene de la siguiente tabla.

²¹ Cfr. SCT, 2006

²² Cfr. SCT, 2006

Tabla N° 8 Valores de Z para varios niveles de confianza

Nivel de confianza (%)	Valor de Z
68.30	1.00
90.00	1.64
95.00	1.96
95.50	2.00
99.00	2.58
99.70	3.00

Fuente: SCT, Manual de modelación de demanda, 2006

Entonces, con los valores establecidos de $S=8.00$ km/h, nivel de confianza=95%, $E=3.50$ km/h y obtenido $Z=1.96$, el número mínimo de observaciones resultó $N=21$. Lo que significa para la presente investigación significa que, para determinar el tiempo de viaje promedio por hora, se debe estudiar cómo mínimo 21 vehículos que transiten en dicho periodo.

Obtenido los resultados de muestra mínima, a partir de la composición vehicular diaria descrito en la tabla N°9, se determinó la cantidad de muestras que se debe tomar para cada tipo de vehículos.

Así, en la tabla N°10 se presenta la cantidad mínima de muestras por cada tipo de vehículos en el horario de máxima demanda, según el día de análisis.

Tabla N° 9 Composición vehicular horaria en el arco

Fecha	Día	Turno	COMPOSICIÓN HORARIO DE PORCENTAJE DE VEHÍCULOS								TOTAL DE COMPOSICIÓN HORARIA
			C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros	
23/08/2016	Martes	Mañana	0.11%	2.43%	3.64%	0.33%	89.08%	4.08%	0.22%	0.11%	100%
		Noche	0.10%	1.07%	2.81%	0.39%	90.12%	4.75%	0.58%	0.19%	100%
24/08/2016	Miercoles	Mañana	0.87%	1.86%	3.85%	1.12%	88.07%	2.98%	0.75%	0.50%	100%
		Noche	0.23%	0.56%	2.70%	0.34%	92.12%	3.27%	0.68%	0.11%	100%
25/08/2016	Jueves	Mañana	0.84%	1.58%	3.90%	0.21%	89.87%	2.95%	0.42%	0.21%	100%
		Noche	0.10%	0.80%	2.51%	0.10%	91.38%	4.11%	0.80%	0.20%	100%

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 10 Tamaño mínimo de muestra horaria para cada tipo de vehículo

Fecha	Día	Turno	TAMANO MINIMO DE MUESTRA HORARIA DE VEHICULOS								TOTAL DE MUESTRA HORARIO
			C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros	
23/08/2016	Martes	Mañana	0.02	0.51	0.76	0.07	18.71	0.86	0.05	0.02	21.00
		Noche	0.02	0.22	0.59	0.08	18.92	1.00	0.12	0.04	21.00
24/08/2016	Miercoles	Mañana	0.18	0.39	0.81	0.23	18.50	0.63	0.16	0.10	21.00
		Noche	0.05	0.12	0.57	0.07	19.34	0.69	0.14	0.02	21.00
25/08/2016	Jueves	Mañana	0.18	0.33	0.82	0.04	18.87	0.62	0.09	0.04	21.00
		Noche	0.02	0.17	0.53	0.02	19.19	0.86	0.17	0.04	21.00

Fuente: Elaboración propia

Si bien los resultados en vehículos de menor demanda, como camiones, camioneta rural, motocicletas, bicicletas y otros son pequeños, en campo se recolectó una muestra promedio de 5 para cada tipo de vehículo en mención, a fin de obtener una mejor confiabilidad en los resultados.

Los resultados del estudio de tiempo de viaje, a partir de las consideraciones mínimas de muestreo, se presentan en la siguiente tabla N°11.

Los resultados detallados de la toma de datos se encuentran en el anexo 02.

Tabla N°11 Tiempo de viaje promedio en horas de máxima demanda.

Fecha	Día	Turno	Tipos de vehiculo								Tiempo de viaje prom. (min)
			C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros	
23/08/2016	Martes	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	0.34	0.34	0.42	0.29	0.31	0.20	0.33	0.48	0.34
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	0.61	0.52	0.65	0.41	0.56	0.26	0.26	0.47	0.47
24/08/2016	Miercoles	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	0.41	0.42	0.46	0.25	0.46	0.22	0.21	0.26	0.34
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	0.58	0.55	0.61	0.39	0.64	0.25	0.36	0.61	0.50
25/08/2016	Jueves	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	0.36	0.31	0.28	0.23	0.38	0.17	0.20	0.43	0.30
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	0.59	0.62	0.68	0.49	0.53	0.29	0.26	0.55	0.50
Tiempo de viaje promedio x tipo de vehiculo (min)			0.48	0.46	0.52	0.34	0.48	0.23	0.27	0.47	0.41

Fuente: Elaboración propia

3.4 TIEMPO DE FLUJO LIBRE

3.4.1. Definición del tiempo de flujo libre

El tiempo de flujo libre es el tiempo que dura un vehículo para transitar un segmento de vía, con la particularidad de realizarlo bajo condiciones ideales, es decir, cuando no se presenta flujo vehicular.

Aunque a partir de las condiciones ideales que caracterizan este parámetro se espere obtener una función constante en los resultados, es necesario considerar un tamaño de muestra mínimo para el estudio de dichos tiempos.

3.4.2. Determinación de los tiempos de flujo libre

Para la determinación de los tiempos de viaje cuando el flujo es libre se utilizó el método de vehículo de prueba, también conocido como vehículo flotante, que consiste en cronometrar el tiempo de recorrido de cada tipo de vehículo. La metodología requiere de un conductor y un copiloto que registre el tiempo cronometrado en recorrer el arco.

El tamaño necesario de la muestra, es decir, el número mínimo de observaciones o recorridos dependerá del nivel de confianza y error tolerable de la media de velocidades (E) anteriormente establecido como 95% y 3,50 km/h, respectivamente.

Por otro lado, también se considera la amplitud media de las velocidades de recorrido, la cual se estima de la siguiente manera:

[23]

$$R = \frac{\sum S}{N - 1}$$

Donde,

R = Rango promedio de la velocidad de recorrido (km/h)

$\sum S$ = Suma de los valores de todas las diferencias de velocidades

N = Numero de recorridos de prueba completos

Una vez estimada la amplitud media de las velocidades de recorrido y a partir del error (E), se determina el tamaño mínimo de recorridos necesarios para el estudio de tiempo en flujo libre a través de la siguiente tabla.

Tabla N°12 Tamaño de la muestra necesario para estudios de tiempo con un nivel de confianza de 95%

Amplitud media de la velocidad de recorrido (Km/h)	Número mínimo de recorridos para un error tolerable específico (km/h)				
	± 2.0	± 3.5	± 5.0	± 6.5	± 8.0
5.0	4	3	2	2	2
10.0	8	4	3	3	2
15.0	14	7	5	3	3
20.0	21	9	6	5	4
25.0	28	13	8	6	5
30.0	38	16	10	7	6

Fuente: SCT, Manual de Modelación, 2006

Para la investigación se realizó un número de recorrido igual a 20, el cual con el error tolerable (E) de 3,50 km/h y en cualquiera de la amplitud media de la velocidad, resulta válido.

Los resultados del estudio de tiempo de flujo libre, a partir de las consideraciones mínimas de muestreo, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N°13 Tiempo de flujo libre promedio en el arco

Fecha	Dia	Turno	Tipo
			Auto
6/09/2016	Martes	Madrugada	0.14
7/09/2016	Miercoles	Madrugada	0.15
8/09/2016	Jueves	Madrugada	0.14
Tiempo de viaje prom por tipo de vehiculo (min)			0.14

Fuente: Elaboración propia

3.5 VELOCIDAD DE VIAJE

3.5.1. Definición de velocidad de viaje

Es la relación que establece la distancia del arco en estudio y el tiempo que invierte en transitarlo, incluyendo el tiempo de recorrido y los tiempos de demora.

La unidad de medida de la velocidad para la presente investigación es kilómetros por hora.

3.5.2. Determinación de las velocidades de viaje

En el análisis de tiempos de viaje, las medidas de tiempo son convertidas en velocidades medias de viaje.

Las velocidades de viaje se calculan a partir del tiempo de recorrido mediante la fórmula [24] que se muestra a continuación:

[24]

$$V = \frac{60L}{T}$$

Donde,

V = velocidad de viaje (kph)

L = longitud de la sección (kilómetros)

T = tiempo de viaje (min)

Los resultados de las velocidades de viaje, a partir de del estudio de tiempos de viaje, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N°14 Velocidades de viaje promedio en horarios de máxima demanda

Fecha	Día	Turno	Tipos de vehículo								Velocidad de viaje prom. (kph)
			C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros	
23/08/2016	Martes	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	25.41	25.41	20.57	29.79	27.87	43.20	26.18	18.00	27.06
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	14.16	16.62	13.29	21.07	15.43	33.23	33.23	18.58	20.70
24/08/2016	Miercoles	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	21.07	20.57	18.78	34.56	18.78	39.27	41.14	33.51	28.46
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	14.90	15.71	14.16	22.15	13.50	34.56	24.00	14.16	19.14
25/08/2016	Jueves	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	24.00	27.87	30.86	37.57	22.74	50.82	43.20	20.09	32.14
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	14.64	13.94	12.71	17.63	16.30	29.79	33.23	15.66	19.24
Velocidad de viaje promedio x tipo de vehículo (kph)			19.03	20.02	18.40	27.13	19.10	38.48	33.50	20.00	24.46

Fuente: Elaboración propia

3.6 CAPACIDAD VIAL

3.6.1. Definición de capacidad vial

Se define como capacidad vial al número máximo de vehículos por unidad de tiempo que pueden pasar por una sección de la vía durante un periodo de tiempo, bajo condiciones prevalecientes de tránsito, ambientales y las condiciones de control.²³

La capacidad vial se identifica para determinar qué tan óptimo es el flujo vehicular en una intersección o vía. Es fundamental para identificar cómo se encuentra la vía en el momento del análisis y conocer con certeza el comportamiento²⁴.

La capacidad vial se determina a partir de las características geométricas, el entorno de la vía, la composición y distribución del tránsito. Las dos primeras características forman parte del inventario vial, mientras que las últimas se determinan en base al análisis de demanda.

3.6.2. Determinación de la capacidad vial

La estimación de la capacidad vial se realiza según la metodología descrita en el Highway Capacity Manual 2010.

Para el presente caso, se estimó la capacidad del grupo de vías que representa el arco en estudio. Entiéndase que un grupo de vías es definido como una o más vías (carriles) que acomodan el tráfico y tienen una línea común de parada y una capacidad compartida por todos los vehículos²⁵

Asimismo, cabe resaltar que la capacidad estimada corresponde al arco en estudio, mas no a la avenida en conjunto.

La determinación de la capacidad se basa en el cálculo de la tasa del flujo de saturación, la duración de la fase en verde, la duración del ciclo y el número de carriles, tal como se muestra en la ecuación [25] extraída del HCM 2010.

[25]

$$c = N * s * \frac{g}{C}$$

²³ Cfr. HCM, 2010

²⁴ Cfr. Rodríguez Urrego Daniella, 2015

²⁵ Cfr. Ramírez Vélez Gonzalo, 2004

Donde,

c =Capacidad del grupo de vías (veh/h)

N =Número de carriles del grupo de vías

S =Tasa de flujo de saturación (veh/h/c)

g = Duración de la fase en verde (s)

C = Duración del ciclo (s)

Con el tiempo de verde (g) y la duración del ciclo (C) obtenidos en la zona de investigación, resulta la razón de verde como se muestra en la siguiente tabla

Tabla N°15 Tiempo de las fases del Semáforo

Fases del semáforo	Tiempo (s)
	48
	3
	68

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo un valor de 0.57 como se muestra a continuación

[26]

$$\frac{g}{C} = \frac{68}{119} = 0.57$$

Tomando en cuenta las consideraciones descritas, se procede a determinar la tasa del flujo de saturación

a) Determinación de la tasa de flujo de saturación

Las condiciones prevalecientes del tránsito incluyen los volúmenes por tipo de movimiento (izquierda, directo, derecha), su composición vehicular (automóviles, autobuses, camiones), maniobras de estacionamiento, paradas de autobuses y conflictos con peatones y ciclistas. Las condiciones prevalecientes de la calle describen las características

geométricas de los accesos en términos del número y ancho de carriles, pendientes y uso de carriles incluyendo carriles de estacionamiento. Las condiciones prevaletientes del semáforo incluyen la secuencia de fases, asignación de tiempos y el tipo de operación o control²⁶.

El HCM 2010 define al flujo de saturación como en la ecuación [27]:

$$S = S_o \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_P \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \cdot f_{Lpb} \cdot f_{Rpb} \quad [27]$$

Donde,

S_o = Flujo de saturación base

f_w = Factor por ancho de carril

f_{HV} = Factor por vehículos pesados

f_g = Factor de ajuste por inclinación del acceso

f_P = Factor de ajuste por existencia de carril de estacionamiento

f_{bb} = Factor de ajuste por efecto de los autobuses locales que paran dentro de la zona

f_a = Factor de ajuste por tipo de área

f_{LU} = Factor de ajuste por utilización de carril

f_{LT} = Factor de ajuste por giro a la izquierda

f_{RT} = Factor de ajuste por giro a la derecha

f_{Lpb} = Factor de ajuste por movimiento a la izquierda de peatones y ciclistas

f_{Rpb} = Factor de ajuste por movimientos a la derecha de peatones y ciclistas

Flujo de saturación base (S_o)

El primer factor indica el flujo de Saturación base (S_o), el cual se precisa cuando la intersección se encuentre en un área metropolitana con

²⁶ Cfr. Cal y Mayor, Ingeniería de tránsito, 2008

250.000 habitantes o más, según el HCM 2010 (S_o) es de 1900 automóviles/carril/hora, y en otras ciudades 1750. Para el HCM 2000 se identifica una tasa de flujo de saturación base única siendo de 1900 vehículos/carril/hora.²⁷

Para el trabajo de la siguiente investigación el valor del factor del flujo de saturación base será de: $S_o = 1900$

Factor por ancho de carril (F_w)

El ancho de carril se tiene en cuenta por el impacto que ejercen los carriles estrechos en la intensidad de saturación, al igual que el incremento del flujo con los carriles anchos. El ancho estándar es de 3.65 metros y si llega a pasar de 4.8 metros se debe analizar como dos carriles, indicando que el usar dos carriles indica un alto flujo de saturación.

Por ningún motivo se debe calcular un ancho menor a 2.4 metros. Para este caso el HCM 2010 de acuerdo con el ancho de los carriles maneja factores únicos indicados en la tabla 11 y el HCM 2000 precisa de condiciones diferentes como se aprecia en la ecuación [28], especificando que se debe analizar para un ancho de carril mayor a 2.4m, si es mayor a 4.8m se debe analizar como dos carriles.²⁸

Tabla N°16 Ancho de Carril

Promedio ancho carril (m)	Factor de ajuste ancho de carril (F_w)
< 3.0	0.96
≥ 3.0 - 3.92	1.00
> 3.92	1.04

Fuente: HCM 2010.

$$F_w = 1 + \frac{(W-3.6)}{9} \quad [28]$$

²⁷ Cfr. Rodríguez Urrego, 2015

²⁸ Cfr. Rodríguez Urrego, 2015

El ancho del carril en el proyecto es de $W = 3.5\text{m}$; por lo tanto, el valor del factor por ancho de carril es de $Fw = 0.99$

Imagen N° 6 Vista de Avenida San Luis

Fuente: Mapa de Lima, Lima en Google Maps

Factor por vehículos pesados (FHV)

Este factor toma en cuenta el efecto restrictivo de los vehículos pesados (camiones y ómnibus) en el flujo de tránsito, debido a su mayor tamaño y menor capacidad de ajuste de velocidad. Este efecto depende del tipo de terreno, del porcentaje de vehículos pesados y del nivel de servicio o condición de operación de la vía²⁹. Este es un factor de corrección por demora adicional, y reduce el flujo de saturación debido a la presencia de los vehículos pesados en el tránsito. En este procedimiento, los vehículos pesados se definen como cualquier vehículo que tiene más de cuatro llantas que tocan el pavimento³⁰. Los valores de esta ecuación se calculan según el HCM 2010 con la ecuación [29]:

[29]

$$FHV = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)}$$

²⁹ Cfr. Lizarbe Alarcón Hemerzon, 2015

³⁰ Cfr. Nicholas Garbe, 2005

Donde,

P_{HV} = Porcentaje de los vehículos pesados en el grupo de movimiento correspondiente (%)

E_T = número equivalente de autos a través de cada vehículo pesado es igual a 2.0

El valor del factor por vehículos pesados, F_{HV} es de 1.00

Imagen N° 7 Vista de los vehículos pesados

Fuente: Elaboración propia

Imagen N° 8 Vista de los vehículos pesados

Fuente: Elaboración propia

Factor de ajuste por inclinación del acceso (F_g)

El factor por ajuste de inclinación en el HCM 2010 toma en cuenta el efecto de las rampas y pendientes. Este factor se relaciona con la pendiente del acceso considerado. Se usa para corregir el efecto de la pendiente sobre la velocidad de los vehículos, incluye tanto automóviles como vehículos pesados, ya que los automóviles también son afectados por la pendiente. Este efecto es diferente para las condiciones de pendiente ascendente y pendiente descendente; por tanto debe considerarse la dirección de la pendiente³¹. Los valores de este factor según el HCM 2010 se calculan mediante la siguiente ecuación [30]:

[30]

$$F_g = 1 - \frac{Pg}{200}$$

Donde Pg es el grado de ajuste para el grupo de movimiento correspondiente (%). Este factor se aplica a los grados que van desde -6,0% a + 10,0%. Una cuesta arriba tiene un valor positivo y un grado de descenso tiene un valor negativo³².

Para el arco en estudio, la pendiente es de 0.70%, por lo tanto, el valor del factor de ajuste por inclinación del acceso es de $F_g = 1.00$

Factor de ajuste por existencia de carril de estacionamiento (F_p)

El factor de ajuste de estacionamiento (F_p) es primordial en la obtención de la tasa de flujo saturación, este tiene en cuenta el efecto de fricción que el carril de estacionamiento ejerce sobre el grupo de carriles en conjunto, es decir pudiendo presentar un bloqueo en los carriles por los vehículos que entran y salen de los aparcamientos. Al presentar estacionamientos se debe tener en cuenta que las maniobras duran un

³¹ Cfr. Nicholas Garber, 2005

³² Cfr. HCM, 2010

promedio de 18 seg³³. Entonces el valor de este factor se calcula según el HCM 2010 mediante la siguiente ecuación [31]:

[31]

$$Fp = \frac{N - 0.1 - \frac{18 Nm}{3600}}{N} \geq 0.050$$

Donde,

N = Números de carriles del grupo.

Nm = Numero de maniobras de estacionamiento/hora; $0 \leq Nm \leq 180$

$Fp = 1.000$ para sin estacionamiento

El factor de ajuste por existencia de estacionamiento tomando en cuenta 60 el número de maniobras de estacionamiento y 2 el número de carril se tiene el factor $Fp = 0.8$

Imagen N° 9 Vista del carril de estacionamiento

Fuente: Elaboración propia

³³ Cfr. HCM, 2010

Factor de ajuste por efecto de los autobuses locales que paran dentro de la zona (*Fbb*)

Cuando los autobuses tienen que parar en un carril de tránsito para descargar o recoger pasajeros, algunos vehículos que vienen detrás del autobús también tendrán que parar. Esto conduce a una reducción del volumen máximo que ese carril puede manejar. Este efecto se corrige mediante el uso del factor de ajuste por la obstrucción de los autobuses, que está relacionado con el número de autobuses en una hora que paran en el carril de tránsito, a menos de 76 metros antes y después de la línea de alto, para recoger o descargar pasajeros, así como el número de carriles en el grupo³⁴. El número de paradas es primordial en el momento del análisis si se presenta más de 250 autobuses/hora se debe ajustar como límite práctico, y se debe considerar un tiempo promedio de bloqueo de 14.4 segundos durante la señal semafórica³⁵.³⁶ Entonces el valor de este factor se calcula según el HCM 2010 mediante la siguiente ecuación [32]:

[32]

$$Fbb = \frac{N - \frac{14.4 Nb}{3600}}{N} \geq 0.050$$

Donde,

N = Número de carriles del grupo

Nb = Numero de buses que paran por hora, $0 \leq Nb \leq 250$

El factor de ajuste por bloqueo de buses será igual a $Fbb = 0.982$

³⁴ Cfr. Nicholas Garber, 2005

³⁵ Cfr. Rodríguez Urrego, 2015

³⁶ Cfr. HCM, 2010

Imagen N° 10 Vista desde la panadería San Luis

Fuente: Elaboración Propia

Factor de ajuste por tipo de área (F_a)

Los tipos de actividades en el área, en la cual se localiza la intersección tienen un efecto significativo sobre la velocidad, y por tanto sobre el volumen de saturación en un acceso³⁷.

En el análisis es importante identificar la ineficiencia relativa de las intersecciones en las zonas comerciales, en comparación con aquellas zonas situadas en otros lugares, y se debe fundamentalmente a la complejidad y congestión general en el entorno de las zonas comerciales, debido a condiciones como: carriles angostos, estacionamientos, paraderos, entre otros³⁸. El manual HCM 2010, recomienda que sea utilizado un factor de área (F_a) de 0.90, si se presenta algunas de las condiciones mencionadas anteriormente.

³⁷ Cfr. Nicholas Garber, 2005

³⁸ Cfr. HCM, 2010

Imagen N° 11 Vista de la panadería San Luis

Fuente: Elaboración Propia

Imagen N° 12 Vista de Nori Sushi bar

Fuente: Elaboración Propia

Imagen N° 13 Vista de Banco BanBif

Fuente: Elaboración Propia

Imagen N° 14 Vista de Galería los Portales de San Borja

Fuente: Elaboración Propia

Imagen N° 15 Vista de Sastrería, Piñatería

Fuente: Elaboración Propia

Imagen N° 16 Vista de Caja Sullana

Fuente: Elaboración Propia

Factor de ajuste por utilización de carril (*FLU*)

El factor de ajuste por utilización de carril (*FLU*) es usado para estimar la tasa de saturación de flujo por grupo de carriles con más de un carril exclusivo. Si el grupo de carriles tiene carriles exclusivos este factor es 1.0³⁹

Factor de ajuste por giro a la izquierda (*FLT*)

El manual del HCM 2010 especifica que el ajuste se debe dar por la existencia de vehículos girando a la izquierda. El realizar estos tipos de giros ya sea en modo permitido o protegido, indican una disminución en la velocidad, influye en el aumento de fases disminuyendo la capacidad de la intersección, aumentan la demora, e incrementa los atascos.

Este factor en el manual del HCM 2010 indica que el factor será 0.95 para carriles exclusivos, sin embargo, el valor del factor se calcula según el HCM 2010 con la ecuación [33]:

$$FLT = \frac{1}{E_L} \quad [33]$$

Donde E_L es el número equivalente de autos que pasan por un vehículo protegido que gira a la izquierda. El valor de E_L es igual a 1.05. En esta investigación el valor del factor por giro a la izquierda, *FLT* es de 1.00

El HCM 2010 identifica factores exclusivos propios del análisis del actual manual, indicando para carril único o compartido un factor de 0.95 mencionado anteriormente, si es doble carril usar 0.92. Para una calle de intersección en T, usar 0.85 para un carril y 0.75 para dos carriles.

Factor de ajuste por giro a la derecha (*FRT*)

El giro a la derecha implica directamente una intervención en demoras, punto de conflicto con los peatones, y ciclistas. Se debe tener en cuenta que los giros a la derecha se pueden realizar de igual modo, permitidos o protegidos. Por tal razón es un factor importante a tener en cuenta en el ajuste de la tasa de saturación.

³⁹ Cfr. Rodríguez Urrego, 2015

El HCM 2010, propone utilizar el factor directamente $FRT = 0.85$ cuando se realiza el giro a la derecha en modo protegido para carril compartido o único. Al ser carriles dobles el factor a usar es de 0.75^{40}

Factor de ajuste por movimiento de peatones y ciclistas ($FLpb$) y ($FRpb$)

El procedimiento para determinar el factor de giro a la izquierda para los peatones y ciclistas $FLpb$, y el factor de giro a la derecha para los peatones y ciclistas $FRpb$ está basado en el concepto de ocupación de la zona de conflicto, es decir el conflicto que existe entre los vehículos que giran, los peatones y ciclistas⁴¹.

Imagen N° 17 Vista de ciclista

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las características geométricas, el entorno de la vía, la composición y distribución del tránsito descritas con anterioridad, el resultado de la tasa de flujo de saturación (S) es igual 1,046 veh/h/c. Considerando el número de carriles igual 2, y la relación de la duración de la fase en verde entre la duración del ciclo total del semáforo igual a 0.57 resulta la capacidad de la zona en estudio (c) igual a 1,196 veh/h.

⁴⁰ Cfr. Rodríguez Urrego, 2015

⁴¹ Cfr. HCM, 2010

CAPÍTULO IV

CALIBRACIÓN DE LA FUNCIÓN BPR

4.1 PROCESO DE CALIBRACIÓN

La tarea de la calibración de un modelo es encontrar mejores valores para sus parámetros críticos –como en el presenta caso, alfa y beta- a fin asegurar que represente la realidad lo más exacto posible.

Para el proceso de calibración se ha utilizado los resultados promedio del tiempo de viaje, tiempo de flujo libre, volumen vehicular y capacidad vial, presentes en el horario de máxima demanda, según los turnos de mediciones.

Como se muestra en la tabla N° 16, el HMD en el turno diurno se encuentra entre las 8:45 a.m. – 9:45 a.m., mientras que, en el turno nocturno, entre las 7:15 p.m. – 8:15 p.m. Dichas hora son el resultado de un análisis previo al aforo vehicular.

Entonces, los resultados promedio de las mediciones realizadas en los horarios de máxima demanda se muestran a continuación.

Tabla N°17 Resultados de las mediciones en campo

Fecha	Día	Turno	Tiempo prom. Flujo Libre (min)	Tiempo de viaje prom. (min)	TOTAL VEH. EQUIV. (veh/h)	Capacida d Vial (veh/h)
23/08/2016	Martes	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	0.144	0.34	950.0	1,196.00
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	0.144	0.47	1,055.5	1,196.00
24/08/2016	Miercoles	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	0.144	0.34	855.8	1,196.00
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	0.144	0.50	912.5	1,196.00
25/08/2016	Jueves	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)	0.144	0.30	1,007.0	1,196.00
		Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)	0.144	0.50	1,016.3	1,196.00

Elaboración: Fuente propia

Estos son convertidos a matrices con la finalidad de determinar los parámetros alfa y beta.

Como se muestra en la ecuación [19], en el acápite 2.5, los parámetros alfa y beta dependen de las matrices [X] e [Y]. Dichas matrices tendrán la composición mostrada en la ecuación [16].

La matriz [X] depende una relación logarítmica entre los tiempos de viaje y de flujo libre, como se muestra en las ecuaciones [12]; mientras que la matriz [Y], de la relación logarítmica entre el volumen y la capacidad, como se muestra en la ecuación [13].

Los valores las variables X e Y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N°18 Valores de las variables X e Y

Variables X e Y		
Y	-	X
0.3019	-	0.2303
0.8075	-	0.1250
0.2876	-	0.3348
0.9016	-	0.2706
0.0475	-	0.1720
0.9092	-	0.1629

Elaboración: Fuente propia

A partir de los valores mostrados, se construyeron las matrices [X] e [Y]; estas fueron reemplazadas en la ecuación [19], de modo que se obtiene un único valor tanto para beta (β) como para alfa (α).

4.2 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS ALFA Y BETA

En relación con lo mencionado previamente, los resultados de las matrices [X] e [Y] son los mostrados a continuación, en las siguientes ecuaciones.

$$[Y] = \begin{bmatrix} 0.3019 \\ 0.8075 \\ 0.2876 \\ 0.9016 \\ 0.0475 \\ 0.9092 \end{bmatrix} \quad [34]$$

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & -0.2303 \\ 1 & -0.1250 \\ 1 & -0.3348 \\ 1 & -0.2706 \\ 1 & -0.1720 \\ 1 & -0.1629 \end{bmatrix} \quad [35]$$

A partir de dichas matrices, se obtiene los siguientes resultados:

$$([X]^T[X])^{-1} = \begin{bmatrix} 1.7042 & 7.12007 \\ 7.1200 & 32.9717 \end{bmatrix} \quad [36]$$

$$[X]^T[Y] = \begin{bmatrix} 3.25520 \\ -0.6669 \end{bmatrix} \quad [37]$$

De modo que los valores de A y beta resultan de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} A \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.80 \\ 1.19 \end{bmatrix}$$

Y sabiendo, como se muestra en la ecuación [14], que $\alpha = e^A$, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.22 \\ 1.19 \end{bmatrix}$$

Estos valores obtenidos obedecen a las prácticas de manejo de los conductores locales, diferente a las prácticas de manejo de conductores en otros países. La tabla N°19 muestra el resultado de la calibración de la función BPR.

Los detalles de la calibración se encuentran en el anexo 03.

Tabla N°19 Valores los paramentos calibrados de la función BPR

Via	Capacidad (vehículos equiv./hora/carril)	Velocidad de Flujo libre (Km/h)	Alfa (α)	Beta (β)
Colectora	1,196	60	2.22	1.19

Fuente: Elaboración propia

4.3 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La tarea de validación es complementaria a la calibración. El objetivo es confirmar que el modelo reproduce mediciones que reflejan las condiciones de la realidad actual de la zona de estudio.

El manual de modelación de México de la secretaría de comunicaciones y transportes sugiere validar la función con mediciones que no han sido utilizadas para la calibración⁴². Asimismo, se debe tener en cuenta que dichas mediciones deben provenir de una fuente de datos externos y que corresponda al área de estudio⁴³. En ese sentido, en la zona de investigación se realizó nuevamente mediciones el miércoles 28 de setiembre, durante las 6:00 a.m. a 10:00 p.m., con fin de validar los resultados a partir de nueva información volúmenes vehiculares.

El procedimiento que se llevó a cabo para la validación del modelo fue el siguiente:

- Durante el periodo de análisis se realizó mediciones de tiempo de recorrido, volumen vehicular y tiempo de flujo de libre; estos datos se procesaron como un promedio para cada hora y se denominaron: datos observados.
- A través la función BPR y los valores de α y β obtenidos en la calibración, más el tiempo de flujo libre y de recorrido asignado, se determinaron los volúmenes vehiculares correspondientes a cada hora en el periodo de análisis. Dichos valores se denominaron: volúmenes vehiculares asignados.
- Los volúmenes vehiculares asignados se compararon con los volúmenes vehiculares observados, y a partir indicadores de validación, se verificó el error que existe entre ambos datos.

Los indicadores de validación utilizados en la presente investigación fueron el %RMSE (Root Mean Square Error) y el GEH (Geoffrey E. Havers), que permite verificar la diferencia entre datos observados y asignados.

⁴² Cfr. SCT 2006

⁴³ Cfr. MTC 2010

Como se indica en la ecuación [20] y [21], estos indicadores resultan de la combinación entre datos observados y asignados. A partir de dicho proceso, se aprobó la validez de los resultados, ya que cumplen con los criterios mencionadas en el acápite 2.6.

Los detalles de la validación se encuentran en el anexo 04.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los indicadores.

Tabla N°20 Validación de los parámetros α y β obtenidos

α	2.22				
β	1.19				
Muestra	Periodos de análisis	Volumen vehicular observado (veh/h/arc o)	Volumen vehicular asignado (veh/h/arc o)	GEH	%RMSE
1	06:00:00 a.m. - 07:00:00 a.m	512.00	357.65	7.40	27.21%
2	07:00:00 a.m. - 08:00:00 a.m	876.25	792.89	2.89	
3	08:00:00 a.m. - 09:00:00 a.m	1,147.50	1,759.31	16.05	
4	09:00:00 a.m. - 10:00:00 a.m	884.00	1,024.85	4.56	
5	10:00:00 a.m. - 11:00:00 a.m	725.25	792.89	2.45	
6	11:00:00 a.m. - 12:00:00 m	689.75	619.06	2.76	
7	12:00:00 m. - 01:00:00 p.m	889.12	860.34	0.97	
8	01:00:00 p.m. - 02:00:00 p.m	863.00	724.32	4.92	
9	02:00:00 p.m. - 03:00:00 p.m	812.75	510.25	11.76	
10	03:00:00 p.m. - 04:00:00 p.m	698.75	317.67	16.90	
11	04:00:00 p.m. - 05:00:00 p.m	798.00	792.89	0.18	
12	05:00:00 p.m. - 06:00:00 p.m	887.50	689.58	7.05	
13	06:00:00 p.m. - 07:00:00 p.m	989.50	926.81	2.03	
14	07:00:00 p.m. - 08:00:00 p.m	964.50	1,057.13	2.91	
15	08:00:00 p.m. - 09:00:00 p.m	953.00	1,278.27	9.74	
16	09:00:00 p.m. - 10:00:00 p.m	854.50	860.34	0.20	

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, cabe resaltar que el mismo proceso de validación se realizó para los valores α y β estándar sugeridos por el HCM, JICA y MTC. En ninguno de los casos mencionados se logró validar los resultados. El detalle estas verificaciones se encuentran en el anexo 05.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS FUNCIONES VOLUMEN-DEMORA

En este capítulo se analiza e interpreta el comportamiento de las funciones volumen-demora obtenidas a partir de los parámetros α y β recomendados por el Highway Capacity Manual (HCM), el Plan Maestro de Transporte Urbano de Lima y Callao (JICA), el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) y los obtenidos en la presente investigación.

La calibración de la función nos permitió obtener valores α y β en la avenida San Luis y verificar que estos difieren de los valores estándar comúnmente utilizados, tal como se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N°21 Comparación de valores para los parámetros α y β

Parámetros	Investigación	JICA	HCM	MTC
α	2.22	1.10	1.00	0.15
β	1.19	3.20	5.00	4.00

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, esta premisa debe ser analizada para evaluar las implicancias de utilizar parámetros estándar. Para ello se hace uso de las funciones volumen-demora que representa cada par de parámetros, a fin de estimar los tiempos de viaje.

Para facilitar el manejo de información, el eje de los volúmenes es representado por el ratio volumen/capacidad (V/C). Cabe resaltar, que esta representación no altera el comportamiento de las funciones.

A continuación, en el gráfico N°7, se muestra el comportamiento de las funciones volumen-demora, hasta cuando el volumen resulta ser el doble de la capacidad.

En todas funciones obtenidas por la investigación, el HCM, el JICA y el MTC, se observa el comportamiento creciente del tiempo de viaje a medida que el volumen aumenta respecto a la capacidad vial. Sin embargo, de manera particular, es decir, en cada ratio V/C , se evidencia que los tiempos difieren entre sí.

Gráfico N° 7 Funciones volumen-demora

Fuente: Elaboración Propia

Por ello, en el gráfico N°8, se analiza detalladamente el comportamiento cuando la vía opera hasta un flujo igual a su capacidad. En la función volumen-demora obtenida de los parámetros calibrados se evidencia que cuando el arco se encuentra operando a la mitad de su capacidad ($V/C=0.5$), el tiempo de viaje estimado es de 0.28 minutos (18 segundos), lo cual resulta aceptable a partir de las observaciones en campo. En cambio, para la misma relación V/C , la funciones volumen-demora obtenidas del JICA, HCM y MTC, estiman valores de 0.15 y 0.16 minutos; lo cual se interpreta como el tiempo de viaje parecido al

tiempo en flujo libre, es decir cuando no existe interacción con otros vehículos. Por ello, no resulta compatible dichos resultados con la realidad, pues no reflejan el efecto de la congestión.

Del mismo modo, cuando el flujo en la vía alcanza la capacidad de esta, a partir de la investigación se estima 0.46 minutos de tiempo de viaje (27.6 segundos). Sin embargo, con los valores estándar se estiman 0.17, 0.29 y 0.30 minutos (10.20, 17.40 y 18.00 segundos), lo cual se interpreta como el aumento de solamente 10 segundos más del tiempo cuando el flujo es libre.

Gráfico N° 8 Funciones volumen-demora ($V/C < 1$)

Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico N°9, se evidencia que cuando V/C es mayor a 1, es decir, cuando el flujo vehicular sobrepasa la capacidad de la vía, la función HCM pierde estabilidad y sus resultados aumentan a gran razón a medida que el volumen aumenta respecto a la capacidad vial.

Gráfico N° 9 Funciones volumen-demora ($V/C > 1$)

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los tiempos de viaje, se analiza también el comportamiento de las velocidades de viaje, tal como muestra en el gráfico N°10. En él se muestra el comportamiento de las funciones volumen-velocidad, las cuales decrecen a medida que el volumen aumenta respecto a la capacidad vial. La función obtenida a partir de la calibración decrece a mayor, en cambio, la función obtenida con los parámetros del MTC, disminuye a menor razón en comparación con el resto. Asimismo, se evidencia que las velocidades varían entre sí en un mismo ratio.

Gráfico N° 10 Funciones volumen-velocidad

Fuente: Elaboración Propia

Por ello, en el gráfico N°11, se analiza detalladamente el comportamiento cuando la vía opera hasta un flujo igual a su capacidad.

Los resultados de la investigación muestran que cuando el flujo alcanza los niveles de la capacidad ($V/C=1$), la velocidad promedio alcanza los 18.63 kph, lo cual es apreciable en arcos que presentan congestión. En cambio, en la función propuesta por el MTC, para la misma razón V/C , la velocidad es 52.18 kph, lo cual resulta ser muy alto considerando que la operación se ejecuta en una vía saturada.

Asimismo, cuando V/C es 0.5, las velocidades se encuentran entre 53.59 kph y 59.44 kph, los cuales son valores cercanos a la velocidad de flujo libre (60 kph). En este caso, se hace notar que las funciones de JICA, HCM y MTC, no consideran efectos de disminución de velocidad debido a la congestión. Aunque el arco en operación no está saturado, existen disminuciones de velocidad debido a las maniobras de los usuarios, peatones e influencias de los semáforos cercanos a la zona, las cuales no están siendo reflejadas en las funciones mencionadas.

Gráfico N° 11 Funciones V/C vs velocidad de viaje

Fuente: Elaboración Propia

5.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS TIEMPOS Y VELOCIDADES DE VIAJE

Del mismo modo, se analizó e interpretó el comportamiento de los datos asignados obtenidos a partir de la calibración (tiempo y velocidad de viaje) frente a los observados en campo.

El análisis de tiempo se realizó a partir de los datos levantados para la validación de los resultados. En este caso, el análisis se realizó, específicamente, dentro de las 3:00 a.m. y 10:00 a.m., considerando, a partir de las 7:00 a.m., rangos de 15 minutos. Tal como se muestra en el Anexo 06.

A partir de los datos de campo: tiempo de viaje observado y el flujo vehicular, y además con los tiempos asignados, se realizaron los siguientes análisis, los cuales muestran la variabilidad entre los resultados.

Análisis e interpretación de los tiempos de viaje

La siguiente gráfica N°12 muestra los tiempos observados y asignados en función al ratio V/C. En ella se evidencia que los valores son similares entre sí hasta alcanzar un $V/C=0.97$, luego la variabilidad se vuelve más amplia, y a medida que disminuye el ratio, la variabilidad disminuye.

Gráfico N° 12 Diagrama de barras de los tiempos asignados y observados

Fuente: Elaboración Propia

A partir de lo mencionado, se construye la función del tiempo de viaje respecto al ratio V/C mostrada en la gráfica N°13 y se interpreta que luego de que $V/C > 1$ los resultados asignados presentan una considerable variabilidad frente a los observados en campo.

Este comportamiento se refleja en campo, pues cuando el volumen presente supera la capacidad vial, el flujo decae, es decir, la cantidad de autos que cruzan el arco disminuye.

Gráfico N° 13 Comportamiento de los tiempos de viaje asignado y observado

Fuente: Elaboración Propia

Análisis e interpretación de las velocidades de viaje

En la siguiente gráfica N°14 se muestran las velocidades observadas y asignadas en función al ratio V/C . En ella se evidencia que los valores son similares entre sí hasta alcanzar un $V/C=0.97$, luego la variabilidad se vuelve más amplia, y a medida que disminuye el ratio, la variabilidad disminuye.

Gráfico N° 14 Diagrama de barras de las velocidades observadas y asignadas

Fuente: Elaboración Propia

Y partir de lo mencionado, se construye la siguiente función velocidad de viaje versus el ratio V/C. En dicha gráfica N°15 se muestra el comportamiento de la velocidad asignada y observada. En ella se interpreta que cuando el volumen presente supera la capacidad vial ($V/C > 1$) el flujo y la velocidad observada disminuyen.

Gráfico N° 15 Comportamiento de las velocidades de viaje observadas y asignadas

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

- Se hace notable que el arco en estudio de la Avenida San Luis, es representativo de las vías colectoras, pues presenta características encontradas en otras avenidas de la misma categoría, tales como: tipos de vehículos existentes, retiros de estacionamiento, señalización horizontal y vertical, y reúne los problemas de congestión, debido a las maniobras de los usuarios, peatones e incapacidad de la oferta frente a la demanda.
- Al calibrar la función BPR mediante la metodología utilizada en esta investigación se obtienen parámetros $\alpha=2.22$ y $\beta=1.19$ que difieren de los valores adoptados del HCM ($\alpha=1.00$ y $\beta=5.00$), JICA ($\alpha=1.10$ y $\beta=3.20$) y MTC ($\alpha=0.15$ y $\beta=4.00$); estos valores obtenidos son representativos para las condiciones reales de la vía en estudio. Asimismo, los valores calibrados cumplen con los criterios estadísticos de validación, mientras que los estándares, no.
- Los parámetros obtenidos de $\alpha=2.22$ y $\beta=1.19$ representan de forma adecuada los tiempos y velocidades de viaje observados en la vía en estudio hasta cuando la vía opera bajo un flujo similar a la capacidad, es decir V/C es próximo a 1; sin embargo, cuando el flujo vehicular supera la capacidad ($V/C > 1$), arroja resultados muy variables frente a los observados.

RECOMENDACIONES

- Del mismo modo en que desarrolló esta investigación en un arco de una avenida representativa de las vías colectoras, hacer lo propio para el resto de las categorías: arteriales, expresas y locales, con propósito de obtener una data fiel de valores α y β que representen con éxito las condiciones reales del sistema vial de la ciudad; pero se sugiere considerar una mayor cantidad de arcos y avenidas representativas para cada tipo de categorías, con el fin de homogeneizar los valores α y β para más avenidas.
- Para futuras modelaciones de asignación de tráfico se recomienda utilizar parámetros α y β obtenidos mediante la metodología de calibración aplicada en esta investigación con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad, y evitar emplear parámetros estándar.
- Evitar utilizar la función BPR para estimar los tiempos y velocidades de viaje en situaciones donde la relación volumen/capacidad (V/C) es superior a 1, ya que arroja resultados muy variables. En estos casos, se aconseja hacer uso de otras funciones volumen-demora.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMBROSINO, et al. (2014) An Algorithmic Framework for Computing Shortest Routes in Urban Multimodal Networks with Different Criteria. *ELSEVIER (Procedia – Social and Behavioral Sciences)*. Volume 108, 139-152.
- [2] ASSAAD, R., et al (2020). *A System-of-Systems Model to Simulate the Complex Emergent Behavior of Vehicle Traffic on an Urban Transportation Infrastructure Network*. *Procedia Computer Science*, 168, 139–146.
- [3] BONIFAZ, J. & Aparicio, C. (2013). *La Gestión de Transporte Público Peruano al 2050*. CEPLAN
- [4] Bottom, J. (2010). *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(2), 259–260.
- [5] CAL. & MAYOR R. (2010). *Ingeniería de Transito. Fundamentos y aplicaciones*. (8va Edición) México: Alfa omega grupo editor.
- [6] DG. (2013). *Manual de carreteras, Diseño Geométrico*. Ministerio de Transportes y comunicaciones. Lima, Perú [Fecha de acceso 1 de abril del 2016]. URL disponible en: [http://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/DISE%C3%91O%20GEOMETRICO%20DE%20CARRETERAS%20\(DG-2013\).pdf](http://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/DISE%C3%91O%20GEOMETRICO%20DE%20CARRETERAS%20(DG-2013).pdf)
- [7] GIUFFRÈ, O., et al (2018). *Capacity-based calculation of passenger car equivalents using traffic simulation at double-lane roundabouts*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 81, 11–30.
- [8] HCM, H. (2010). *Transportation research board National Research Council*. Washington, United States. [Fecha de acceso 20 de abril del 2016]. URL disponible en: http://www.gsweventcenter.com/Draft_SEIR_References%5C2010_TRB.pdf
- [9] ICG. (2005). *Manual del diseño geométrico de vías urbanas*. Instituto de la Construcción y gerencia. Cap. 2 Clasificación de las vías urbanas. Lima, Perú [Fecha de acceso 30 de marzo del 2016]. URL disponible en: <http://www.construccion.org.pe/index.php?e=eventos/2005carreteras/programa.htm>
- [10] INEI. (2007). *Instituto Nacional de Estadística e Informática. Perfil Socio demográfico del Perú*. Lima, Perú [Fecha de acceso 5 de abril del 2016]. URL disponible en: <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/sector-statistics/>

[11] JEREZ, et al. (2015). Análisis del nivel de servicio y capacidad vehicular de las intersecciones con mayor demanda en la ciudad de Azogues. (Tesis Título). Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana

[12] JICA. (2005). Agencia de Cooperación Internacional de Japón. Plan maestro de transporte urbano para el área Metropolitana de Lima y Callao. Ministerio de Transportes y Comunicaciones de la República del Perú. Lima, Perú [Fecha de acceso 1 de abril del 2016]. URL disponible en: http://open_jicareport.jica.go.jp/710/710/710_709_11798261.html

[13] LIU, et al. (2016). Finding the biased-shortest path with minimal congestion in networks via linear-prediction of queue length. *ELSEVIER (Physical A: Statistical Mechanics and its Applications)*. [Volume](#) 452, 229-240.

[14] LIZARBE ALARCON, HEMERZON. (2015). Calibración de las funciones volumen demora: caso redes viales principales de la ciudad de Ayacucho. (Tesis Maestría). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería

[15] LOTERO VELEZ, LAURA (2010). Modelo matemático para la asignación de tráfico al sistema de transporte urbano aplicado al Valle de Aburrá. [En línea]. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. [Fecha de acceso 15 de setiembre del 2016]. URL disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2002/1/1017143209.20101.pdf>

[16] MARQUEZ, L. et al (2015). Funciones Volumen Demora BPR y cónica en vías multicarriles de Bogotá

[17] MTC. (2010). Metodología de Actualización del Modelo de transportes del área Metropolitana de Lima y Callao. Secretaría Técnica del Consejo de Transporte de Lima y Callao. Lima, Perú [Fecha de acceso 28 de marzo del 2016]. URL disponible en: https://www.mtc.gob.pe/portal/home/documentos/transparencia/Publicaciones_Recientes/2010/Nov/InformeFinalMetodologia_Nov.pdf

[18] MTOI, E.T. and Moses, (2014) Calibration and Evaluation of link Congestion Functions: Applying Intrinsic Sensitivity of Link Speed as a Practical Consideration to Heterogeneous Facility Types within Urban network. *Journal of Transportation Technologies*, 4, 141-149

[19] MUSOLINO, et al. (2015). Signal setting optimization on urban road transport networks: The case of emergency evacuation. *ELSEVIER (Safety Science)*. [Volume](#) 72, 209-220

- [20] NICHOLAS J. GARBER & LESTER A. HOEL (2005). Ingeniería de Tránsito y Carreteras. (3ra Edición) México: Thomson.
- [21] ORTÚZAR, J., & WILLUMSEN, L. (2008). Modelos de transporte. 2da edición, Universidad de Cantabria. España Editorial Pedro CID S.A. PP 680.
- [22] RAMIREZ VELEZ, GONZALO. (2004). Análisis para la determinación del nivel de servicio y demora en intersecciones viales semaforizadas. (Tesis Maestría). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería
- [23] RODRÍGUEZ URREGO, DANIELLA. (2014). Revisión del HCM 2010 y 2000 intersecciones semaforizadas (Revista de la Facultad de Ingeniería). Colombia: Universidad Piloto de Colombia
- [24] SCT. (2006). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Modelación de demanda para carreteras de cuota. Manual de Modelación. (4ta Edición). México.
- [25] SHARMA, M., et al (2020). *Estimation of Passenger Car Unit on Urban Roads: A Literature Review. International Journal of Transportation Science and Technology.*
- [26] SHEFFI, Y. (1985). Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Prentice-Hall, Inc. New Jersey [Fecha de acceso 27 de marzo del 2016]. URL disponible en: http://web.mit.edu/sheffi/www/selectedMedia/sheffi_urban_trans_networks.pdf
- [27] VALDIVIEZO VICTOR MANUEL. (2014). Estudio de impacto vial para escuelas en zonas urbanas de Lima Metropolitana. (Tesis Título). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
- [28] VERASTEGUI RAYO, DOROTEO (2011). Estimación de matrices origen-destino y calibración de parámetros en el problema de asignación de tráfico en redes congestionadas. (Tesis Doctor). España: Universidad de Castilla La Mancha
- [29] XIA, et al. (2016). A distributed spatial-temporal weighted model on MapReduce for short-term traffic flow forecasting. *EL SEVIER (Neurocomputing)*. Volume 179, 246-263.
- [30] YU, M., et al (2020). *Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: A review. Construction and Building Materials*, 260, 119878.
- [31] ZHANG, et al. (2014). A hybrid short-term traffic flow forecasting method based on spectral analysis and statistical volatility model. *EL SEVIER (Transportation Research Part C: Emerging Technologies)*. Volume 43, 65-78

ANEXOS

ANEXO 01:

Aforos Martes 23 de Agosto, 2016

PLANTILLA DE MEDICIÓN DE TIEMPO																			
Lugar		Av San Luis																	
Lugar de punto de control		San Borja Norte																	
Sentido		Sur a Norte																	
Fecha		MARTES 09, MAÑANA																	
Aforador		CARBONELL ESMIRNA - GARCIA SERGIO																	
Vehiculos	Bicicletas	Camion grande		Camion pequeño		Microbus		Camioneta rural		Automovil		Motocicletas		Otros vehiculos		TOTAL			
Intervalos de 15 min
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D		I		
07:00	07:15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	62	0	1	0		1	161.3	
07:15	07:30	0	1	0		4		6	3	0	0	100	93	2	3		0	224.5	
07:30	07:45	0	3	0		0	2	3	4	0	0	133	70	3	2		0	1	228.3
07:45	08:00	0	1	0		4	5	5	1	1	0	60	128	0	2		0	1	220
08:00	08:15	0		0	2	1		4	3	0	1	108	78	5	8		0	1	218.5
08:15	08:30	0	1	1		2	1	7	4	3	0	79	93	3	8		0		216.3
08:30	08:45	0	3	1	1	2		5	5	0	0	63	134	3	4		0	1	235.8
08:45	09:00	0		0		2		3	3	0	0	70	82	4	4	1		174.8	
09:00	09:15	0	1	0	1	5	1	2	5	0	1	86	117	6	5	0		239.3	
09:15	09:30	0		0		4	4	9	3	1	0	82	118	3	8	0		248.8	
09:30	09:45	1		0		4	2	5	3	1	0	110	143	3	4	0		287.3	
09:45	10:00	0		0		4		6	4	1	0	104	99	5	2	0	1	239.5	
Total	1	10	2	4	32	15	55	38	7	2	1093	1217	37	51	1	6	2571		
Total Equiv.	0.5	5	5	10	48	22.5	165	114	8.75	2.5	1093	1217	18.5	25.5	0.75	4.5	2741		

PLANTILLA DE MEDICIÓN DE TIEMPO																			
Lugar		Av San Luis																	
Lugar de punto de control		San Borja Norte																	
Sentido		Sur a Norte																	
Fecha		MARTES 09, NOCHE																	
Aforador		CARBONELL ESMIRNA - GARCIA SERGIO																	
Vehiculos	Bicicletas		Camion grande		Camion pequeño		Microbus		Camioneta rural		Automovil		Motocicletas		Otros vehiculos		TOTAL		
Intervalos de 15 min
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I			
06:00	06:15	1		1		2		6		2		121	129	17		0			282
06:15	06:30	1		0		2		6		1		128	77	13		0			231.3
06:30	06:45	0		0	1	1		6		1	2	120	114	9	6	0		1	265
06:45	07:00	1	1	0		0	3	1	6	0	1	112	94	8	4	0			236.3
07:00	07:15	2		0		1	1	2	7	0		145	117	7	4	0			294
07:15	07:30	2		0		1	4	0	7	0		117	111	6	5	1			260.3
07:30	07:45	1		0		1	2	3	5	1		79	85	7	1	1			195
07:45	08:00	3		0	2	0		1	5	0		127	88	4	1	0		239	
08:00	08:15	0		0	2	0	1	1	5	0		117	94	2	5	0		236	
08:15	08:30	0	1	0		1	2	2	5	0		128	125	3	3	1	1	280	
08:30	08:45	0	1	0		0		2	1	0		94	97	6	2	0	1	203.8	
08:45	09:00	0		0		0		0	2	0		85	109	1	1	0		200	
Total		11	3	1	5	9	13	30	43	5	3	1373	1240	83	32	3	3	2857	
Total Equiv.		5.5	1.5	2.5	12.5	13.5	19.5	90	129	6.25	3.75	1373	1240	41.5	16	2.25	2.25	2959	

Aforos Miercoles 24 de Agosto, 2016

PLANTILLA DE MEDICIÓN DE TIEMPO																			
Lugar		Av San Luis																	
Lugar de punto de control		San Borja Norte																	
Sentido		Sur a Norte																	
Fecha		MIÉRCOLES 10, MAÑANA																	
Aforador		CARBONELL ESMIRNA - GARCIA SERGIO																	
Vehiculos	Bicicletas		Camion grande		Camion pequeño		Microbus		Camioneta rural		Automovil		Motocicletas		Otros vehiculos		TOTAL

Intervalos de 15 min																			
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I			
07:00 - 07:15		0		1		1		2		0	79	75		1		1	164.3		
07:15 - 07:30		0		0		0	4	0		0	98	95		0		0	203		
07:30 - 07:45	1	0	1	0		4	7	2		0	90	105	2	0		0	227.5		
07:45 - 08:00	1	0		0		3	6	3		2	107	80	4	1	1	0	220.3		
08:00 - 08:15	4	0	1	0	3	1	6	1		0	106	87	1	0	1	0	222.3		
08:15 - 08:30	2	0	1	0		2	6	2	2	0	88	66	5	1		0	186		
08:30 - 08:45	1	0		0		6	12	6		0	130	67	3	0	1	0	253.8		
08:45 - 09:00	2	0		0	1	2	5	2		0	81	69	2	2		0	175		
09:00 - 09:15	2	0		1	1	3	4	3		0	112	68	2	1	2	0	210		
09:15 - 09:30	1	0	1	3	1	4	5	4	2	0	97	85	2	6	1	0	229.8		
09:30 - 09:45	1	0	1	1		3	5	3	7	0	113	84	4	5	1	0	241		
09:45 - 10:00	2	0	1	0	2	0	2	0		0	98	96	2	0	1	0	207.3		
Total	17	0	6	6	8	29	62	28	11	2	1199	977	27	17	8	1	2398		
Total Equiv.	8.5	0	15	15	12	43.5	186	84	13.75	2.5	1199	977	13.5	8.5	6	0.75	2585		

PLANTILLA DE MEDICIÓN DE TIEMPO																		
Lugar		Av San Luis																
Lugar de punto de control		San Borja Norte																
Sentido		Sur a Norte																
Fecha		JUEVES NOCHE																
Aforador		CARBONELL ESMIRNA - GARCIA SERGIO																
Vehiculos		Bicicletas		Camion grande		Camion pequeño		Microbus		Camioneta rural		Automovil		Motocicletas		Otros vehiculos		TOTAL
Intervalos de 15 min
		D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	
06:00	06:15	1	0	1	2	1	1	7	4	1	0	101	99	6	2		0	
06:15	06:30		0		0	6	1	2	3	1	0	110	123	6	3	1	0	
06:30	06:45		0		0		1	1	6	1	0	120	105	4	4		0	
06:45	07:00		2		0		1		6		1	92	101	1	7		1	
07:00	07:15		1		0		1		5		0	116	104	1	7		0	
07:15	07:30	2	1	1	1	1	1	4	2	0	1	86	94	4	1		0	
07:30	07:45		0	1	1	2	0	3	1		0	129	108	6	2		0	
07:45	08:00	1	0	3	0	3	0	3	5	2	1	106	113	6	1		0	
08:00	08:15		0		0		0		3		0	103	85	4	2		0	
08:15	08:30	1	0	1	0		0	2	5	1	0	162	101	5	3		0	
08:30	08:45	2	0		0		0	3	5		0	141	105	0	2		0	
08:45	09:00		0		1		0	2	2		1	93	89	3	1			
Total		7	4	7	5	13	6	27	47	6	4	1258	1227	46	35	1	1	
Total Equiv.		3.5	2	17.5	12.5	19.5	9	81	141	7.5	5	1258	1227	23	17.5	0.75	0.75	

Aforos Jueves 25 de Agosto, 2016

PLANTILLA DE MEDICIÓN DE TIEMPO																			
Lugar		Av San Luis																	
Lugar de punto de control		San Borja Norte																	
Sentido		Sur a Norte																	
Fecha		MARTES 09, MAÑANA																	
Aforador		CARBONELL ESMIRNA - GARCIA SERGIO																	
Vehiculos		Bicicletas		Camion grande		Camion pequeño		Microbus		Camioneta rural		Automovil		Motocicletas		Otros vehiculos		TOTAL	
Intervalos de 15 min
		D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I		
07:00	07:15											81	93						174
07:15	07:30	0		0	4	0	1	3	3	0	1	78	90	2	1	0			197.3
07:30	07:45	0		0	1	0		4	3	1	2	114	127	2	1	0			266.3
07:45	08:00	3		0		1		3	6	0	4	82	110	2	1	0			224
08:00	08:15	1		0	1	1	2	6	4	2	1	106	119	3	1	1			264
08:15	08:30	1		0	1	0		8	2	0	1	87	97	1	1	0			214.3
08:30	08:45		2		1	1	2	6	4			91	103	2	0		1		228.8
08:45	09:00	0	1	1		0	2	6	5	0		107	104	3	4	0		248	
09:00	09:15	2		0	2	1		3	6	1		125	103	7	1	0	1	264	
09:15	09:30	0		1	1	1	3	4	3	0		110	95	4	1	0		236	
09:30	09:45	1		1	2	2	6	3	7	0	1	98	110	6	2	1		259	
09:45	10:00		1	0		1	3	2	5			92	90	3	2		1	209.3	
Total		8	4	3	13	8	19	48	48	4	10	1171	1241	35	15	2	3	2632	
Total Equiv.		4	2	7.5	32.5	12	28.5	120	120	5	12.5	1171	1241	17.5	7.5	1.5	2.25	2785	

PLANTILLA DE MEDICIÓN DE TIEMPO																			
Lugar		Av San Luis																	
Lugar de punto de control		San Borja Norte																	
Sentido		Sur a Norte																	
Fecha		JUEVES NOCHE																	
Aforador		CARBONELL ESMIRNA - GARCIA SERGIO																	
Vehiculos		Bicicletas		Camion grande		Camion pequeño		Microbus		Camioneta rural		Automovil		Motocicletas		Otros vehiculos		TOTAL	
Intervalos de 15 min
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I			
06:00	06:15		0		0		1		1		0	92	90		0		0		186
06:15	06:30		1		1		0		2		1	101	110		3		0		221.8
06:30	06:45	3	0		0		1	2	4	1	0	135	115	10	1		1		275.5
06:45	07:00		0	1	0	1	0	3	4		0	103	91	4	7		0		221
07:00	07:15	2	0		0		4	1	4		0	146	101	6	0		0		269.5
07:15	07:30	3	0		0	1	1	2	5		0	108	113	4	9	1	0		250.3
07:30	07:45		0		0		1	1	3		1	132	71	7	1		0		219.8
07:45	08:00		1		0	1	1	2	2		0	162	89	3	2		0	267	
08:00	08:15		0		0		0	2	2		0	103	80	2	2	1	0	195.8	
08:15	08:30		0	1	1	1	3	1	5	1	0	101	82	6	3	1	0	215.5	
08:30	08:45		0		0	3	1	2	3		0	115	125	6	1		0	262	
08:45	09:00	1	0		0		0	1	2		0	50	60	3	0		0	119.5	
Total		9	2	2	2	7	13	17	37	2	2	1256	1127	51	29	3	1	2560	
Total Equiv.		4.5	1	5	5	10.5	19.5	51	111	2.5	2.5	1256	1127	25.5	14.5	2.25	0.75	2639	

ANEXO 02:**TIEMPOS DE VIAJE****23/08/2016 Turno Mañana 8:45 a.m. – 9:45 a.m.**

Fecha	23/08/2016							
Día	Martes							
Turno	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)							
N° Muestras	Tipos de vehiculo							
	C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros
1	0.41	0.36	0.35	0.33	0.21	0.18	0.39	0.48
2	0.35	0.44	0.44	0.25	0.20	0.22	0.35	0.55
3	0.26	0.26	0.45	0.29	0.22	0.25	0.33	0.44
4	0.44	0.29	0.33	0.35	0.23	0.19	0.29	0.54
5	0.22	0.33	0.55	0.22	0.24	0.15	0.31	0.40
6					0.17			
7					0.21			
8					0.18			
9					0.20			
10					0.15			
11					0.23			
12					0.24			
13					0.22			
14					0.23			
15					1.19			
16					1.20			
17					0.23			
18					0.24			
19					0.19			
20								
Tiempo de viaje prom. (min)	0.34	0.34	0.42	0.29	0.31	0.20	0.33	0.48

23/08/2016 Turno Noche 7:15 p.m. – 8:15 p.m.

Fecha	23/08/2016							
Día	Martes							
Turno	Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)							
N° Muestras	Tipos de vehiculo							
	C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros
1	0.64	0.53	0.70	0.43	0.48	0.28	0.25	0.44
2	0.59	0.48	0.58	0.42	0.50	0.25	0.22	0.55
3	0.57	0.57	0.64	0.39	0.52	0.23	0.28	0.44
4	0.58	0.49	0.68	0.45	0.47	0.30	0.29	0.54
5	0.65	0.51	0.65	0.37	0.44	0.25	0.24	0.40
6					0.58			
7					0.56			
8					0.55			
9					0.52			
10					0.49			
11					0.42			
12					0.54			
13					1.20			
14					0.53			
15					0.57			
16					0.60			
17					0.66			
18					0.57			
19					0.45			
20								
Tiempo de viaje prom. (min)	0.61	0.52	0.65	0.41	0.56	0.26	0.26	0.47

24/08/2016 Turno Mañana 8:45 a.m. – 9:45 a.m.

Fecha	24/08/2016							
Día	Miércoles							
Turno	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)							
N° Muestras	Tipos de vehiculo							
	C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros
1	0.39	0.45	0.50	0.25	0.32	0.18	0.18	0.32
2	0.45	0.41	0.47	0.24	0.30	0.25	0.25	0.22
3	0.33	0.38	0.44	0.28	0.22	0.22	0.26	0.27
4	0.44	0.46	0.39	0.29	0.27	0.25	0.19	0.25
5	0.43	0.42	0.48	0.20	0.24	0.19	0.17	0.24
6					0.38			
7					0.21			
8					0.35			
9					0.31			
10					1.29			
11					0.33			
12					0.34			
13					1.38			
14					0.33			
15					0.32			
16					0.20			
17					0.33			
18					1.38			
19					0.31			
20								
Tiempo de viaje prom. (min)	0.41	0.42	0.46	0.25	0.46	0.22	0.21	0.26

24/08/2016 Turno Noche 7:15 p.m. – 8:15 p.m.

Fecha	24/08/2016							
Día	Miércoles							
Turno	Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)							
N° Muestras	Tipos de vehiculo							
	C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros
1	0.55	0.60	0.66	0.44	0.65	0.23	0.40	0.63
2	0.52	0.53	0.59	0.39	0.63	0.25	0.36	0.58
3	0.60	0.52	0.63	0.37	0.63	0.30	0.35	0.62
4	0.58	0.57	0.57	0.35	0.57	0.22	0.34	0.61
5	0.66	0.55	0.60	0.38	0.54	0.26	0.33	0.63
6					0.48			
7					0.39			
8					0.40			
9					0.33			
10					0.44			
11					0.60			
12					0.61			
13					1.15			
14					1.20			
15					1.02			
16					0.68			
17					0.63			
18					0.69			
19					0.60			
20								
Tiempo de viaje prom. (min)	0.58	0.55	0.61	0.39	0.64	0.25	0.36	0.61

25/08/2016 Turno Mañana 8:45 a.m. – 9:45 a.m.

Fecha	25/08/2016							
Día	Jueves							
Turno	Mañana (8:45 a.m. - 9:45 a.m.)							
N° Muestras	Tipos de vehiculo							
	C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros
1	0.41	0.35	0.30	0.28	0.26	0.15	0.17	0.45
2	0.35	0.41	0.34	0.22	0.27	0.21	0.22	0.46
3	0.31	0.20	0.25	0.21	0.25	0.18	0.21	0.42
4	0.44	0.25	0.23	0.26	0.26	0.17	0.17	0.44
5	0.30	0.32	0.27	0.19	0.23	0.16	0.23	0.36
6					0.26			
7					0.24			
8					0.33			
9					0.22			
10					0.23			
11					0.31			
12					0.22			
13					0.26			
14					1.15			
15					1.06			
16					0.26			
17					1.05			
18					0.24			
19					0.21			
20								
Tiempo de viaje prom. (min)	0.36	0.31	0.28	0.23	0.38	0.17	0.20	0.43

25/08/2016 Turno Noche 7:15 p.m. – 8:15 p.m.

Fecha	25/08/2016							
Día	Jueves							
Turno	Noche (7:15 p.m. - 8:15 p.m.)							
N° Muestras	Tipos de vehículo							
	C. Grande	C. Pequeño	Microbus	Camioneta rural	Auto	Motocicleta	Bicicleta	Otros
1	0.65	0.63	0.70	0.52	0.42	0.32	0.29	0.55
2	0.58	0.58	0.69	0.48	0.30	0.27	0.27	0.62
3	0.51	0.66	0.64	0.46	0.32	0.29	0.22	0.54
4	0.59	0.57	0.67	0.55	0.37	0.31	0.28	0.51
5	0.61	0.64	0.69	0.43	0.44	0.26	0.26	0.53
6					0.38			
7					0.41			
8					1.15			
9					1.20			
10					0.29			
11					1.02			
12					0.34			
13					1.20			
14					0.33			
15					0.37			
16					0.40			
17					0.41			
18					0.44			
19					0.33			
20								
Tiempo de viaje prom. (min)	0.59	0.62	0.68	0.49	0.53	0.29	0.26	0.55

ANEXO 03:**CÁLCULO DE LOS VALORES α y β , REEMPLAZANDO EN LAS ECUACIONES**

$$T_f = t_o * \left[1 + \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right]$$

Datos:

Capacidad (veh equi/ hora) = 1,196

To (min) = 0.144

CONVIRTIENDO A ECUACIONES MATRICIALES

$$\ln \left(\frac{T_f - t_o}{t_o} \right) = \ln(\alpha) + \beta \cdot \ln \left(\frac{V}{C} \right)$$

$$Y = A + \beta \cdot X, \quad \alpha = e^A$$

$$\begin{bmatrix} A \\ \beta \end{bmatrix} = ([X^T][X])^{-1} \times [X^T][Y]$$

$$\begin{bmatrix} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & - & 0.2303 \\ 1 & - & 0.1250 \\ 1 & - & 0.3348 \\ 1 & - & 0.2706 \\ 1 & - & 0.1720 \\ 1 & - & 0.1629 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3019 \\ 0.8075 \\ 0.2876 \\ 0.9016 \\ 0.0475 \\ 0.9092 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -0.2303167 & -0.125009 & -0.3348004 & -0.270591 & -0.172048 & -0.162904 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X^T \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 & -1.295668 \\ -1.2956682 & 0.3101217 \end{bmatrix}$$

$$\left(\begin{bmatrix} X^T \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} \right)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.7042091 & 7.1200747 \\ 7.1200747 & 32.971749 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X^T \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.255201 \\ -0.6669959 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.80 \\ 1.19 \end{bmatrix},$$

Cuya solución es:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.22 \\ 1.19 \end{bmatrix}$$

ANEXO 04:**VALIDACION DE LOS VALORES α y β CALIBRADOS**

α	2.22							
β	1.19							
INVESTIGACIÓN								
Muestra	Periodos de análisis	Tiempo obseado (min)	Tiempo en flujo libre (min)	Capacidad vial (veh/h/arco)	Volumen vehicular observado (veh/h/arco)	Volumen vehicular asignado (veh/h/arco)	GEH	%RMSE
1	06:00:00 a.m. - 07:00:00 a.m	0.22	0.14	1,196.05	512.00	357.65	7.40	27.21%
2	07:00:00 a.m. - 08:00:00 a.m	0.34	0.14	1,196.05	876.25	792.89	2.89	
3	08:00:00 a.m. - 09:00:00 a.m	0.65	0.14	1,196.05	1,147.50	1,759.31	16.05	
4	09:00:00 a.m. - 10:00:00 a.m	0.41	0.14	1,196.05	884.00	1,024.85	4.56	
5	10:00:00 a.m. - 11:00:00 a.m	0.34	0.14	1,196.05	725.25	792.89	2.45	
6	11:00:00 a.m. - 12:00:00 m	0.29	0.14	1,196.05	689.75	619.06	2.76	
7	12:00:00 m. - 01:00:00 p.m	0.36	0.14	1,196.05	889.12	860.34	0.97	
8	01:00:00 p.m. - 02:00:00 p.m	0.32	0.14	1,196.05	863.00	724.32	4.92	
9	02:00:00 p.m. - 03:00:00 p.m	0.26	0.14	1,196.05	812.75	510.25	11.76	
10	03:00:00 p.m. - 04:00:00 p.m	0.21	0.14	1,196.05	698.75	317.67	16.90	
11	04:00:00 p.m. - 05:00:00 p.m	0.34	0.14	1,196.05	798.00	792.89	0.18	
12	05:00:00 p.m. - 06:00:00 p.m	0.31	0.14	1,196.05	887.50	689.58	7.05	
13	06:00:00 p.m. - 07:00:00 p.m	0.38	0.14	1,196.05	989.50	926.81	2.03	
14	07:00:00 p.m. - 08:00:00 p.m	0.42	0.14	1,196.05	964.50	1,057.13	2.91	
15	08:00:00 p.m. - 09:00:00 p.m	0.49	0.14	1,196.05	953.00	1,278.27	9.74	
16	09:00:00 p.m. - 10:00:00 p.m	0.36	0.14	1,196.05	854.50	860.34	0.20	

ANEXO 05:**VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESTÁNDAR DEL JICA, HCM, MTC**

α	1.10							
β	3.20							
JICA								
Muestra	Periodos de análisis	Tiempo obseado (min)	Tiempo en flujo libre (min)	Capacidad vial (veh/h/arco)	Volumen vehicular (veh/h/arco)	Volumen vehicular (veh/h/arco)	GEH	%RMSE
1	06:00:00 a.m. - 07:00:00 a.m	0.22	0.14	1,196.05	512.00	950.78	16.22	52.44%
2	07:00:00 a.m. - 08:00:00 a.m	0.34	0.14	1,196.05	876.25	1,278.37	12.25	
3	08:00:00 a.m. - 09:00:00 a.m	0.65	0.14	1,196.05	1,147.50	1,719.38	15.10	
4	09:00:00 a.m. - 10:00:00 a.m	0.41	0.14	1,196.05	884.00	1,406.37	15.44	
5	10:00:00 a.m. - 11:00:00 a.m	0.34	0.14	1,196.05	725.25	1,278.37	17.48	
6	11:00:00 a.m. - 12:00:00 m	0.29	0.14	1,196.05	689.75	1,165.97	15.63	
7	12:00:00 m. - 01:00:00 p.m	0.36	0.14	1,196.05	889.12	1,317.78	12.90	
8	01:00:00 p.m. - 02:00:00 p.m	0.32	0.14	1,196.05	863.00	1,236.08	11.52	
9	02:00:00 p.m. - 03:00:00 p.m	0.26	0.14	1,196.05	812.75	1,085.10	8.84	
10	03:00:00 p.m. - 04:00:00 p.m	0.21	0.14	1,196.05	698.75	909.77	7.44	
11	04:00:00 p.m. - 05:00:00 p.m	0.34	0.14	1,196.05	798.00	1,278.37	14.91	
12	05:00:00 p.m. - 06:00:00 p.m	0.31	0.14	1,196.05	887.50	1,213.69	10.06	
13	06:00:00 p.m. - 07:00:00 p.m	0.38	0.14	1,196.05	989.50	1,354.75	10.67	
14	07:00:00 p.m. - 08:00:00 p.m	0.42	0.14	1,196.05	964.50	1,422.69	13.26	
15	08:00:00 p.m. - 09:00:00 p.m	0.49	0.14	1,196.05	953.00	1,526.82	16.30	
16	09:00:00 p.m. - 10:00:00 p.m	0.36	0.14	1,196.05	854.50	1,317.78	14.06	

	α	1.00						
	β	5.00						
HCM 2010								
Muestra	Periodos de análisis	Tiempo obseado (min)	Tiempo en flujo libre (min)	Capacidad vial (veh/h/arc o)	Volumen vehicular (veh/h/arc o)	Volumen vehicular (veh/h/arc o)	GEH	%RMSE
1	06:00:00 a.m. - 07:00:00 a.m.	0.22	0.14	1,196.05	512.00	1,052.54	19.33	50.60%
2	07:00:00 a.m. - 08:00:00 a.m.	0.34	0.14	1,196.05	876.25	1,272.12	12.08	
3	08:00:00 a.m. - 09:00:00 a.m.	0.65	0.14	1,196.05	1,147.50	1,537.82	10.65	
4	09:00:00 a.m. - 10:00:00 a.m.	0.41	0.14	1,196.05	884.00	1,352.24	14.00	
5	10:00:00 a.m. - 11:00:00 a.m.	0.34	0.14	1,196.05	725.25	1,272.12	17.30	
6	11:00:00 a.m. - 12:00:00 m.	0.29	0.14	1,196.05	689.75	1,199.35	16.58	
7	12:00:00 m. - 01:00:00 p.m.	0.36	0.14	1,196.05	889.12	1,297.08	12.34	
8	01:00:00 p.m. - 02:00:00 p.m.	0.32	0.14	1,196.05	863.00	1,245.03	11.77	
9	02:00:00 p.m. - 03:00:00 p.m.	0.26	0.14	1,196.05	812.75	1,145.43	10.63	
10	03:00:00 p.m. - 04:00:00 p.m.	0.21	0.14	1,196.05	698.75	1,023.26	11.06	
11	04:00:00 p.m. - 05:00:00 p.m.	0.34	0.14	1,196.05	798.00	1,272.12	14.74	
12	05:00:00 p.m. - 06:00:00 p.m.	0.31	0.14	1,196.05	887.50	1,230.55	10.54	
13	06:00:00 p.m. - 07:00:00 p.m.	0.38	0.14	1,196.05	989.50	1,320.26	9.73	
14	07:00:00 p.m. - 08:00:00 p.m.	0.42	0.14	1,196.05	964.50	1,362.25	11.66	
15	08:00:00 p.m. - 09:00:00 p.m.	0.49	0.14	1,196.05	953.00	1,425.25	13.69	
16	09:00:00 p.m. - 10:00:00 p.m.	0.36	0.14	1,196.05	854.50	1,297.08	13.49	

	α	0.15						
	β	4.00						
MTC								
Muestra	Periodos de análisis	Tiempo obseado (min)	Tiempo en flujo libre (min)	Capacidad vial (veh/h/arc o)	Volumen vehicular (veh/h/arc o)	Volumen vehicular (veh/h/arc o)	GEH	%RMSE
1	06:00:00 a.m. - 07:00:00 a.m.	0.22	0.14	1,196.05	512.00	1,638.09	34.34	145.88%
2	07:00:00 a.m. - 08:00:00 a.m.	0.34	0.14	1,196.05	876.25	2,075.87	31.22	
3	08:00:00 a.m. - 09:00:00 a.m.	0.65	0.14	1,196.05	1,147.50	2,631.32	34.14	
4	09:00:00 a.m. - 10:00:00 a.m.	0.41	0.14	1,196.05	884.00	2,240.56	34.32	
5	10:00:00 a.m. - 11:00:00 a.m.	0.34	0.14	1,196.05	725.25	2,075.87	36.09	
6	11:00:00 a.m. - 12:00:00 m.	0.29	0.14	1,196.05	689.75	1,928.52	34.24	
7	12:00:00 m. - 01:00:00 p.m.	0.36	0.14	1,196.05	889.12	2,126.91	31.87	
8	01:00:00 p.m. - 02:00:00 p.m.	0.32	0.14	1,196.05	863.00	2,020.75	30.49	
9	02:00:00 p.m. - 03:00:00 p.m.	0.26	0.14	1,196.05	812.75	1,820.75	27.78	
10	03:00:00 p.m. - 04:00:00 p.m.	0.21	0.14	1,196.05	698.75	1,581.33	26.14	
11	04:00:00 p.m. - 05:00:00 p.m.	0.34	0.14	1,196.05	798.00	2,075.87	33.71	
12	05:00:00 p.m. - 06:00:00 p.m.	0.31	0.14	1,196.05	887.50	1,991.42	29.10	
13	06:00:00 p.m. - 07:00:00 p.m.	0.38	0.14	1,196.05	989.50	2,174.52	29.79	
14	07:00:00 p.m. - 08:00:00 p.m.	0.42	0.14	1,196.05	964.50	2,261.32	32.29	
15	08:00:00 p.m. - 09:00:00 p.m.	0.49	0.14	1,196.05	953.00	2,392.79	35.20	
16	09:00:00 p.m. - 10:00:00 p.m.	0.36	0.14	1,196.05	854.50	2,126.91	32.96	

ANEXO 06:

PERIODO DE ANÁLISIS PARA EL TIEMPO Y VELOCIDAD DE VIAJE

Muestra	Periodo de análisis	Tiempo de viaje observado		Velocidad de viaje observada		Volumen vehicular (veh/15min/ arco)	Tiempo en flujo libre (min)		Capacidad (C) (veh/15min/arco)		Alfa	Beta	Tiempo de viaje asignado		Velocidad de viaje asignado
		(min)	(kph)	(kph)	(kph)		(min)	(veh/15min/arco)					(min)	(kph)	
1	03:00:00 a.m. - 04:00:00 a.m	0.14	60.00	60.00	60.00	0.00	0.14	299.01	0.00				0.14	60.00	
2	04:00:00 a.m. - 05:00:00 a.m	0.14	60.00	60.00	10.25	0.03	0.14	299.01	0.03				0.15	57.65	
3	05:00:00 a.m. - 06:00:00 a.m	0.15	58.38	45.20	45.20	0.15	0.14	299.01	0.15				0.18	48.52	
4	06:00:00 a.m. - 07:00:00 a.m	0.18	48.00	100.75	100.75	0.34	0.14	299.01	0.34				0.23	37.22	
5	07:00:00 a.m. - 07:15:00 a.m	0.23	37.57	131.25	131.25	0.44	0.14	299.01	0.44				0.26	32.65	
6	07:15:00 a.m. - 07:30:00 a.m	0.30	28.80	222.75	222.75	0.74	0.14	299.01	0.74				0.37	23.37	
7	07:30:00 a.m. - 07:45:00 a.m	0.35	24.69	247.25	247.25	0.83	0.14	299.01	0.83				0.40	21.63	
8	07:45:00 a.m. - 08:00:00 a.m	0.41	21.07	262.50	262.50	0.88	0.14	299.01	0.88		2.22	1.19	0.42	20.66	
9	08:00:00 a.m. - 08:15:00 a.m	0.50	17.28	290.00	290.00	0.97	0.14	299.01	0.97				0.45	19.09	
10	08:15:00 a.m. - 08:30:00 a.m	0.59	14.64	310.00	310.00	1.04	0.14	299.01	1.04				0.48	18.08	
11	08:30:00 a.m. - 08:45:00 a.m	0.68	12.71	305.00	305.00	1.02	0.14	299.01	1.02				0.47	18.32	
12	08:45:00 a.m. - 09:00:00 a.m	0.88	9.82	242.25	242.25	0.81	0.14	299.01	0.81				0.39	21.97	
13	09:00:00 a.m. - 09:15:00 a.m	1.00	8.64	220.00	220.00	0.74	0.14	299.01	0.74				0.37	23.58	
14	09:15:00 a.m. - 09:30:00 a.m	1.26	6.86	195.75	195.75	0.65	0.14	299.01	0.65				0.34	25.69	
15	09:30:00 a.m. - 09:45:00 a.m	0.86	10.05	259.00	259.00	0.87	0.14	299.01	0.87				0.41	20.87	
16	09:45:00 a.m. - 10:00:00 a.m	0.50	17.28	209.25	209.25	0.70	0.14	299.01	0.70				0.35	24.43	

ANEXO 07:

IMÁGENES DEL LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN