

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga
Facultad de Ingeniería de Minas Geología y Civil
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Tesis para optar el título de Ingeniero Civil

Evaluación y modelamiento del sistema de regulación de tráfico vehicular en el Centro Histórico del distrito de Ayacucho

Presenta:

Jomar Pachacútec De la Cruz Bonifacio

Asesor:

M.Sc. Ing. Hemerson Lizarbe Alarcón

Ayacucho - Perú, Septiembre de 2019

RESUMEN

Esta tesis se basó bajo el problema de tráfico vehicular en la zona central de la ciudad de Ayacucho, conformada de una distribución de tipo colonial (calles en formas de damero y estrechas), esta característica ocasionó que actualmente se generen problemas de congestión vehicular en varias de sus intersecciones.

La finalidad para elaborar esta investigación consistió en realizar un modelamiento del tráfico de la zona central del Centro Histórico a fin de evaluar el desempeño de su sistema regulación de tráfico vehicular caracterizada por incluir: rutas de transporte, controles de tráfico, restricciones por tipo de vehículo entre otras que ha establecido la Municipalidad Provincial de Huamanga.

La metodología usada consistió en la modelación de una red de tránsito vehicular para evaluar y simular el tráfico vehicular a partir del sistema de regulación que se maneja en el Centro Histórico. El tipo de modelamiento escogido fue a nivel mesoscópico, nivel que combina beneficios del modelo microscópico y macroscópico, permitiendo obtener parámetros de congestión vehicular en cada una de las intersecciones de vías en la red. El principal parámetro estudiado en el tráfico vehicular es la demora por vehículo, este indicador permite evaluar el nivel de servicio de cada una de las intersecciones.

Como aporte esta investigación utiliza las bases de la simulación microscópica de tráfico vehicular para la evaluación de redes más complejas que acopla la interacción del flujo vehicular entre intersecciones y vías. El modelo final acabó siendo mesoscópico utilizando el modelo simplificado de seguimiento vehicular aplicado en un entorno con asignación estática. Los resultados del modelo fueron estocásticos debido a la alimentación aleatoria en los ingresos de la red, buscando reflejar la realidad del comportamiento del tráfico.

Palabras clave: Evaluación mesoscópica de tráfico; simulación en redes vehiculares; congestión vehicular, demoras por vehículo.

SUMMARY

This thesis was based on the vehicular traffic problem in the central area of the Ayacucho city, this city has a colonial-type distribution (streets in checkered and narrow forms), this characteristic caused that there are currently problems of traffic congestion in several city intersections.

The purpose of this research was to make a traffic modeling of the central area of the Historic Center and to evaluate the performance of its vehicular traffic regulation system characterized by including: transport routes, traffic controls, restrictions by vehicle type among others that the Huamanga city administration has established.

The methodology consisted in to do a modeling a vehicular traffic network to evaluate and simulate vehicular traffic based on the regulation system that is managed in the Historic Center. The type of modeling chosen was at the mesoscopic level, a level that combines benefits of the microscopic and macroscopic model, allowing to obtain parameters of vehicular congestion at each of the intersections of roads in the network. The main parameter studied in vehicular traffic is the delay per vehicle, this indicator allows to evaluate the level of service of each of the intersections.

As a contribution, this research uses the basis of the microscopic simulation of vehicular traffic for the evaluation of more complex networks that couples the interaction of the vehicular flow between intersections and roads. The final model ended up being mesoscopic using the simplified vehicle tracking model applied in an environment with static allocation. The results of the model were stochastic due to random feeding in the income of the network, seeking to reflect the reality of traffic behavior.

Key words: Mesoscopic traffic evaluation; simulation in vehicular networks; vehicular congestion, delays per vehicle.

INTRODUCCIÓN

El planeamiento de transporte se establece generalmente a partir de modelos macroscópicos alcanzando un enfoque general de una zona territorial amplia para su análisis, por otro lado los modelos microscópicos se enfocaron a niveles muy específicos para el estudio de tráfico, limitado a abarcar elementos específicos de una vía. Ambos modelos no pueden evaluar la congestión que se genera en un sistema de regulación representada como una red compleja, por interacción e influencia de unas calles con otras, es aquí cuando aparecen los modelos mesoscópicos como intermediario de ambos modelos.

El Centro Histórico de Ayacucho, que no es ajeno a los problemas de tráfico, tiene diversos factores que influyen al tráfico del sistema vial como son: el transporte público y privado, los estacionamientos, los controles de tránsito, el tránsito no motorizado, la falta de educación vial entre otros. Esta investigación busca integrar estos parámetros para obtener un modelo computacional con la capacidad de controlar el tránsito vehicular.

Se busca establecer un modelo mesoscópico para el sistema de regulación de la Zona Central del Centro Histórico de Ayacucho, a fin de predecir las formaciones de congestión y caracterizar el movimiento vehicular dentro de la red con un modelo eficiente y dinámico, abierto a la aplicación de búsquedas de alternativas de solución de problemas de congestión y predicción de éstos en el la red de tráfico. El modelo se basa en el modelo de seguimiento simplificado de Mahut, desarrollado en Vissim, con la que se alcanzó un sistema flexible, con características de la zona de estudio, los flujos vehiculares fueron regulados por procesos estocásticos, y su distribución en la red se hizo con asignación estática según los datos recolectados.

Para mi fuente de inspiración y ganas de seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento inicial para mi alma mater, la universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga que me fortaleció con conocimiento en mi formación como ingeniero civil.

Agradezco igualmente a mi asesor de tesis el M.Sc. Ing. Hemerson Lizarbe Alarcón de la Escuela de Ingeniería Civil de esta universidad, por abrirme sus puertas y su colaboración en la elaboración de esta tesis.

Al M.Sc. Ing. Cristian Castro Pérez y al M.Sc. Ing. Edmundo Canchari Gutiérrez, ingenieros docentes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, evaluadores de esta tesis, les agradezco sus comentarios y su crítica constructiva en la revisión de esta tesis.

De igual modo quiero reconocer al Ing. Arturo Araujo Barrientos, por su gentil actitud en su cooperación, al facilitarme el modelo v3D de mototaxis de su trabajo de investigación “Micro-Simulación de Vehículos Atípicos: el caso de Moto-taxis en Villa María del Triunfo”. Y a las amistades formadas tras el proceso de la tesis, que han permitido alcanzar con calidad el modelamiento de esta investigación.

Finalmente, expreso mi más profundo agradecimiento a mi madre, mis hermanas, por ese apoyo y presencia infinita sin la cual no hubiera sido posible seguir adelante.

Contenido

Lista de figuras	X
Lista de tablasXIV
GlosarioXVIII
AcrónimosXIX
Lista de símbolos	XX
1 Planeamiento del problema	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Delimitación del problema	2
1.2.1 Delimitación espacial	2
1.2.2 Delimitación temporal	3
1.2.3 Temática y unidad de análisis	3
1.3 Formulación del problema	4
1.3.1 Problema general	4
1.3.2 Problemas específicos	4
1.4 Justificación e importancia	4
1.4.1 Conveniencia	4
1.4.2 Relevancia social	5
1.4.3 Implicaciones prácticas	5
1.4.4 Valor teórico	6
1.4.5 Utilidad metodológica	6
1.5 Limitaciones	7

1.6	Objetivos de la investigación	7
1.6.1	Objetivo general	7
1.6.2	Objetivos específicos	7
2	Estado del arte	8
2.1	Antecedentes	8
2.1.1	Investigaciones internacionales	8
2.1.2	Investigaciones nacionales	10
2.2	Bases teóricas	11
2.2.1	Tráfico vehicular en Centros Históricos	11
2.2.2	Modelo de transporte	12
2.2.3	Congestión vehicular	13
2.3	Marco conceptual	14
2.3.1	Evaluación de tráfico en una intersección	14
2.3.2	Modelos para evaluación de tráfico	20
2.3.3	Modelación basada en una simulación mesoscópica	27
2.3.4	Modelo de seguimiento vehicular	34
2.3.5	Herramienta PTV Vissim	35
2.3.6	Calibración del modelamiento mesoscópico	41
2.3.7	Confiabilidad de resultados del modelo	42
3	Metodología de la investigación	46
3.1	Enfoque de la investigación	46
3.2	Alcance de la investigación	46
3.3	Diseño de investigación	46
3.4	Población y muestra	47

3.5	Hipótesis	49
3.5.1	Hipótesis general	49
3.5.2	Hipótesis específicas	50
3.6	Operacionalización de variables	50
3.7	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	51
3.7.1	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	51
3.7.2	Confiabilidad y validez	52
3.8	Técnicas estadísticas	53
3.9	Desarrollo del trabajo de tesis	54
3.9.1	Delimitación del espacio de trabajo	54
3.9.2	Recolección de datos	64
3.9.3	Composición vehicular	74
3.9.4	Demoras en intersecciones con métodos clásicos	75
3.9.5	Modelamiento	92
3.9.6	Calibración del modelamiento	115
3.9.7	Confiabilidad del modelamiento	120
4	Resultados	125
4.1	Contrastación de hipótesis	125
4.1.1	Contrastación de la hipótesis general	125
4.1.2	Contrastación de la hipótesis específica 1	128
4.1.3	Contrastación de la hipótesis específica 2	141
4.1.4	Contrastación de la hipótesis específica 3	146
4.2	Análisis e interpretación	148
4.2.1	Análisis del flujo vehicular en el sistema	149
4.2.2	Evaluación	151

4.2.3	Identificación de zonas de congestión	158
4.2.4	Efecto de la densidad en el tráfico del Centro Histórico	160
4.2.5	Otras aplicaciones	165
5	Conclusiones	170
5.1	Discusión de resultados	170
5.2	Conclusiones	171
5.3	Recomendaciones	174
5.4	Trabajos futuros	174
	Bibliografía	176

Lista de figuras

1.1	Vista satelital y delimitación de la Zona Central del Centro Histórico de Ayacucho	3
2.1	Esquema de la formación de la congestión de tráfico.	13
2.2	Casos de análisis en intersecciones no semaforizadas con STOP en los cuatro accesos	19
2.3	Modelos de acuerdo a escala	21
2.4	Comparación entre un modelo micro, meso y macro	22
2.5	Simulación mesoscópica	26
2.6	Simulación híbrida, Meso-Micro	26
2.7	Tipos de colas o sistemas de espera	30
2.8	Periodo del Warm Up	33
2.9	Fases del modelo de Wiedemann	37
2.10	Seguimiento vehicular	39
2.11	Cambio de carril necesario	40
2.12	Cambio de carril libre	41
3.1	Flujos horarios de afluentes de la zona central del Centro Histórico . . .	53
3.2	Parque Central - Centro Histórico de Ayacucho	55
3.3	Plano topográfico, Ciudad de Ayacucho en 1865.	57
3.4	Ubicación del Centro Histórico de Ciudad de Ayacucho	59
3.5	Sectorización del Centro Histórico de Ciudad de Ayacucho	60
3.6	Sector Central del Centro Histórico de ciudad de Ayacucho	61
3.7	Red del Centro Histórico de Ayacucho (Sector Central).	65
3.8	Anchos de calzada del Centro Histórico de Ayacucho (Sector Central). .	66

3.9	Longitudes de calles del Centro Histórico de Ayacucho (Sector Central).	67
3.10	Sentidos de flujo vehicular en el Centro Histórico (Sector Central).	68
3.11	Gradientes de calles del Centro Histórico (Sector Central).	69
3.12	Volúmenes apilados de tráfico por hora en distintas calles	70
3.13	Evaluación de la hora de máxima demanda en el centro de la ciudad de Ayacucho desde las 7:00 am hasta la 1:00 pm	71
3.14	Estudio de volúmenes direccionales. Formato de campo	73
3.15	Vista aérea, Jr. San Martín - Jr. 2 de Mayo	74
3.16	Captura de la diversidad vehicular de Ayacucho	75
3.17	Jr. Sol - Jr. San Martín	78
3.18	Geometría de la intersección del Jr. Sol y Jr. San Martín	79
3.19	Jr. Garcilaso de la Vega - Jr. Lima	83
3.20	Jr. 9 de Diciembre. - Av. M. Cáceres	84
3.21	Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	86
3.22	Jr. G. de la Vega - Jr. Bellido	90
3.23	Entradas de flujos en la red de la Zona Central	94
3.24	Intersección con prioridades de paso indeterminadas	96
3.25	Intersecciones con prioridades de paso	97
3.26	Asignación de rutas	99
3.27	Diagrama de rutas Septiembre de 2018	100
3.28	Zona de estacionamiento en el Jr. Bellido	104
3.29	Medidas para estacionamientos en cordón	104
3.30	Usos de estacionamiento	105
3.31	Ubicación de semáforos	107
3.32	Mapa de rutas de viaje	112
3.33	Trabajos de medición de tiempos de viaje	113

3.34	Siglas para las cuadras dentro de la red	114
3.35	Modelado en VISSIM	118
3.36	Densidad vehicular en la red durante la simulación	119
4.1	Comparación de las demoras del modelo y de registros de campo	126
4.2	Tramo de prueba para semáforos sincronizados	129
4.3	Propuesta de reapertura de vías peatonales	132
4.4	Presencia de vehículos menores en el Centro Histórico	135
4.5	Efecto del uso de carriles diferenciados	140
4.6	Separadores de tránsito en el Centro histórico	141
4.7	Composición vehicular en el sector central del Centro Histórico	150
4.8	Demoras en las intersecciones analizadas (s/veh.)	157
4.9	Zonas de congestión de acuerdo a la densidad de vehículos (veh./km) en la zona central del Centro Histórico	158
4.10	Zonas de congestión de acuerdo a la velocidad (km/h) en la zona central del Centro Histórico	159
4.11	Zonas de congestión de acuerdo a la demora en la zona central del Centro Histórico	160
4.12	Variación de las demoras promedio por intersección a distintas densidades vehiculares	162
4.13	Variación del flujo vehicular en cada intersección a distintas densidades vehiculares	163
4.14	Efecto del incremento de densidad en los niveles de servicio de la red vial	164
4.15	Tramos donde se cerró el Jr. Sol	165
4.16	Cierre del Jr. Sol por trabajos de mantenimiento	166
4.17	Hitos y conos viales en el sector central del Centro Histórico	167

4.18	Supuesto de cierre del Parque Central	168
4.19	Visualización de la simulación del modelo	169
5.1	Resumen de la evaluación de intersecciones	172
5.2	Efecto del incremento de densidad en los niveles de servicio de la red vial	173

Lista de tablas

2.1	Mesosimuladores de redes de transporte	10
2.2	Niveles de servicio para intersecciones con control semafórico	16
2.3	Niveles de servicio en intersecciones sin semáforos	20
2.4	Número mínimo de repeticiones	45
3.1	Desviaciones estándar promedio	48
3.2	Constantes correspondientes al nivel de confianza	49
3.3	Operacionalización de variables	50
3.4	Flujos horarios obtenidos del aforamiento	52
3.5	Tipos de vehículos.	75
3.6	Caracterización de intersecciones de la Zona Central del Centro Histórico de Ayacucho	76
3.7	Intersecciones representativas del centro histórico	77
3.8	Resultados de la medición de demoras en Jr. Sol - Jr. San Martín	78
3.9	Volúmenes y condiciones de tráfico	78
3.10	Ajustes de volumen	79
3.11	Tasa de flujo de saturación	80
3.12	Análisis de capacidad	81
3.13	Análisis de la demora uniforme y por cola inicial	82
3.14	Análisis del nivel de servicio	82
3.15	Resultados de la medición de demoras en Jr. Garcilaso de la Vega - Jr. Lima	83
3.16	Análisis del nivel de servicio según el HCM	84

3.17 Resultados de la medición de demoras en Jr. 9 de Diciembre. - Av. M. Cáceres	85
3.18 Análisis del nivel de servicio según el HCM	85
3.19 Resultados de medición de demoras en Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	86
3.20 Ajuste de volúmenes y asignación de carriles	87
3.21 Determinación del intervalo de ajuste de saturación	88
3.22 Determinación de los intervalos de salida	88
3.23 Determinación del Nivel de Servicio	89
3.24 Resultados de medición de demoras en Jr. G. de la Vega - Jr. Bellido	89
3.25 Determinación del Nivel de Servicio	90
3.26 Resumen de demoras con distintas metodologías	92
3.27 Flujos máximos y promedios en los afluentes de la red del sector central del Centro Histórico durante la hora pico	95
3.28 Composición de flujo vehicular de afluentes a la red del Centro Histórico en la hora pico	95
3.29 Prioridades de paso	98
3.30 Distribución de volúmenes registrados en el 2018 y 2019	101
3.31 Distribución de volúmenes registrados en el 2018 y 2019	102
3.32 Lugares declarados como zonas de parqueo	103
3.33 Usos de espacios de estacionamiento - hora pico de la mañana	106
3.34 Duración de semáforos en la Zona Central	108
3.35 Semáforos con periodo de 75 s	108
3.36 Velocidades en km/h de vehículos dentro de la Zona Central	110
3.37 Características de los corredores	111
3.38 Registro de velocidades promedio	112
3.39 Registro de velocidades promedio en rutas largas	113

3.40	Densidades durante la hora pico en cuadras del Centro Histórico	116
3.41	Densidades durante la hora pico en cuadras del Centro Histórico	117
3.42	Calibración de volúmenes vehiculares	122
3.43	Calibración de volúmenes vehiculares	123
3.44	Resultados y rango de error de demoras en intersección	124
4.1	Comparación de demoras reales y del modelamiento	126
4.2	Prueba de normalidad Shapiro-Wilk del modelo y el registro de campo	128
4.3	Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo y el registro de campo	128
4.4	Propuesta de tiempos para tiempos de ciclo de semáforos	130
4.5	Demoras promedio por intersección del sistema actual y la propuesta de apertura de vías peatonales	133
4.6	Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta	134
4.7	Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta	134
4.8	Demoras promedio por intersección del sistema actual y las propuestas de restricción de vehículos menores	136
4.9	Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta (caso 1)	137
4.10	Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta (caso 1)	137
4.11	Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta (caso 2)	138
4.12	Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta (caso 2)	139

4.13 Demoras promedio por intersección del sistema actual y la propuesta con carriles diferenciados	142
4.14 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta	143
4.15 Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta	143
4.16 Demoras promedio en segundos por intersección del sistema actual y tráficos proyectados a los 5, 10 y 20 años	145
4.17 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov entre demoras proyectadas a 5, 10 y 20 años	146
4.18 Rangos de la Prueba de Friedman	146
4.19 Prueba de Friedman entre demoras proyectadas a 5, 10 y 20 años	146
4.20 Máximas longitudes de cola en algunas intersecciones (metros)	148
4.21 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov de los datos registrados y generados	149
4.22 Prueba de Wilcoxon entre los datos registrados y generados	149
4.23 Densidad vehicular durante la hora pico veh./km	150
4.24 Velocidades promedio	151
4.25 Niveles de servicio en intersecciones	152
4.26 Evaluación de intersecciones	153
4.27 Evaluación de intersecciones	154
4.28 Evaluación de intersecciones	155
4.29 Evaluación de intersecciones	156
4.30 Resumen de la evaluación de intersecciones	156
4.31 Comparación de longitudes de cola por efecto de la habilitación de hitos	167

Glosario

Capacidad	Es el máximo flujo posible en una flujo de transporte, bajo las condiciones extremas.
Centro Histórico	Núcleo urbano original de planeamiento y construcción de un área urbana, generalmente el de mayor atracción social, económica, política y cultural, que se caracteriza por contener los bienes vinculados con la historia de una determinada ciudad.
Cola	Párametro que mide la longitud de vehículos detenidos durante la congestión.
Densidad	Número de vehículos que ocupa cierta longitud dada de una carretera o carril y generalmente se expresa como vehículos por kilómetro (veh./km).
Distancia de seguridad	Distancia entre vehículos a velocidad del vehículo líder.
Hora pico	Denominación que se le da al periodo de tiempo, no necesariamente una hora, en el que regularmente se producen congestiones.
Macromodelo	Modelo para nivel nacional, regional y distrital.
Mesomodelo	Simulación dinámica del transporte a nivel de avenidas o grupos de avenidas.
Micromodelo	Simulación dinámica detallada a nivel de intersección y grupo de intersecciones.
Nivel de Servicio	Es una medida cualitativa de la operación de una facilidad de transporte.
Número semilla	Número aleatorio generado.
Parque vehicular	Cantidad de vehículos que circulan en una determinada área.
Parqueo	Lugar destinado al estacionamiento
Tiempo de reacción	Tiempo entre que un vehículo desacelera y alcanza la distancia de seguridad entre vehículos.
Vehículo líder	Vehículo que va a velocidad deseada.
Vehículo seguidor	Vehículo que limita su movimiento por influencia del vehículo líder.
Velocidad deseada	Velocidad libre de un vehículo y que no tiene influencia externa.
Velocidad promedio	Es la velocidad obtenida de la razón entre el recorrido del vehículo considerando todo obstáculo y el tiempo que toma hacerlo.
Warm Up	Tiempo de estabilidad.
Wiedemann 74	Modelo que se utiliza para tránsito urbano.

Acrónimos

%VP	Porcentaje total de los vehículos que se paran durante el muestreo.
2M	Jr. 2 de Mayo.
3M	Jr. 3 Máscaras.
9D	Jr. 9 de Diciembre.
Are.	Jr. Arequipa.
AC	Autómata Celular.
AT	Tipo de arribo.
BMW	Martin J. Beckmann, Charles Bartlett McGuire y Christopher B. Winsten, haciendo referencia a su modelo desarrollado.
CBD	Central Business District.
DMP	Demora media de los vehículos que se paran.
DMPT	Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente.
DTP	Demora total de tiempo que los vehículos permanecen parados.
FHMD	Factor horario de máxima demanda.
FV	Jr. Carlos F. Vivanco.
GEH	Indicador estadístico en honor a Geoffrey E. Havers.
HCM	Highway Capacity Manual.
IM	Intervalo del muestreo.
LOM	Ley Orgánica de Municipalidades.
LWR	Modelo fluido-dinámico de Michael James Lighthill, Gerald Beresford Whitham y Paul Richards.
MC	Av. Mariscal Cáceres.
MDT	Vissim Modeling Guidance.
MPH	Municipalidad Provincial de Huamanga.
Mun.	Portal Municipal.
MTC	Ministerio de transportes y Comunicaciones.
NS o NDS	Nivel de servicio.
RNE	Reglamento Nacional de Edificaciones.
SM	Jr. San Martín
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
VT	Volumen total aforado en el afluente durante el muestreo.
VTP	Volumen total de los vehículos que se paran en el afluente durante el muestreo.

Lista de símbolos

a_n	Aceleración máxima que el conductor del vehículo “n” está dispuesto a emprender
b_n	Desaceleración más crítica que el conductor del vehículo “n” desea emprender.
\hat{b}	Es la más crítica desaceleración del vehículo n-1 según lo estimado por el conductor de vehículo n.
c	Capacidad del grupo de carriles (veh./h).
c_i	Capacidad del grupo de carriles i (veh/h).
C	Longitud del ciclo del semáforo (s).
d	Demora por control por vehículo (s/veh.).
d_1	Demora por control uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh.).
d_2	Demora incremental que toma en cuenta los efectos de llegadas aleatorias y colas sobresaturadas, ajustada por la duración del periodo de análisis y el tipo de controlador; este componente de la demora asume que no hay cola inicial para el grupo de carriles al inicio del periodo de análisis (s/veh.).
d_3	Demora por cola inicial, la cual tiene en cuenta las demoras de todos los vehículos en el periodo de análisis debido a las colas iniciales al comienzo del periodo de análisis (s/veh.).
d_A	Demora para el acceso A (s/veh.).
d_i	Demora para el grupo de carriles i (en el acceso A) (s/veh.).
d_s	Demora saturada.
d_u	Demora no saturada (d_1 evaluado para el valor real de X).
E	Volumen generado en el modelo.
f_a	Factor de ajuste por tipo de área.
f_{bb}	Factor de ajuste por bloqueo de buses que paran cerca de la intersección.
f_g	Factor de ajuste por pendiente del acceso.
f_{HV}	Factor de ajuste por vehículos pesados.
f_{Lpb}	Factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros a la izquierda.
f_{Rpb}	Factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros a la derecha.
f_{LT}	Factor de ajuste por giros a la izquierda.
f_{LU}	Factor de ajuste por utilización de carriles.
f_p	Factor de ajuste por estacionamientos.
f_{PA}	Factor de ajuste suplementario por grupos vehiculares que llegan durante el verde.
f_{RT}	Factor de ajuste por giros a la derecha.
f_w	Factor de ajuste por ancho de carriles.
g_i	Tiempo de verde efectivo para el grupo de carriles i (s).
GEH	Indicador estadístico de comparación de dos volúmenes de tránsito.
h	Hora.

h_{adj}	Intervalo de ajuste (s).
h_d	Intervalo de partida.
$h_{HV,adj}$	Intervalo de ajuste de vehículos pesados (s).
$h_{LT,adj}$	Intervalo de ajuste de giro a la izquierda (s).
$h_{RT,adj}$	Intervalo de ajuste de giro a la derecha (s).
I	Factor de ajuste por ingresos a la intersección corriente arriba.
k	Factor de demora incremental que es dependiente del ajuste de los controladores.
km	Kilómetro.
L	Tiempo perdido total por ciclo, calculado como tiempo perdido t_L , para la trayectoria crítica de los movimientos (s).
m	Metro.
N	Norte. Número de carriles del grupo de carriles.
P	Proporción de todos los vehículos que llegan durante la fase verde.
P_{HV}	Proporción de vehículos pesados.
P_{LT}	Proporción de vehículos con giro a la izquierda.
P_{RT}	Proporción de vehículos con giro a la derecha.
PF	Factor de ajuste de demora uniforme por coordinación, el cual tiene en cuenta los efectos de la coordinación de semáforos.
Q_b	Cola inicial al inicio del periodo T (<i>veh.</i>).
R_p	Relación de pelotón.
s	Unidad de segundo. Tasa de flujo de saturación del grupo de carriles (<i>veh./h - verde</i>).
s_0	Tasa de flujo de saturación ideal por carril (<i>veh./h/carril</i>).
s_i	Tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles i (<i>veh./h</i>).
S_{n-1}	Es el tamaño efectivo del vehículo $n - 1$. Esto incluye la longitud física del vehículo $n - 1$ y un margen de seguridad, en el que el conductor del vehículo n no está dispuesto a entrometerse incluso en reposo.
t	Tiempo. Duración de la demanda insatisfecha (h).
t_s	Tiempo de servicio.
T	Duración del periodo de análisis (h).
u	Parámetro de demora.
$U_n(t)$	Velocidad del vehículo n en el tiempo t .
u_n	Velocidad deseada del vehículo n .
v	Tasa de flujo de flujo por carril (<i>veh/h</i>).
v_i	Tasa de flujo de demanda actual o proyectada para el grupo de carriles i (<i>veh./h</i>).
v_p	Tasa de flujo durante los 15 minutos pico (<i>veh/h</i>).
V	Volumen ó referencia al volumen horario.
<i>veh.</i>	Vehículos.
x	Grado de utilización.
X	Relación v/c para el grupo de carriles o grado de saturación.
X_c	Relación v/c crítica o grado de saturación crítico para la intersección.
X_i	Relación v/c o grado de saturación para el grupo de carriles.
$X_n(t)$	Ubicación de la parte delantera del vehículo n en el momento t .
τ	Tiempo de reacción.

1

Planeamiento del problema

Este capítulo es de introducción, aquí se establecen los intereses para realizar la investigación, a través del estudio y manejo de la problemática.

1.1 Descripción del problema

En la actualidad el problema de la congestión vehicular es una realidad con la que conviven muchas ciudades en el mundo, por ello han aparecido varias metodologías que tratan de resolver el problema, partiendo de modelos matemáticos, para mejorar los sistemas de regulación del tráfico en las ciudades.

El distrito de Ayacucho y su Centro Histórico, no son ajenos a los problemas de tráfico vehicular, allí debido a la falta de control del crecimiento de la ciudad, se ha formado una deficiente distribución de puntos recurrentes del ciudadano, hoy existe una alta demanda de concurrencia dirigida hacia el centro de la ciudad (coincidente al Centro Histórico), donde las vías se caracterizan por ser angostas y no abastecer toda la demanda vehicular en horas pico, imposibilitando llevar un adecuado sistema de regulación de tráfico vehicular, manifiesto en un tránsito saturado y de flujo lento.

El sistema de regulación de tráfico vehicular en el centro histórico no permite llevar un buen funcionamiento del tránsito vial integrado con las vías arteriales y secundarias a las que están conectadas sus calles. Este problema año tras año se va empeorando significativamente debido el continuo crecimiento del parque vehicular como del movimiento peatonal en la ciudad. Tras la búsqueda de soluciones, la ciudad ha experimentado un variedad de alternativas dirigidas a ordenar y administrar adecuadamente el tráfico vehicular, sin embargo, no se ha terminado de resolver la problemática, que requiere de

una descripción a través de modelos que se vienen desarrollando en los últimos años.

Países como Inglaterra, USA y Alemania, han estado desarrollando el campo del modelamiento vehicular a partir de la macrosimulación, microsimulación y recientemente la mesosimulación, como una alternativa para analizar el fenómeno vehicular en redes, experimentando con procedimientos determinísticos y estocásticos. Pero la aplicación de estos modelos aplicados al análisis de ciudades con centros históricos no tienen un antecedente desarrollado, salvo el estudio de Torres (2002), que evaluó el centro histórico de la Ciudad de México a través enfoque macroscópico.

A nivel nacional se ha desarrollado más el modelamiento a nivel microscópico, aplicado generalmente al análisis de tramos de vías, rotondas o intersecciones, donde los estudios son diversos y múltiples; en cuanto al análisis macroscópico, que analiza el tráfico a gran escala, también se hace presente en diversas investigaciones que han aparecido en años recientes; sin embargo el nivel mesoscópico de este tipo de análisis aún no se ha desarrollado.

Ante la problemática de la ciudad en el transporte, se planteó analizar el tráfico vehicular a partir de herramientas de simulación y análisis vehicular, dirigido al modelamiento del sistema de regulación del centro histórico de Ayacucho al que se le da un enfoque mesoscópico.

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Delimitación espacial

La zona de estudio se encuentra en las calles de la zona central del Centro Histórico de Ayacucho. La región de estudio tiene un área total de 0.48 km^2 está delimitada por el Norte entre 8545389 m S a 8544617 m S, y por el Este entre 583527.49 m E y 584292.47 m E, del huso 18 y zona L de la proyección UTM zona Sur Datum WGS84.

Altitudinalmente se encuentra comprendida entre los 2761 m s. n. m. El sustento para establecer esta delimitación se desarrolla en la sección 3.9.1 de esta investigación.

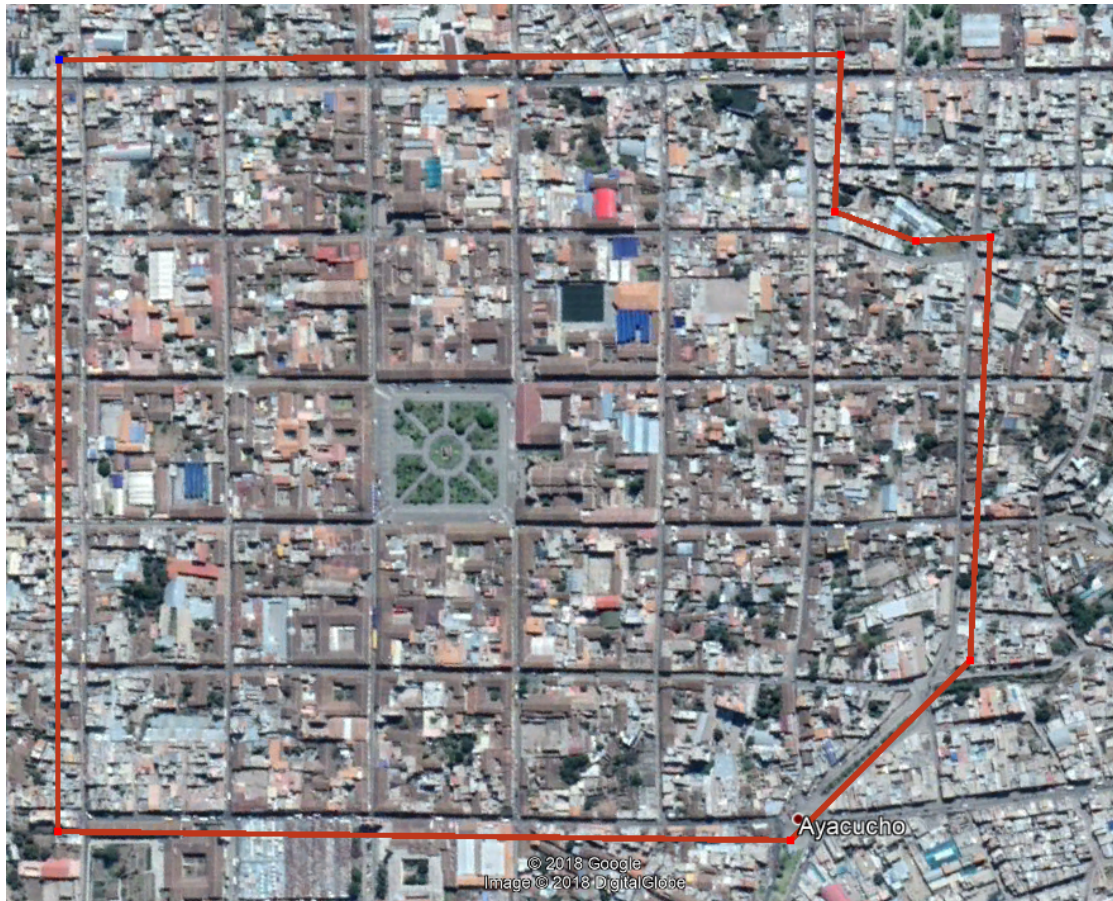


Figura 1.1: Vista satelital y delimitación de la Zona Central del Centro Histórico de Ayacucho

Fuente: Captura de Google Earth (2018)

1.2.2 Delimitación temporal

Esta investigación se realizó durante el año 2018 y 2019, desde enero de 2018 a marzo de 2019.

1.2.3 Temática y unidad de análisis

El propósito de la investigación es realizar una evaluación del comportamiento del flujo vehicular en el sistema de regulación de tráfico de la zona central del Centro Histórico, por tanto se establece al **flujo vehicular en las intersecciones del Centro**

histórico como unidad de análisis y se establece la siguiente temática de la investigación: “Evaluación y modelamiento del sistema de regulación de tráfico vehicular en el Centro Histórico del distrito de Ayacucho”.

1.3 Formulación del problema

A partir de la contextualización realizada se obtiene la problemática para embarcar la investigación.

1.3.1 Problema general

¿Cómo se establece un modelamiento para un sistema de regulación basado en simulación vehicular, para evaluar la congestión en base a las demoras producidas por el flujo vehicular?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Qué deficiencias del actual sistema de regulación de tráfico provocan congestión vehicular en el Centro Histórico de Ayacucho?
- ¿Cómo afecta el crecimiento del parque vehicular de la ciudad al sistema de regulación del Centro Histórico?
- ¿Cómo se puede predecir las congestiones vehiculares con mayor tamaño en una red vehicular?

1.4 Justificación e importancia

1.4.1 Conveniencia

La investigación busca evaluar el tráfico urbano en una red vial con alta concentración de flujo vehicular a partir de un modelo mesoscópico de simulación, con la cual se pretende caracterizar el sistema de tránsito actual, modo tal que se permita proponer alternativas que aseguren un desarrollo eficiente de servicio, se busca un modelo con el

que también pueda prever y predecir el impacto que produzcan los distintos eventos que alteren la regulación vehicular. El camino de este estudio parte por caracterizar la situación actual del tránsito vehicular en el centro histórico de Ayacucho, que se ha convertido en el centro de toda actividad dentro de la ciudad y con este motivo ocasionando un problema de tráfico vehicular que requiera de tratamiento.

Además basado en los resultados que se busca obtener, la investigación es viable en la evaluación de diversos tipos de control de tránsito en intersecciones, para el desarrollo de ciclos apropiados de semáforos, para determinar la disposición de dispositivos de control en intersecciones que lo requieran. Los resultados basados en demoras contribuyen en los cálculos de costos en evaluaciones económicas por mejoras viales. Además que permite el análisis de efectividad de mejoras en el tránsito con estudios del antes y después de su aplicación.

1.4.2 Relevancia social

La realización de un modelamiento del sistema de regulación de tráfico en su enfoque social se relaciona con el control de demoras por tiempos de viaje, ya que su estudio ayudará a identificar las insuficiencias del tránsito urbano actual en la zona central del Centro Histórico, siendo beneficiaria toda la ciudad de Ayacucho que transita por esta zona. Identificados los problemas será más fácil proponer sistemas que permitan reducir los tiempo de viaje, de esta manera a largo plazo se reducirán los costos económicos de operación vehicular, emisiones de vehículos, costo de vida social, etc.

1.4.3 Implicaciones prácticas

El problema práctico que se resolvería es el problema de la congestión vehicular que ocurre durante la hora pico, reflejado en el tratamiento de las demoras en las intersecciones y todo a lo que está relacionado este parámetro.

1.4.4 Valor teórico

Si bien el método mesoscópico ya existe, su estudio no está completamente profundizado, a tal punto que no hay un procedimiento práctico y definido para su realización, en esta investigación se realizará el procedimiento más adecuado para realizar un modelamiento a este nivel basado en procedimientos de la simulación microscópica y macroscópica. Por otro lado la aplicación del modelamiento vehicular en redes de centros históricos no se ha realizado, fin que también enfoca esta investigación.

La variable de las demoras serán estudiadas a niveles de red, para ver la interacción que cada nodo produce a otras, tras distintas corridas del modelamiento. Una vez armado el modelo completamente calibrado, servirá para exploraciones futuras relacionadas con la gestión de tráfico vehicular.

Los resultados darán a conocer las demoras en las intersecciones en el centro histórico, parámetro nunca antes explorado en la ciudad de Ayacucho.

1.4.5 Utilidad metodológica

La investigación utiliza el dron como un instrumento de recolección de datos para mejorar la técnica de observación, ratificando su uso para investigaciones de transporte.

El concepto que se desarrolla es la modelación mesoscópica aplicado a centros históricos, con la que se pretende mejorar la forma de evaluar el tránsito en redes de tamaño intermedio.

Por tanto la investigación es significativa porque va contribuir en la predicción del comportamiento del sistema de transporte donde se integre el cada componente de la red vial. Los resultados y las conclusiones servirán para proponer un mejor sistema de regulación de tráfico en la ciudad de Ayacucho y reducir los tiempos de viaje de los vehículos.

1.5 Limitaciones

La investigación no tiene limitaciones para su realización, la obtención de parámetros del comportamiento vehicular dentro del Centro Histórico de Ayacucho se basará grabaciones aéreas, con las que se cuantifica y cualifica el flujo vehicular durante la hora pico de análisis, donde la interacción con el movimiento peatonal, los estacionamientos y las paradas de buses serán obviado.

Los límites geográficos establecidos son suficientes para establecer un comportamiento general en la ciudad, porque aquí se representa una zona con flujo vehicular constante y que contiene características similares en los alrededores.

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo general

Estimar demoras de flujo vehicular con el modelamiento del tráfico en el centro histórico, para evaluar el sistema de regulación

1.6.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos para esta investigación son:

- Analizar las deficiencias del sistema de regulación del tráfico actual y proponer soluciones.
- Medir los efectos del crecimiento del flujo vehicular en el sistema de regulación de tráfico vehicular.
- Identificar y medir las dimensiones de la congestión presentes en intersecciones dentro de la red del Centro Histórico.

2

Estado del arte

El capítulo presenta las bases teóricas y los últimos conceptos desarrollados por diversas fuentes para proporcionar un trasfondo teórico del trabajo para esta investigación. La literatura desarrolla conceptos relacionados a la teoría de flujo vehicular y fundamentos para el modelamiento vehicular necesarios para evaluar redes de tráfico urbano.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Investigaciones internacionales

El desarrollo del estudio del tráfico vehicular tuvo sus raíces como una disciplina práctica, ya que recurría frecuentemente al sentido común para resolver los problemas de tráfico. Pero en la década de los 50s se desarrollaron varios aportes dirigidos al análisis de redes de tráfico, John Glen Wardrop instigó la evolución de la disciplina ahora conocida como teoría del flujo de tráfico, mediante la descripción de los flujos de tráfico a través del uso de ideas matemáticas y estadísticas en su comprensión (Wardrop y Whitehead, 1952).

Los progresos en la década de los 50s incluyeron el modelo de dinámica de fluidos de Michael James Lighthill, Gerald Beresford Whitham y Paul Richards (o el modelo LWR) a fin de describir los flujos de tráfico como un fluido sin ninguna interrupción (Linauer y Leih, 2003), dando las bases para los modelos de tráfico “macroscópico”; posteriormente serían Reuschel y Pipes quienes propusieran un modelo de tráfico que considere recién las interrupciones y así dar bases para los modelos microscópicos de flujo vehicular (Gazis, 2002).

En cuanto a la investigación enfocada en la evaluación de redes de tráfico vehicular, resaltan el Laboratorio de Investigación de Transporte (TRL), que en el Reino Unido desarrolló los primeros simuladores para emular el tráfico en intersecciones (Valladares, 2016).

En los 50s también se empieza a desarrollar el Manual de Capacidad de Carreteras por parte de la hoy Administración Federal de Carreteras (FHWA), un referente para el cálculo de niveles de servicio en vías (HCM, 2000).

Desde la década de 1960, el campo evolucionó con la aparición de las primeras computadoras, con las que los ingenieros desarrollaron más métodos orientados al control de tráfico, como medios para disminuir la congestión en túneles e intersecciones, por ejemplo, controlando los tiempos de señalización del tráfico de manera adaptativa. Aún hoy en día, el sector sigue siendo adoptado por la industria, dando como resultado la que se llama intelligent transportation systems (ITS), que cubre casi todos los campos de la comunidad del transporte inteligente (Maerivoet y De Moor, 2005).

En Estados Unidos la Administración Federal de Carreteras desarrolló en 1969, simuladores que desarrollaron la función flujo-demora, destinado a los primeros modelos de simulación macroscópico (FHWA, 2015).

A pesar del intenso auge durante las décadas de 1950 y 1960, el progreso aparentemente se detuvo, sin muchos resultados importantes en las próximas décadas hasta que ya a principios de la década de 1990, los investigadores encontraron un nuevo interés en el campo del modelado del flujo de tráfico, por un lado, los investigadores como Daganzo (1995) comenzaron a cuestionar y modificar el modelo LWR (Lighthill, Whitham and Richards), mientras por otro lado, uno de los principales aportes vino del mundo de la física estadística, donde los físicos intentaron modelar muchos sistemas de partículas, usando reglas de comportamiento simples y complejos, un ejemplo fue el

modelo de Kai Nagel y Michael Schreckenberg, que es un modelo de flujo de tránsito vehicular con un autómata celular (AC) probabilístico, ampliamente aceptada y tomada de base para modernos simuladores de tráfico (Nagel y Schreckenberg, 1992).

Los meso simuladores comenzaron a desarrollarse a fin de representar de manera más realista el comportamiento vehicular en una red, añadiendo situaciones como el semaforizado y otros eventos en el tráfico vehicular, en el mercado se han desarrollado varios mesosimuladores (ver tabla 2.1), la mayoría utiliza la metodología de asignación dinámica.

Cuadro 2.1: Mesosimuladores de redes de transporte

Simulador	Desarrollador	País
DYNAMIT	Instituto de Tecnología de Massachusetts	EEUU
DYNEMO	Conceptos Innovativos	EEUU
DYNASMART	Universidad de Austin Texas	EEUU
INTEGRATION	Universidad de Queens	Canadá
METROPOLIS		Suecia
TRANSMODELEDER	Corporación Caliper	EEUU
VISSIM	Universidad de Karlsruhe	Alemania

Fuente: Valladares (2016)

Sobre el modelado de tráfico en redes, son escasas las investigaciones que utilicen el modelado mesoscópico para el análisis de redes, y escasea más el campo dirigido a modelar zonas centrales de ciudades, sin embargo Torres (2002) realizó un modelo de análisis macroscópico para evaluar los problemas de congestión vehicular en el centro histórico de la ciudad de México con la herramienta del TransCAD, desarrollado con métodos de asignación dinámica (Londoño, 2005).

2.1.2 Investigaciones nacionales

Las investigaciones nacionales sobre el análisis de sistemas de regulación de tráfico vehicular se limitan a investigaciones de tipo macroscópico y microscópico, dirigidas

al análisis de intersecciones y evaluación de semáforos de las que podemos resaltar los siguientes estudios:

Cassani (2014) en su investigación, realizó un análisis macroscópico, con ayuda del software TransCAD, de los recorridos del transporte público en la ciudad de Ayacucho.

Alcalá (2016) realizó la microsimulación de varias calles en Lima, usando el software Vissim, realizando el análisis de intersecciones complejas.

Osores (2016), evaluó niveles de servicio en una avenida de la ciudad de Huanca-
yo con el software Synchro, tomando énfasis en la interacción de los semáforos en intersecciones.

Alvarez (2017) realizó la microsimulación intermodal con el software Vissim en la ciudad de Cusco, analizando intersecciones con mucho conflicto vehicular.

Avilez (2017) hizo un micro análisis con el software Vissim, a través de una simulación del comportamiento peatonal y vehicular en las Afueras del Hospital del Niño.

Lazo y Araujo (2017) introdujeron al microanálisis la simulación de mototaxis, analizando su comportamiento y calibrando de estos vehículos atípicos.

Llanos (2018) también utilizó la herramienta Synchro para evaluar los niveles de servicio en intersecciones semaforizadas, con microsimulación en el tramo de la Av. Hoyos en la ciudad de Cajamarca.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Tráfico vehicular en Centros Históricos

Los centros históricos son asentamientos humanos vivos, condicionados por una estructura física proveniente del pasado, con incuestionable valor cultural, económico y social, por tanto, su preservación es fundamental (UNESCO, 1977), su preservación prohíbe la destrucción de cualquiera de sus monumentos, éste es un reto que enfrentan

varias ciudades para adaptarse a los cambios modernos. Además, donde los centros históricos están conformados por calles estrechas, generalmente heredadas de un pasado colonial, se ha originado la problemática del excesivo número de vehículos circulando en ellas producto de la alta demanda que hay en este tipo de zonas y la poca oferta de sus calles para contener vehículos, generando eventualmente problemas de tráfico vehicular (Cordero, 2012, p. 80).

Hay una continua alza de demanda del transporte y tránsito vehicular, que va en aumento desde principios de los años 90, trayendo mayor congestión, demoras, accidentes y problemas ambientales, todo esto acarrea consigo pérdidas económicas y otros efectos negativos para la sociedad (Bull, 2003, p. 19). La congestión es, por lo tanto, un tema importante en la política de transporte, ya que se daña el medio ambiente y se generan pérdidas económicas debido al aumento año tras año de las emisiones y los tiempos de viaje excesivos en el tránsito de vehículos dentro de las ciudades (Bull y Thomson, 2002, p.111,112).

2.2.2 Modelo de transporte

El modelo de transporte es una representación simplificada de la una red de transporte en la realidad, es un conjunto de etapas y procesos realizados para arrojar como resultados los flujos en una red de transporte, con fines de explicar de manera práctica lo que ocurre en una red vehicular (Valladares, 2016).

Los recursos que utiliza el modelo de transporte, son la zonificación de la red, las vías que entran y salen de la zona, los modos de transportes, la información socioeconómica, la infraestructura vial, los aforos vehiculares y peatonales, etc. cada una es importante y requiere de tiempo para su adecuada caracterización para su introducción al modelo.

2.2.3 Congestión vehicular

La congestión es un problema íntimamente ligado a las demoras en la circulación vehicular, por tanto, la congestión es la condición que se genera si el ingreso de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de viaje de los otros vehículos (Bull y Thomson, 2002).

La congestión surge cuando los vehículos pierden la libertad de su desplazamiento, provocando la disminución de velocidad y el aumento de demoras a su flujo libre, esto es causado por la interferencia que tiene con otros vehículos, por tanto, a medida que se incrementa el volumen de vehículos en una vía se reducen las velocidades de los vehículos. En el gráfico que se ve en la figura 2.1 la función $t = f(q)$, establece el tiempo (t) necesario para transitar por una vía cuando hay una densidad (q), la otra ecuación $\frac{\delta(qt)}{\delta q} = t + qf'(q)$ deriva de la anterior, ambas explican que el incremento del volumen de tránsito ocasionan un mayor incremento en la demora para transitar una vía (Bull, 2003).

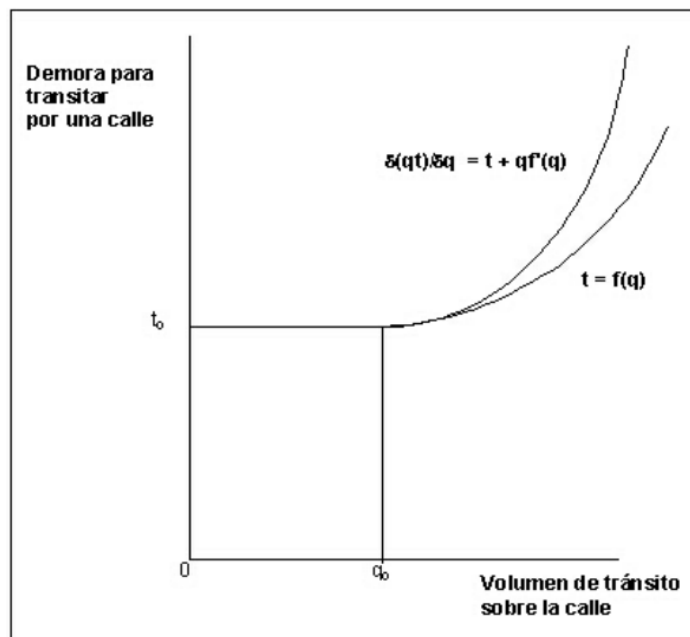


Figura 2.1: Esquema de la formación de la congestión de tráfico.

Fuente: Bull (2003)

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Evaluación de tráfico en una intersección

La manera de diagnosticar una red de tráfico vehicular se basa en lo general al estudio de las demoras que producen al vehículo en su tránsito, la demora que produce congestión vehicular se ocasiona por diversos factores entre los que están: la geometría de las vías, la velocidad, la aceleración, los estacionamientos, las paradas de buses, etc. La manera de diagnosticar las vías en centro urbanos es a través del nivel de servicio que presentan sus intersecciones, se han desarrollado diversas metodologías para evaluar los niveles de servicio en intersecciones, a continuación se presentan algunas metodologías (Ruiz y Tacure, 2015).

2.3.1.1 Método de tiempo de vehículo parado

Este método, que se encuentra en el Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994), se basa en la medición de la demora del vehículo cuando éste permanece parado, sin embargo las reducciones de velocidad no están controladas por este método. Su procedimiento es el siguiente:

- Contar el número de vehículos que se paran en un afluente de la intersección en intervalos sucesivos.
- Contar el volumen del afluente, incluyendo los vehículos que paran y los que no paran.

Los parámetros de demora de la intersección se obtienen usando las siguientes fórmulas:

1. Demora total de tiempo parado (*veh.-s*).

$$DTP = (VTP) (IM) \quad (2.1)$$

Donde,

DTP = Demora total de tiempo que los vehículos permanecen parados.

VTP = Volumen total de los vehículos que se paran en el afluyente durante el muestreo.

IM = Intervalo del muestreo.

2. Demora media de los vehículos que se paran (s).

$$DMP = \frac{DTP}{VTP} \quad (2.2)$$

Donde,

DMP = Demora media de los vehículos que se paran.

3. Demora media de parada para todos los vehículos en el afluyente (s).

$$DMPT = \frac{DTP}{VT} \quad (2.3)$$

Donde,

$DMPT$ = Demora media de parada para todos los vehículos en el afluyente.

VT = Volumen total aforado en el afluyente durante el muestreo.

4. Porcentaje de vehículos que paran (%)

$$\%VP = \left(\frac{VTP}{VT} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

donde,

$\%VP$ = Porcentaje total de los vehículos que se paran durante el muestreo.

2.3.1.2 Metodología del HCM para intersecciones semaforizadas

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000), desarrolló los procedimientos para el cálculo del nivel de servicio en los accesos de las intersecciones semaforizadas en base a la caracterización del tráfico y la geometría de la intersección.

Los niveles de servicio (NDS) se establecen en términos de la demora promedio por vehículo (*s/veh.*), para un periodo de análisis de 15 minutos, que debe corresponder a un momento pico durante la hora de máxima demanda vehicular. El HCM (2000) prescribe seis niveles de servicio, cada uno de éstos se describen y se muestran en la tabla 2.2.

Cuadro 2.2: Niveles de servicio para intersecciones con control semafórico

Nivel de Servicio	Características de operación	Demora total media (s/veh.)
A	Baja demora, coordinación extremadamente favorable y ciclos cortos, los vehículos no se detienen.	0 - 10
B	Ocurre con una buena coordinación y ciclos cortos, los vehículos empiezan a detenerse.	10 - 20
C	Ocurre con una coordinación regular y/o ciclos largos, los ciclos en forma individual empiezan a fallar.	20 - 35
D	Empieza a notarse la influencia de congestión ocasionada por un ciclo largo y/o una coordinación desfavorable o relaciones v/c altas, muchos vehículos se detienen.	35 - 55
E	Es el límite aceptable de la demora; indica una coordinación muy pobre, grandes ciclos y relaciones v/c mayores, las fallas en los ciclos son frecuentes.	55 - 80
F	El tiempo de demora es inaceptable para la mayoría de los conductores, ocurren cuando los valores de flujo exceden a la capacidad de la intersección o cuando las relaciones v/c son menores de 1.00 pero con una coordinación muy pobre y/o ciclos demasiado largos.	>80

Fuente: Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000)

La demora para un acceso representa la demora media de todos los vehículos en un periodo de análisis. La demora por control considera los movimientos a bajas velocidades y las detenciones de los vehículos que se mueven en cola o disminuyen su velocidad corriente arriba. La demora por control o demora del acceso viene dado por la ecuación 2.5.

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad (2.5)$$

Donde:

d : Demora por control por vehículo ($s/veh.$).

d_1 : Demora por control uniforme asumiendo llegadas uniformes ($s/veh.$).

PF : Factor de ajuste de demora uniforme por coordinación, el cual tiene en cuenta los efectos de la coordinación de semáforos.

d_2 : Demora incremental que toma en cuenta los efectos de llegadas aleatorias y colas sobresaturadas, ajustada por la duración del periodo de análisis y el tipo de controlador; este componente de la demora asume que no hay cola inicial para el grupo de carriles al inicio del periodo de análisis ($s/veh.$).

d_3 : Demora por cola inicial, la cual tiene en cuenta las demoras de todos los vehículos en el periodo de análisis debido a las colas iniciales al comienzo del periodo de análisis ($s/veh.$).

El procedimiento para estimar cada una de estas demoras basadas en el (HCM, 2000) se encuentran en el Anexo C-2.

Para estimar la demora de la intersección en base a las demoras de los accesos se utiliza la ecuación 2.6:

$$d_I = \frac{\sum (d_A \times v_A)}{\sum v_A} \quad (2.6)$$

Donde:

d_I : Demora para la intersección I (s/veh.).

d_A : Demora para el acceso A (s/veh.).

v_A : Flujo ajustado para el acceso A (veh./h).

2.3.1.3 Metodología del HCM para intersecciones no semaforizadas

El HCM (2000) analiza este tipo de intersecciones a la que se le da el tipo STOP en los cuatro posibles accesos, bajo el supuesto que cada vehículo se detenga en la intersección antes proceder. El hecho que el conductor deba detenerse en la intersección es una función de condiciones de tráfico dadas por los otros accesos, si no hay tráfico en los otros accesos el vehículo puede proceder automáticamente, si hay tráfico en uno o más de los otros accesos el conductor esperar hasta que ningún vehículo se encuentre en la intersección. Para el caso de estas intersecciones, se identifican cinco casos como se ve en la imagen 2.2.

La demora por vehículo en los accesos está compuesta por una serie de factores relacionados con el control, la geometría, el tráfico y los incidentes. La demora total representa la diferencia entre el tiempo de viaje realmente experimentado y el tiempo de viaje que resultaría durante las condiciones básicas, en ausencia de cualquier incidente, control, tráfico o retraso geométrico. La ecuación 2.7 se puede usar para calcular la demora (HCM, 2000).

$$d = t_s + 900T \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{h_d x}{450T}} \right] + 5 \quad (2.7)$$

d = Demora de control promedio (s/veh.)

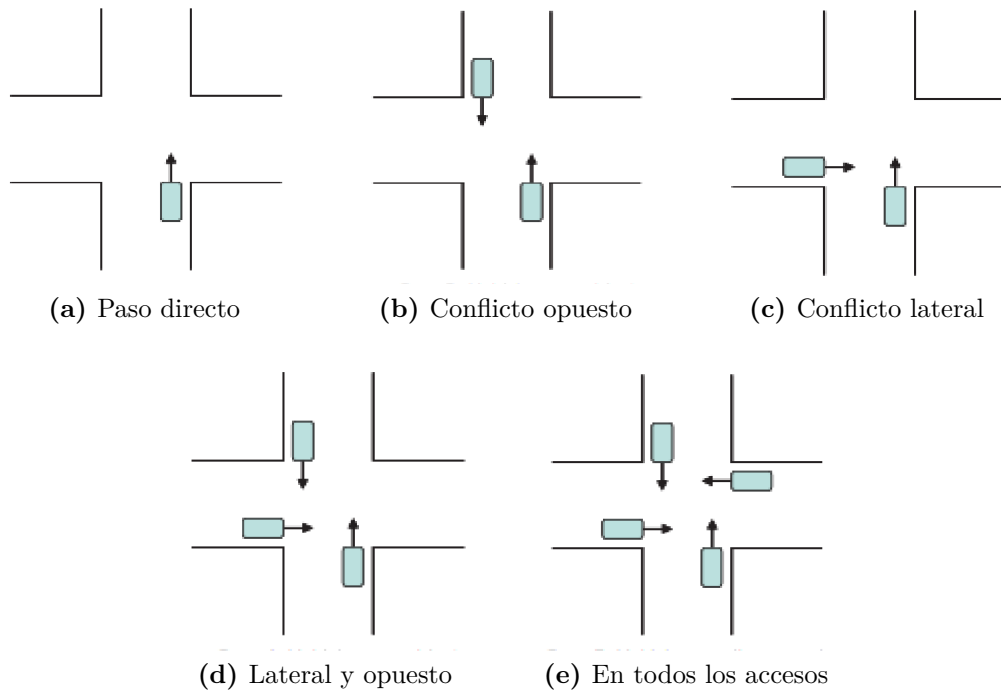


Figura 2.2: Casos de análisis en intersecciones no semaforizadas con STOP en los cuatro accesos

Fuente: Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000)

x = Grado de uso o utilización

t_s = Tiempo de servicio

h_d = Intervalo de salida (s)

T = Longitud de periodo de análisis (s)

El procedimiento para estimar cada parámetro de la ecuación 2.7, se encuentran en el Anexo C-2.

La demora de la intersección en base a las demoras de los accesos con la ecuación 2.6, similar a una intersección semaforizada.

La eficiencia expresada en el nivel de servicio de acuerdo a la demora promedio por control para intersecciones no semaforizadas se obtiene empleando la tabla 2.3, donde se pueden ver los rangos de demora para estimar los niveles de servicio. Siempre que la relación del volumen capacidad supera 1, el nivel de servicio es de tipo F.

Cuadro 2.3: Niveles de servicio en intersecciones sin semáforos

Nivel de servicio	Demora total media (s/veh.)
A	0 - 10
B	>10 - 15
C	>15 - 25
D	>25 - 35
E	>35 - 50
F	>50

Fuente: HCM (2000)

2.3.2 Modelos para evaluación de tráfico

Los modelos de evaluación de tráfico utilizan técnicas numéricas por computadora para crear una descripción de cómo se comporta el tráfico durante un período de tiempo en un sistema de transporte determinado. El modelo de simulación predice el rendimiento de la red, rastreando eventos a medida que se desarrolla el emulado del sistema (HCM, 2000).

Dentro de los modelos que pueden caracterizar el tráfico vehicular están los modelos determinísticos y estocásticos, de acuerdo a la aleatoriedad a la que se sujetan; además destacan los modelos microscópicos (alta fidelidad), mesoscópicos (fidelidad combinada) y macroscópicos (baja fidelidad), de acuerdo al nivel de detalle que presentan, ver la figura 2.3.

En la modelación del transporte se han desarrollado con éxito la simulación microscópica y macroscópica como un modelo de representación de redes de transporte. A nivel microscópico la tendencia se dirige en la representación individual de los vehículos y su interacción con otros, esta representación a ese nivel puede ser multimodal y el detallado se ha desarrollado para incluir la interacción con peatones, con el transporte público, transporte privado, ciclovías, etc. En el nivel macroscópico, la representación individual

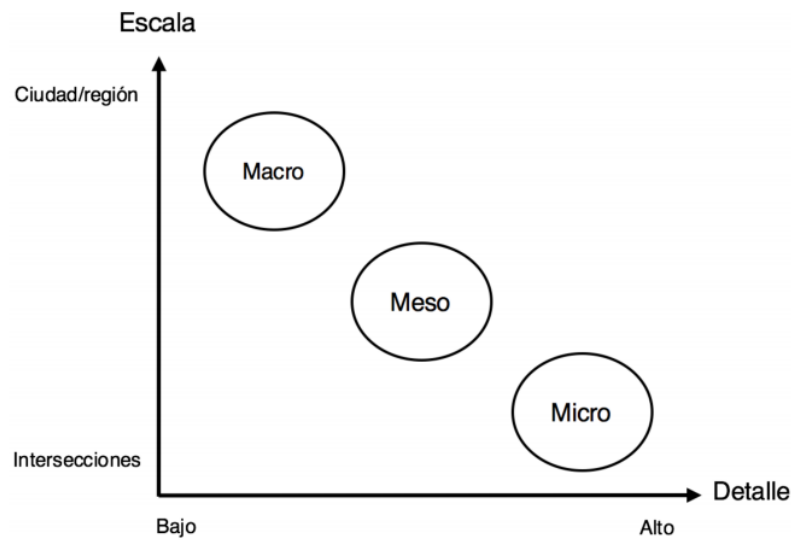


Figura 2.3: Modelos de acuerdo a escala

Fuente: Cristián y Rey (2016)

queda relegada, y realiza más un enfoque a nivel general abarcando a todos vehículos, utilizando variables como el flujo, la velocidad y la densidad, este nivel de modelamiento se utiliza para encontrar las mejores rutas en una red a partir de un origen y destino. En cuanto al nivel mesoscópico se puede decir que no tiene una metodología clara en su realización, pues comprende el nivel intermedio de los dos modelos.

2.3.2.1 Modelos determinísticos y estocásticos

Un modelo determinístico no está sujeto a aleatoriedad, cada aplicación del modelo producirá el mismo resultado representado en el sistema (HCM, 2000), el modelo se basa en el estudio analítico que se rige bajo ecuaciones matemáticas y se puede predecir los resultados antes de realizar la ejecución del modelo (Starfield, 2005).

Mientras si existe aleatoriedad y algún atributo del modelo no se conoce con certeza, el modelo es estocástico. Las variables aleatorias se utilizarán en variables específicas o en acciones que deben tomarse durante la ejecución modelos de simulación. La manera en que se seleccionan estos números aleatorios para obtener valores de muestra del parámetro de interés (es decir, de su función de distribución acumulativa) se pueden



Figura 2.4: Comparación entre un modelo micro, meso y macro

Fuente: PTV Group

obtener de distinta manera, diferentes secuencias de números aleatorios producirán diferentes resultados del modelo (por ejemplo, en esta investigación se toman varios números de semilla, cada número de semilla arroja valores distintos para el parámetro de alimentación vehicular); por lo tanto, el resultado de un modelo de simulación basado en un modelo estocástico no se puede predecir con certeza antes de que comience el análisis (HCM, 2000).

2.3.2.2 Modelo macroscópico

El modelo macroscópico describe el comportamiento vehicular de un sistema representándolo en términos de flujo, densidad y velocidad, abarcando una red amplia o muy general, sus resultados son matemáticamente estables, pero menos precisos en comparación a los modelos microscópicos. Su aplicación va dirigida a la administración de amplios sistemas de redes viales, evaluando rutas e identificando concentración de flujos vehiculares (HCM, 2000).

El modelado de flujo de tráfico macroscópico se basa en la solución de la ecuación de

conservación aplicada al flujo de tráfico (Whitham, 1955). Los modelos macroscópicos tratan al sistema de tráfico como un fluido continuo (Whitham, 1974), este enfoque se dirige a el estudio del comportamiento de grupos de vehículos representados en la ecuación de continuidad 2.8.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V)}{\partial x} = v(x, t) \quad (2.8)$$

Donde $v(x, t)$ es la flujo de vehículos que entran y salen de una sección libre de longitud dx . La ecuación considera las posiciones y las velocidades de los automóviles que entran o dejan el tráfico en una red (Hammad, 1998).

Las ventajas de una simulación macroscópica son:

- Son útiles para estudiar el comportamiento del tráfico en de redes con condiciones de tráfico pesado.
- Debido al uso de las variables de tráfico como el flujo, la densidad y la velocidad media, los requisitos informáticos son mucho menores que con las variables microscópicas
- Da cabida a una simulación en tiempo real del flujo de tráfico en redes grandes.
- Además estos modelos son eficientes para proporcionar información sobre el consumo de combustible y elecciones de ruta.

Las desventajas de una simulación macroscópica son:

- No incorpora al modelo de forma explícita al conductor, el automóvil y la carretera.
- Arrojan resultados deficientes en el caso de que ocurran fenómenos microscópicos, por ejemplo, longitudes de colas, demoras y otros.

2.3.2.3 Modelo microscópico

Este modelo describe el proceso de un automóvil en seguimiento a otros, el modelo microscópico representa el comportamiento de cada vehículo en forma individual, por intervalos de tiempo pequeños, centrado en caracterizar y mostrar su realidad dentro de una vía. (Wood, 2012).

Son adecuados para estudios de simulación en los que el comportamiento estocástico puede representarse mediante el uso de técnicas probabilísticas, este modelo a su vez se basa en modelos de seguimiento, cambio de carril (Gipps, 1981), modelos de viaje, ruta y hora de salida (Gipps, 1986).

Los modelos microscópicos se caracterizan principalmente por:

- Una descripción precisa de la geometría de la red vial, incluidas las instalaciones de tráfico como semáforos, detectores de tráfico, etc.
- Un modelo muy detallado del comportamiento del tráfico, que reproduce la dinámica de cada automóvil, distinguiéndolo de entre los diferentes tipos de automóviles, con la posibilidad de tener en cuenta los aspectos de comportamiento de los conductores de vehículos.

La modelación microscópica se aproxima más a la realidad porque reproduce la congestión del sistema de tráfico con un alto nivel de detalle, abriendo a una amplia gama de escenarios de tráfico en los que se puede incluir explícitamente una descripción precisa del control del tráfico y los esquemas de gestión del tráfico (Hammad, 1998).

Las ventajas de una simulación microscópica son:

- En primer lugar, se pueden usar muchos parámetros para describir las características individuales del comportamiento del conductor y es fácil establecer cambios sutiles que pueden ser inducidos, por ejemplo para adaptar la educación del conductor.

- En segundo lugar, los resultados de la simulación son capaces de describir el movimiento de un automóvil individual que, a su vez, nos permite estudiar e interpretar ciertos aspectos de la dinámica del tráfico.

Entre las desventajas para este tipo de modelamiento tenemos:

- El modelo requiere de calibraciones necesarias para validar datos.
- El modelo es incapaz de optimizar un sistema con un gran número de grados de libertad por vehículos.

2.3.2.4 Modelo mesoscópico

Los modelos mesoscópicos están compuestos por características de los modelos microscópicos y los macroscópicos, por tanto, se encuentran en el intermedio de ambos modelos, y abarcan principalmente el comportamiento de los conductores en tiempo y espacio en un sistema de tráfico (Jiménez, 2011).

El modelo que representa este comportamiento es el modelo de distribución “Headway”, definido por el tiempo de seguimiento entre dos vehículos, el modelo continuo se ajusta al modelo cinemático de gases Prigogine (1961), asumiendo cambios dinámicos provocados por la aceleración y desaceleración de vehículos dentro de la red.

Entre los enfoques para representar la simulación mesoscópica tenemos:

- La modelación de vehículos individuales que se mueven en la red se realiza en base a las propiedades macroscópicas del flujo.
- La modelación de vehículos individuales tiene un carácter simplificado en su comportamiento.
- Los vehículos se representan como bloques moviéndose por la red (ver figura 2.5).

Este modelamiento algunas veces permite desarrollar una simulación tipo híbrida basada en las características de la simulación microscópica, desarrollada tras una caracterización general en la red de estudio, ver la figura 2.6.

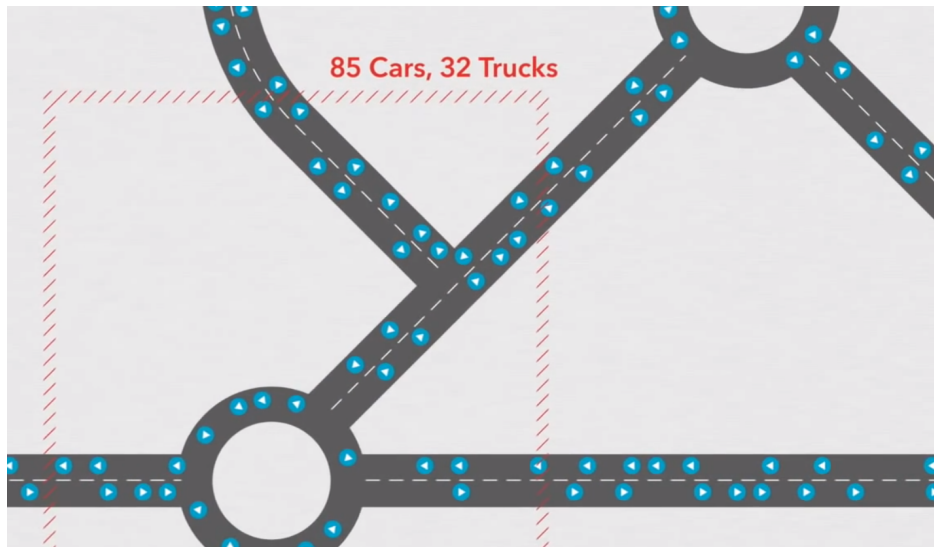


Figura 2.5: Simulación mesoscópica

Fuente: PTV Group



Figura 2.6: Simulación híbrida, Meso-Micro

Fuente: PTV Group

Las utilidades que se puede obtener de la simulación mesoscópica pueden ser:

- Evaluar el efecto de cierres temporales de calles.
- Evaluar el efecto del cambio de capacidades en las vías.
- Sirven para tomar medidas contra la congestión de tráfico.
- Permite sincronizar semáforos y ver su desarrollo en el sistema.

2.3.3 Modelación basada en una simulación mesoscópica

2.3.3.1 Modelación de una red de tráfico

La modelación de tráfico vehicular es un modelo matemático que describe el tráfico real de diversas áreas geográficas. El modelado de tráfico se basa en gran parte de fundamentos teóricos como la teoría de redes y teorías de la física como el modelo de onda cinemática aplicadas a redes de tráfico. El modelo de tráfico se encarga de medir el rendimiento de las unidades móviles (por ejemplo, vehículos) por intervalos de tiempo y la capacidad del medio de transporte (que permite un ancho de carril o carretera). Este modelo puede servir a la ingeniería de transporte para la búsqueda de flujos óptimos con un número mínimo de atascos de tráfico (Mahmud y Town, 2016).

2.3.3.2 Parámetros de estudio en simulación mesoscópica

Los parámetros de evaluación de un modelo mesoscópico miden la eficiencia de la red a partir de caracteres cualitativos y cuantitativos en las vías durante el periodo de tiempo analizado, el propósito de calcular los parámetros de efectividad es cuantificar y cualificar los movimientos dentro de la red de tráfico para evaluar su desempeño general y parcial (Dowling, 2007).

Según la Maryland Department of Transportation (MDT, 2016), un sistema compuesto por una red para una mesosimulación, contiene de los siguientes parámetros de evaluación:

- Retardos o demoras promedio en intersecciones
- Longitudes de cola en intersecciones
- Nivel de Servicio

Además otros parámetros para estudiar que se pueden añadir a un modelo mesoscópico son los tiempo de viaje, velocidades promedio, densidad vehicular entre otros.

2.3.3.2.1 Demoras

La demora es el parámetro que determina cuán eficiente es una intersección basado en el retardo de los vehículos que transitan por ella, una intersección con tiempos “menores” de demora significan un congestión nula o baja, mientras más crece las demoras, mayor es la congestión reflejada en más vehículos atascados. Las demoras generalmente se producen por la presencia de señales de control, la formación de colas e incremento de la densidad vehicular (Lazo y Araujo, 2017).

La demora se puede expresar como la diferencia del promedio de varias mediciones de tiempo durante el tránsito de varios vehículos en una intersección, con el tiempo que pasa un vehículo libre por la misma intersección sin ninguna interferencia. Las mediciones se hacen independientemente de las clases de vehículo, es decir que la medición se debe realizar considerando el conflicto que hay entre distintas clases de vehículos.

La demora total es promedio de todos los tiempos que hacen los vehículos que pasen por un nodo, descontando el tiempo ideal de paso de un vehículo libre y viene dada por la ecuación 2.9.

$$Demora_{real} = \tau_{real} - \tau_{ideal} \quad (2.9)$$

2.3.3.2.2 Colas

Las colas es el indicador de la eficiencia que mide la congestión vehicular en la vía, las colas aparecen cuando la demanda de ingreso excede la capacidad de la intersección y el flujo se detiene, haciendo que los vehículos que ingresen a la intersección se apilen sin continuar su paso. Para evitar longitudes amplias de cola en una vía, los periodos de espera por intersección deben ser adecuados y regulados (HCM, 2000).

Fernández (2011) establece que los criterios para evaluar las características de la cola son:

- Proceso de llegada, que detalla los intervalos de llegada t de cada vehículo, ya sean constantes o aleatorios.
- Mecanismo de atención, establece el número de colas presentes y la cantidad de tiempo que se demora un vehículo en salir de ella. La tasa de servicio o atención se expresa como μ .
- Disciplina en la cola, determina los patrones de selección para el paso del siguiente vehículo, pudiendo elegir al próximo vehículo por orden de llegada o atender primero al de mayor prioridad.

La figura 2.7 muestra los tipos de cola o sistemas de filas de espera que pueden formar los vehículos (Cal *et al.*, 1994) y la manera de atención en una intersección.

2.3.3.2.3 Niveles de servicio

A partir de las demoras que se formen por el paso de una intersección, se establecen niveles de servicio para calificar la calidad del flujo de paso a través de dicho nodo (HCM, 2000). El nivel de Servicio mide cualitativamente la condición de operación del flujo vehicular, a partir de la demora que tiene el vehículo al transitar por una vía. El nivel de servicio se analiza para el caso en que la intersección cuente o no con control de semáforo, los rangos de cada nivel se encuentran en las tablas 2.2 y 2.3.

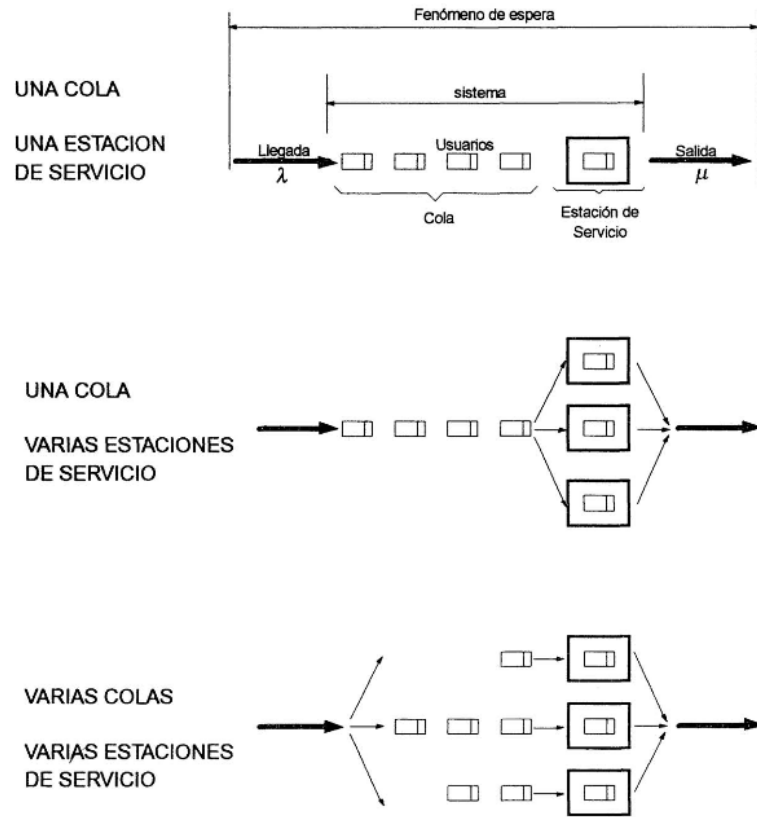


Figura 2.7: Tipos de colas o sistemas de espera

Fuente: Cal *et al.* (1994)

2.3.3.3 Simulación

“La simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.”

(Bú, 1996, p. 12)

La simulación permite reflejar la realidad un sistema real a analizar por medio de un modelo computarizado, donde es posible representar diversos eventos para el sistema. El procedimiento para una adecuada simulación según Bú (1996) comprende las siguientes etapas:

- Definir el sistema, es el estudio preliminar para determinar la interacción del sistema con otros, ver sus restricciones y definir que variables interactúan dentro del sistema.
- Formular el modelo, consiste definir el modelo con el que se obtendrán los resultados deseados, en esta etapa se establecen las variables del modelo.
- Recolección de datos, es necesario que estos se definan con claridad y exactitud, para producir resultados realistas y precisos.
- Implementar el modelo en la computadora, con el modelo definido, se procede a implementar el modelos al software de apoyo, escogido de acuerdo a los intereses y al tipo de modelamiento.
- Validación, es una etapa en que se calibran los resultados arrojados por el software, para validar el modelo con datos recolectado del sistema evaluado.

En esta investigación el modelo de simulación, trabaja con un modelo estocástico, definido por elementos aleatorios que interactúen entre sí de acuerdo a las restricciones establecidas en el trabajo. El procedimiento descrito se desarrolló en el siguiente capítulo.

Esta investigación se enfoca en el estudio del comportamiento de un red compleja, y su enfoque está basada en un modelo mesoscópico, por eso se especifican los conceptos, factores y demás datos necesarios para entender la naturaleza del funcionamiento del modelo a este nivel.

2.3.3.4 Fundamentos del modelo mesoscópico

Para establecer los fundamentos para el modelo mesoscópico, se utilizan algunos fundamentos que pertenecen a la modelación microscópica, porque el comportamiento vehicular se adecua de manera similar en ambos modelos, sin embargo el nivel de detalle es menor en caso del modelo mesoscópico, entre estos fundamentos se tiene:

- Aleatoriedad del modelo
- Warm up o tiempo de estabilidad
- Número semilla
- La calibración y validación

2.3.3.4.1 Aleatoriedad del modelo

La aleatoriedad o naturaleza estocástica se ha venido empleando en diversos campos como la ingeniería, economía, matemática, biología, etc. Esta se puede reflejar cuando el sistema adopta un comportamiento no determinístico. En el análisis vehicular el modelo determinístico es un modelo matemático en el que los valores de ingreso provocan los mismos valores de salidas, porque no tiene variación aleatoria, en contraste el modelo estocástico o no determinístico varía los valores salidas, significando una eventualidad o un resultado con incertidumbre, que tiene que enmarcarse en un rango aceptable para la validación del modelo (Lazo y Araujo, 2017).

Los modelos determinísticos son prácticos para modelos pequeños, en los que el efecto estocástico no es muy grande, pero cuando la incertidumbre aumenta se emplea por necesidad el modelo de tipo estocástico, el cual con una entrada logra generar diversas variables de estado, por tanto distintas salidas, a nivel mesoscópico este carácter de nivel aleatorio, se usa en la distribución de la alimentación del flujo vehicular.

El análisis vehicular con un modelo de tráfico estocástico, se basa en valores dirigidos al flujo vehicular obtenidos de distribuciones estadísticas (con el uso de números aleatorios). Los números aleatorios salen de un número “semilla” establecido por el diseñador, este valor puede modificarse, para producir una diferente secuencia de números aleatorios, generando distintos valores de resultados en una red tras el periodo de evaluación. (FHWA, 2004).

2.3.3.4.2 Tiempo de estabilidad

El tiempo de estabilidad se puede definir como el periodo que tarda el modelo hasta arrojar valores relativamente equilibrados, se considera que en un inicio los valores que arroja el modelo se alejan a la realidad o son incoherentes, pero tras un espacio de tiempo los valores arrojados se equilibran y son cercanos a una función constante, lineal o exponencial por lo general. Un modelo mesoscópico, dado su gran tamaño, no cuenta con vehículos dentro de su sistema, por eso es necesario aguardar un periodo de estabilización del sistema en el llenado de sus vehículos componentes, para recién analizar el modelamiento.

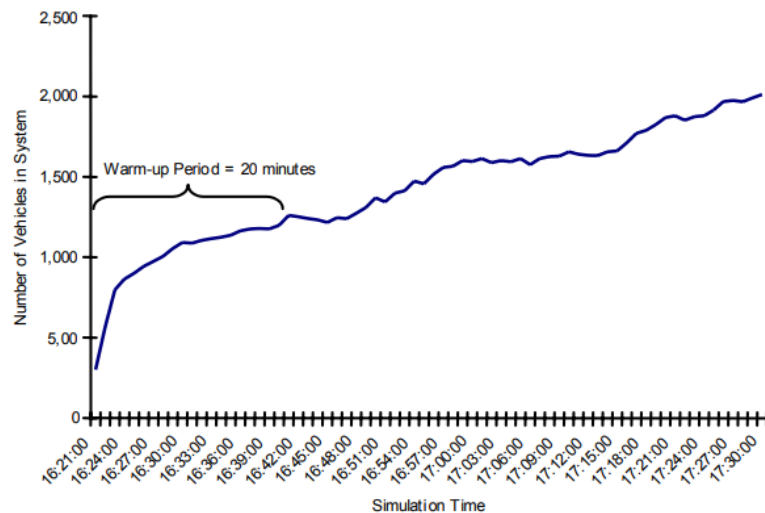


Figura 2.8: Periodo del Warm Up

Fuente: FHWA (2004)

La figura 2.8 muestra como ejemplo la gráfica del número de vehículos en el sistema vs. el tiempo de simulación, el periodo de estabilización del sistema se alcanza cuando el número de vehículos en el sistema alcanza un estado de variación estable o de equilibrio (FHWA, 2004), para este ejemplo el tiempo de estabilización se logra al alcanzar los 20 min.

2.3.3.4.3 Número semilla

El número de semilla es un número que genera un conjunto de valores aleatorios, con los que se representan a los vehículos dándoles una determinada característica, el resultado de esta asignación se refleja en la secuencia de ingreso a una vía, por ejemplo dentro de un intervalo de tiempo con un número de semilla pueden hacer ingreso distintas cantidades y tipos de vehículo a otro número de semilla (FHWA, 2004).

Sin embargo, estos números llamados aleatorios son en realidad de carácter pseudo-aleatorios ya que se obtienen empleando algoritmos determinísticos en un medio computarizado, para la obtención de estos números se utilizan diversos algoritmos generadores de estos valores (Lazo y Araujo, 2017).

2.3.4 Modelo de seguimiento vehicular

Los modelos de seguimiento vehicular (Car Following Model), son muy utilizados para definir el comportamiento vehicular durante la simulación microscópica e inclusive algunos modelos se pueden extender a la simulación meso. Estos modelos están basados en la interacción de un vehículo líder y el vehículo seguidor en movimiento por una vía.

La posición del vehículo se calcula cada vez que ocurre un cierto evento, para un nuevo evento la posición es igual a la posición que tenía el vehículo en el evento anterior más una distancia recorrida, esta distancia recorrida se obtiene para dos casos, una en el caso libre donde depende de su velocidad deseada, el segundo caso ocurre cuando existe la influencia de un vehículo líder con velocidad menor a la velocidad deseada del vehículo en seguimiento, habiendo entre estos una distancia de seguridad, que es la distancia en detención más la distancia que toma el proceso de reacción de regreso a la operación. A partir de este fenómeno se han estudiado distintos modelos de seguimiento vehicular, que se complican más con la consideración de parámetros como la aceleración.

2.3.5 Herramienta PTV Vissim

Vissim es un software de microsimulación de análisis multimodal, con la capacidad de simular el movimiento vehicular y peatonal a un buen nivel de detalles, basado en los modelos de seguimiento.

El software Vissim ha perfeccionado el modelo desarrollado del trabajo de doctorado de Wiedemann para la Universidad de Karlsruhe, Alemania (1974), cuya investigación se enfoca al comportamiento psico-físico en el modelo de seguimiento vehicular. Su desarrollo para el software tardó dos décadas más en consolidarse, hasta que en 1994 se comercializó con la empresa PTV AG (Barceló, 2010).

Vissim trabaja con distintos modelos de tráfico vehicular para consolidar el comportamiento vehicular en una red de tráfico, por lo general utiliza distintos modelos de seguimiento vehicular y cambio de carril.

2.3.5.1 Modelo de seguimiento de Wiedemann 74

El modelo propuesto por Wiedemann (1974) es un modelo psicofísico, que considera la percepción y reacción del conductor en las diferentes situaciones del tráfico vehicular (Lacerda y Castro-Neto, 2014).

La percepción y reacción del conductor se ven representadas por las influencias de sus movimientos, causadas por la forma de manejo, la máxima aceleración, etc. con la distancia entre vehículos y la diferencia de velocidades entre éstos en situaciones de interacción vehicular.

Este modelo establece cuatro posibles situaciones (áreas) que los conductores pueden atravesar dentro del tráfico (Fellendorf y Vortisch, 2010).

- La primera situación que se establece, consiste en el libre movimiento de un vehículo, sin estar influenciado por otro que viaje en su entorno (área de libre movimiento - libertad de conducción)

- La segunda situación indica que el conductor percibe a un vehículo con velocidad más baja que la suya, y el vehículo no se influencia por el vehículo de adelante (área de acercamiento)
- La tercera situación establece que el vehículo cae en un proceso inconsciente de seguimiento influenciado por el vehículo de menor velocidad (área de seguimiento)
- Por último el vehículo se pone en una fase de desaceleración donde el conductor tiene que frenar para contar con una distancia segura respecto al vehículo de adelante (área de desaceleración o frenado)

La unidad que analiza el modelo es el “vehículo conductor” que transita en una red, este vehículo se encuentra caracterizada en tres categorías:

1. Especificaciones técnicas del vehículo: tamaño, velocidad, aceleración, etc.
2. Comportamiento del conductor: psico-físicas (tolerancia y agresividad), memoria del conductor, maniobrabilidad.
3. Interdependencia del “vehículo conductor”: Esto se refiere a liderar o seguir a otro vehículo (PTV, 2013).

La figura 2.9 muestra las fases que pasa el vehículo en el tráfico, basado en el modelo de seguimiento de Wiedemann.

Los umbrales indicados en la gráfica son:

- AX, Distancia estática deseada cuando los vehículos se encuentran uno tras otro
- BX, Distancia dinámica, distancia de seguridad.
- CLDV, Percepción del umbral para reconocer diferencias de velocidades pequeñas en distancias cortas, decrecientes.
- SDV, Percepción del umbral de diferencias de velocidades en largas distancias.
- SDX Percepción del umbral a una distancia cada vez mayor en el proceso de seguimiento.

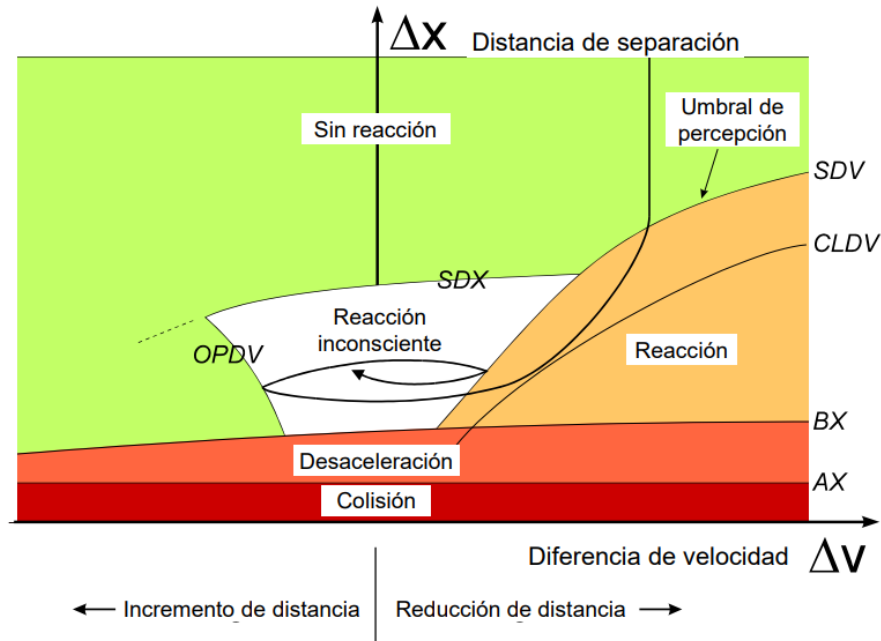


Figura 2.9: Fases del modelo de Wiedemann

Fuente: Vissim (2011)

- OPDV, Percepción del umbral para reconocer diferencias de velocidad pequeñas en distancias cortas pero crecientes.

El eje de las abscisas representa la diferencia de velocidades Δv y el eje de las ordenadas muestra la distancia entre vehículos. Por un lado la figura 2.9 muestra que cuando Δv positivo se reduce provoca que se reduzca la distancia entre vehículos.

La flecha en espiral es el comportamiento que adopta un vehículo para alcanzar a otro; los colores del diagrama son etapas de seguimiento del vehículo que provoca la percepción-reacción del conductor.

La zona verde es la zona de no-reacción, el vehículo va a velocidad de flujo libre, sin ningún obstáculo en su trayecto, cuando el vehículo percibe a otro vehículo con una velocidad menor, altera sus forma de conducir, en ese instante el primer vehículo (vehículo-seguidor) ingresa a la zona naranja clara, donde el vehículo disminuye su velocidad al mismo tiempo que se acerca al otro vehículo (vehículo-líder), a diferencia

de la zona verde el ritmo de acercamiento disminuye. El vehículo seguidor adopta en unos casos la velocidad del vehículo líder.

La zona blanca muestra el comportamiento del conductor, cuando deja de tener el control total de su velocidad, que se limita a la acción del vehículo líder, por ese motivo el conductor tiende a acelerar y desacelerar.

La zona rosada indica el seguimiento vehicular cuando la velocidad baja y la zona roja es una etapa crítica del vehículo, típica de conductores con conducta agresiva, donde el peligro de choque se hace presente (Vissim, 2011).

2.3.5.2 Modelo de seguimiento vehicular mesoscópico

La simulación mesoscópica utiliza un modelo de seguimiento simplificado basado en el modelo de Mahut (2001). Este modelo distingue solo entre dos estados: o bien el vehículo se mueve con la velocidad deseada o libre, siempre que no haya un vehículo más lento en la parte delantera, o el vehículo sigue a un vehículo más lento en la parte delantera y mantiene un avance entre parachoques y parachoques que corresponde al tiempo de reacción más el tiempo que se tarda en recorrer la distancia en detención (Ehlert *et al.*, 2017).

Este modelo de seguimiento se expresa mediante ecuación 2.10. El vehículo seguidor puede entrar en dos estados, la primera considera un movimiento libre que en un periodo diferencial de tiempo ε puede recorrer una distancia condicionada por su velocidad; el segundo estado se refiere a que el vehículo entra en cercanía al vehículo líder, es aquí cuando la posición del vehículo seguidor se condiciona a con la del vehículo líder, siendo su posición establecida por la separación de seguridad entre ambos más la distancia generada debido tiempo de reacción del vehículo líder ante cualquier evento y la nueva velocidad del vehículo seguidor (velocidad del vehículo líder), este comportamiento se expresa en la figura 2.10.

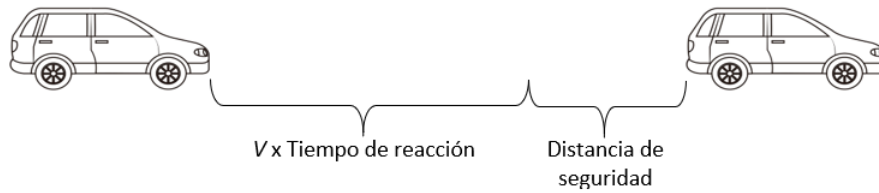


Figura 2.10: Seguimiento vehicular

Fuente: elaboración propia

$$x_{seguidor}(t) = \min \left(\underbrace{x_{seguidor}(t - \varepsilon) + \varepsilon V_{seguidor}}_{1: \text{ caso libre}}, \underbrace{x_{líder}(t - \tau_{seguidor}) - \lambda_{líder}}_{2: \text{ caso seguimiento}} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

$x_{seguidor}$: Posición del frente del vehículo en seguimiento.

$x_{líder}$: Posición del frente del vehículo de adelante.

V : Velocidad deseada del vehículo seguidor.

$\tau_{seguidor}$: Tiempo de reacción del vehículo en seguimiento.

$\lambda_{líder}$: Distancia total del vehículo al frente más la separación en detención (distancia de seguridad).

Es importante mencionar que este modelo simplificado no considera las aceleraciones ni el frenado de los vehículos, a diferencia del modelo a nivel microscópico.

2.3.5.3 Movimiento lateral

El movimiento lateral está conformado por tres casos: la selección del carril, el cambio de carril y el movimiento lateral continuo en un carril

2.3.5.3.1 Selección de carril

Es la etapa en que un conductor ingresa a un recorrido y tiene que escoger un carril con mejores condiciones que permita al vehículo llegar a su destino, se presentan tres

casos observables (Vissim, 2011):

- El conductor que ha ingresado a un carril cualquiera, decide si quiere o no permanecer en el carril.
- El conductor ve si en los carriles aledaños la situación es mejor que la de él.
- El conductor está en un carril congestionado, y evalúa el cambio de carril sin alterar a otros vehículos.

2.3.5.3.2 Cambio de carril

El cambio de carril o movimiento lateral cuenta con dos alternativas de decisión que tiene el conductor: El cambio de carril cuando es necesario y el cambio de carril libre.

- **Cambio de carril necesario:** Ocurre cuando el conductor necesita realizar un inevitable cambio de carril para hacerse paso a otra ruta, sin alterar el flujo en su carril actual, entonces cuando el conductor desee cambiar de carril, éste desacelerará lo máximo aceptable que le permita al vehículo realizar el cambio de carril (Suarez, 2007) como se ve en la imagen 2.11.

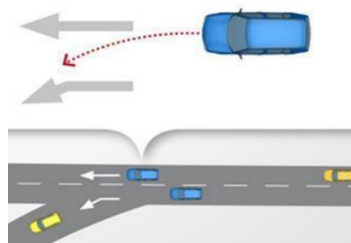


Figura 2.11: Cambio de carril necesario

Fuente: PTV Group

- **Cambio de carril libre:** Ocurre a los vehículos con altas velocidades cuando se encuentra a uno de menor velocidad, en esta etapa el vehículo seguidor mantiene durante un tiempo una distancia de seguridad, hasta que realiza el cambio de carril (Suarez, 2007), este proceso se ve en la figura 2.12.

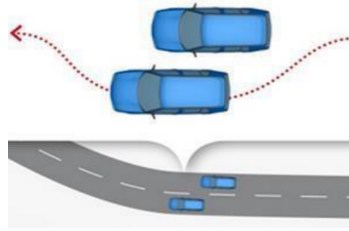


Figura 2.12: Cambio de carril libre

Fuente: PTV Group

2.3.5.3.3 Movimiento lateral continuo

En este proceso el conductor se mueve lateralmente, considerando su posición, velocidad, la longitud del vehículo y la de vehículos que le siguen, en este proceso la aceleración de vehículos con los que interactúa se considera para el modelo de seguimiento a fin de mantener distancias seguras entre éstos y evitar un estado de colisión (Barceló, 2010).

2.3.6 Calibración del modelamiento mesoscópico

Entre los métodos de calibración tenemos el indicador GEH, el error cuadrático RMSE (Root Mean Squared Error), el coeficiente de correlación R^2 . En esta investigación se usa el indicador GEH, que es el más usado para este tipo de modelos de simulación.

El uso de la estadística GEH evita algunos fallos que suelen ocurrir al utilizar porcentajes pequeños para comparar dos conjuntos de volúmenes, la razón se debe a que los volúmenes de tráfico en sistemas de transporte del mundo real tienen una amplia gama de variaciones. La estadística GEH reduce este problema de variación porque es no lineal. Se puede usar un umbral de aceptación basado solo en el estadístico GEH para una gama bastante amplia de volúmenes de tráfico. El uso de GEH como criterio de aceptación para la modelización de transporte de la demanda de viaje está aceptado en el Manual de Diseño de Carreteras y Puentes (DMRB), de la Agencia de Carreteras del Reino Unido (UKHA, 2005), las Directrices de Modelización de Microsimulación de

Wisconsin (WDT, 2013), las Directrices de Modelización de Tráfico para el Transporte de Londres (Smith y Blewitt, 2010).

El indicador GEH muestra la bondad de ajuste del modelo, relacionando la diferencia absoluta y la diferencia porcentual entre los volúmenes de tráfico observados y los modelados (Feldman, 2012), la ecuación 3.3 representa al indicador GEH.

$$GEH = \sqrt{\frac{(E - V)^2}{(E + V)/2}} \quad (2.11)$$

Donde:

GEH : Indicador estadístico.

E : Volumen del modelo.

V : Volumen medido en campo.

El criterio de aceptación se basa en considerar correctos los casos donde el valor del GEH sea menor de 5 ($GEH < 5$), y aun cuando la gama del valor de GEH esté entre 5.0 a 10.0 puede garantizarse como aceptable, además esto se puede adaptar a redes para que en el 85% de los volúmenes del sistema se tenga un GEH menor a 5 y el modelo se considere calibrado. Solo si GEH es mayor a 10.0 hay una alta probabilidad de que exista un problema con el modelo o esté mal calibrado (Smith y Blewitt, 2016).

2.3.7 Confabilidad de resultados del modelo

La facilidad de uso de modelos sofisticados de simulación estocástica representa una desventaja para usuarios no experimentados, por las variaciones en las salidas de los resultados, debido a la naturaleza estocástica en sus componentes.

Diferente a los modelos deterministas de análisis, el modelo de simulación se impulsa por muestras de variables aleatorias de distribuciones de probabilidad. Como producto de la aleatoriedad, en una simulación de semilla aleatoria, las estimaciones podrían

diferir mucho en cada corrida del modelo. En general la variación puede ser reducida mediante la aplicación de un largo periodo de simulación mediante el aumento de la cantidad de corridas.

Sacar una conclusión basada en una ejecución del modelamiento puede llevar a resultados imprecisos, por lo tanto, se requieren varias ejecuciones del modelo de simulación para extraer conclusiones correctas en los resultados. Es importante estimar la variación y el nivel de intervalo de confianza en los resultados para estimar el valor medio verdadero (promedio exacto) de cada resultado. La Administración Federal de Carreteras (FHWA) propuso una metodología para seleccionar el número apropiado de ejecuciones de simulación requeridas (FHWA, 2004).

Para calcular el número mínimo de ejecuciones del modelo (número de corridas), se necesita la siguiente información:

- Estimación de la desviación estándar de la muestra (FHWA, 2004).

El cálculo de la desviación estándar es necesario para estimar el número de ejecuciones. Sin embargo, se necesitan pocas corridas iniciales con diferentes semillas aleatorias para estimar la desviación estándar. Se recomiendan pocos números de carreras entre 10 y 20 repeticiones iniciales. La siguiente ecuación se utiliza para calcular una estimación inicial de la desviación estándar de la muestra.

$$S^2 = \sum \frac{(x - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (2.12)$$

Donde:

S = desviación estándar.

x = variable como el tiempo de viaje.

\bar{x} = valor promedio de la variable producida por las ejecuciones del modelo.

N = número de corridas.

- Selección del nivel de confianza deseado.

El nivel de confianza es la probabilidad de que la media verdadera se encuentre dentro del intervalo de confianza buscado (FHWA, 2004). Por ejemplo, un nivel de confianza del 90 por ciento o 0.90 significa que al menos el 90 por ciento de los resultados se encuentra dentro del intervalo de tiempo. Se recomienda elegir un nivel de confianza del 95 %, pero se puede seleccionar cualquier intervalo de confianza del 90 %, 99 % o 99,9 %. Los niveles más altos de confianza necesitan más cantidad de ejecuciones.

- Cálculo del intervalo de confianza deseado.

El intervalo de confianza (CI), comúnmente denominado índice de error o margen de error, es un intervalo dentro del cual se puede esperar que el valor medio verdadero se encuentre dentro del nivel de confianza. El rango de intervalo puede diferir según el propósito del estudio. Las mayores diferencias entre resultados requieren un intervalo de confianza mayor. En contraste, se requiere un intervalo de confianza menor para probar alternativas de resultados que son muy similares. La siguiente ecuación se utiliza para calcular el intervalo de confianza para la media real (FHWA, 2004):

$$CI = 2 \times t_{(1-\alpha/2), N-1} \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2.13)$$

Donde:

$t_{(1-\alpha/2), N-1}$ = estadística de t student.

α = nivel de confianza.

N = número de repeticiones.

S = desviación estándar de los resultados del modelo

- Rango deseado

El rango deseado se obtiene a partir del intervalo de confianza deseado (CI) dividido por la desviación estándar (S). Entonces, el número mínimo de repeticiones se puede obtener de la tabla 4.25.

Cuadro 2.4: Número mínimo de repeticiones

Rango deseado (CI/S)	Confianza deseada	Mínimo de repeticiones
0.5	99 %	130
0.5	95 %	83
0.5	90 %	64
1	99 %	36
1	95 %	23
1	90 %	18
1.5	99 %	18
1.5	95 %	12
1.5	90 %	9
2	99 %	12
2	95 %	8
2	90 %	6

Fuente: FHWA (2004)

3

Metodología de la investigación

A partir de los conocimientos presentados, este capítulo desarrolla el trabajo de investigación, partiendo por fundamentar la metodología de investigación. Luego se realiza el estudio del área trabajo, de donde posteriormente se recolectan las variables de estudio que permitan realizar la evaluación del tráfico. Después se realiza la calibración del modelo por medio de las corridas y los datos de campo.

3.1 Enfoque de la investigación

La investigación se realizó con un **enfoque cuantitativo**, porque se manejaron datos estadísticos de campo obtenidos a partir del flujo vehicular para probar hipótesis en base del modelamiento dentro del Centro Histórico de Ayacucho.

3.2 Alcance de la investigación

El alcance o tipo de investigación fue descriptivo, Se recurrió a la **investigación descriptiva** para analizar, caracterizar y evaluar el área de estudio y sus elementos. Esta investigación evaluó variables de estudio y la relación o diferencia que existía entre éstos, representados por los eventos provocados por los flujos vehiculares dentro el modelamiento y su comportamiento real.

3.3 Diseño de investigación

Para alcanzar los objetivos de estudio y contestar las interrogantes que se han planteado en esta investigación, adoptar como estrategia de desarrollo **diseño pre-experimental**, ya que no se asigna al azar el grupo de análisis, sino que se trabaja en

un grupo intacto y se compara el antes y después de la manipulación de las variables. El diseño consiste en tomar “la red de transporte vehicular” en donde “los elementos del sistema de regulación” serán estudiados para a partir del modelamiento obtener un “modelo del transporte en la red vehicular” que pueda emular al sistema de transporte dentro del Centro Histórico de la ciudad de Ayacucho. Del lado del análisis del sistema actual el diseño toma un enfoque transeccional descriptivo.

3.4 Población y muestra

Dentro del Centro Histórico se eligió el Sector Central (sector 1 en la figura 3.5), como la zona representativa para desarrollar el trabajo de investigación. Siendo el Centro Histórico la población o universo de trabajo y las intersecciones del Sector Central fueron elegidas como muestra no probabilista de juicio o según criterio (Tamayo, 2000, p.14).

A continuación se explican los criterios considerados para que el Sector Central sea considerado como el área de trabajo:

- En comparación a las demás zonas del Centro Histórico, la Zona Central tiene mayor área, manzanas mejor definidas y distribuidas en forma de damero y mayor longitud de calles transitables.
- El Sector Central contiene la mayor cantidad de tráfico vehicular entre sus calles, esto se puede verificar con una simple inspección visual, además que sus calles que la conforman están alrededor del parque central de la ciudad, dentro de esta zona además están contenidas gran parte de las principales instituciones de la ciudad: Catedral, Municipio, Bancos, Gobierno Regional, entre otros.
- La zona cumplió con los requisitos y fines de esta investigación y se ajusta adecuadamente para realizar un modelamiento del tráfico vehicular con la simulación

mesoscópica.

En cuanto al muestreo del flujo vehicular para cada uno de los 41 nodos, obtenidos mediante la cantidad de vehículos aforados por intersección, se determinó considerando un tamaño de muestra mínimo calculado de acuerdo a la fórmula 3.1 para estudios de flujo vehicular y tráfico vehicular (Robertson, 1994).

$$N = \left(\frac{SK}{E} \right)^2 \quad (3.1)$$

Donde:

N = tamaño mínimo de una muestra de vehículos.

S = desviación estándar de la velocidad estimada de la muestra (km/h).

K = constante que corresponden al nivel de confianza deseado.

E = error permitido en el estimado de la velocidad.

La desviación estándar se obtiene de la tabla 3.1.

Cuadro 3.1: Desviaciones estándar promedio

Áreas de tráfico	Tipo de carretera	m/h	km/h
Rural	2 carriles	5.3	8.5
Rural	4 carriles	4.2	6.8
Intermedio	2 carriles	5.3	8.5
Intermedio	4 carriles	5.3	8.5
Urbano	2 carriles	4.8	7.7
Urbano	4 carriles	4.9	7.9
Urbano	Valor promedio	5	8

Fuente: (Robertson, 1994)

La desviación estándar media varía entre 7.9 y 8.5 *km/h* y debido a que la variabilidad en las medidas de la dispersión de velocidad es limitada, se sugiere usar el valor de 8.0 *km/h* para cualquier tipo de carretera y área de tránsito (SEDESOL, 2000).

La constante K , se obtiene de acuerdo al nivel de confianza deseado, usando la tabla

3.2. Para esta investigación se tomó el valor de 2.00, valor que da un nivel de confianza del 95.5 %.

Cuadro 3.2: Constantes correspondientes al nivel de confianza

Constante K	Nivel de confianza (%)
1.00	68.3
1.50	86.6
1.64	90.0
1.96	95.0
2.00	95.5
2.50	98.8
2.58	99.0
3.00	99.7

Fuente: (Robertson, 1994)

El error permitido E es un indicativo para la precisión requerida en la estimación de la velocidad promedio. El error permitido generalmente puede fluctuar entre 1.6 a 8.0 km/h, pudiendo ser aún menor, se asume $E = 1,6$.

Luego para $S = 8$, $K = 2$ y $E = 1,6$ se obtuvo que el tamaño de muestra en cada intersección es de 100 vehículos, y en ningún caso el muestreo debe tener un número menor.

3.5 Hipótesis

3.5.1 Hipótesis general

La hipótesis que se plantea para esta investigación es:

Si se logra desarrollar un modelamiento realista de simulación para el sistema de regulación de tráfico en la red vial dentro del Centro Histórico de Ayacucho, se podrá estimar las demoras de los flujos vehiculares y así evaluar las condiciones de tráfico.

Analizar las deficiencias del sistema de regulación del tráfico actual y proponer soluciones.

3.5.2 Hipótesis específicas

- Tras el planteamiento de nuevos escenarios de tráfico, con comparativa del antes y después, se identificarán deficiencias del tráfico.
- El crecimiento del flujo vehicular incrementa la congestión vehicular en el Centro Histórico.
- Si el modelo predice los flujos actuales en cada intersección también puede estimar las dimensiones de la congestión dentro del sistema actual.

3.6 Operacionalización de variables

Las variables y los indicadores o dimensiones de la investigación se muestran en la tabla 3.3.

Cuadro 3.3: Operacionalización de variables

VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN	DIMENSIONES	SUB DIMENSIONES	UNIDAD	TIPO DE VAR.
1. Deficiencias del tráfico	Semaforización	Tiempo de viaje	s/veh.	Numérica Continua
	Habilitación de vías	Demoras	s/veh.	Numérica Continua
	Presencia de vehículos menores	Demoras	s/veh.	Numérica Continua
	Carriles diferenciados	Demoras	s/veh.	Numérica Continua
2. Crecimiento de flujo vehicular	Demora	-	s/veh.	Numérica Continua
3. Dimensión de congestión	Longitud de cola	-	m	Numérica Continua
VARIABLE DE INTERÉS	DIMENSIONES	SUB DIMENSIONES	UNIDAD	TIPO DE VAR.
Demoras de flujo vehicular	Tiempo de viaje	-	s/veh.	Numérica Continua

Fuente: Elaboración propia

Al tener un alcance descriptivo, la investigación tiene como variable de interés a las demoras de flujo vehicular, esta variable tiene como indicador las demoras por tiempo de viaje, lo valores que se obtienen están en unidades de segundos/vehículo (*s/veh.*),

por tanto el tipo de variable es continua.

Se toma como variables de caracterización: Primero a la deficiencia de tráfico, el cual posee como indicadores a la semaforización, la habilitación de vías, la presencia de vehículos menores y los carriles diferenciado, cada uno de estos tiene sub dimensiones que se expresan en demoras, siendo el tipo de variable para todos los casos numérica continua. Seguidamente se utiliza la variable del crecimiento del flujo vehicular, que tiene como indicador también a la demora, siendo de tipo numérico continua; por último se tiene la variable de la dimensión de congestión, su indicador es la longitud de cola, que mide el agrupamiento de vehículos desde la intersección de análisis, se mide con unidades de longitud (metros m), y el tipo de variable es numérico continuo.

3.7 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- La observación, fue la técnica para obtener los flujos vehiculares mediante el uso de las fichas para el aforamiento direccional en intersecciones basados en los formatos del HCM (2000). Las grabaciones con dron, por otro lado ayudaron para obtener datos más precisos de aforamiento y además sirvieron para obtener datos como el tiempo de viaje, velocidad, entre otros. También se requirió del cronómetro para registrar los ciclos semafóricos, y el flexómetro para medir los ancho de las vías.
- Documentación, esta metodología ayudó en la obtención de datos complementarios para la investigación como el uso mapas de zonificación del Centro Histórico de Ayacucho, guías el Reglamento para la Gestión y Administración del Centro Histórico de Ayacucho y el Plan Maestro de Revitalización Integral del Centro Histórico de Huamanga-Ayacucho 2011-2021. También se puede mencionar el uso de aforamientos previos de estudios de tráfico.

3.7.2 Confiabilidad y validez

Los aforos vehiculares fueron los datos más importantes que se utilizaron, siendo que para el mismo modelamiento se utilizó el flujo registrado en los afluentes de la red de estudio. Los datos se tomaron mediante fichas de aforo adaptadas de manuales de tránsito para el conteo de las grabaciones aéreas del tránsito, los datos que se recolectaron corresponden a 3 días de la semana con flujo similar en cada intersección.

La tabla 3.4 contiene los aforos de los afluentes de tres días. La confiabilidad de los registros se realizó con el procedimiento de medida de estabilidad o confiabilidad de Test de Retest, donde el coeficiente de correlación R de Pearson fue de 0.98 para los días 1 y 2, 0.99 para los días 1 y 3, y 0.97 para los días 2 y 3, a partir de estos coeficientes se dedujo que los métodos de aforamiento son consistentes con coeficientes de confiabilidad altos.

Cuadro 3.4: Flujos horarios obtenidos del aforamiento

Nº	Afluentes	Día 1	Día 2	Día 3
1	Jr Libertad	855	875	935
2	Jr Asamblea	758	739	756
3	Av. Mariscal Cáceres	797	759	809
4	Jr. Untiveros	541	373	569
5	Jr. Cusco	212	176	195
6	Jr. Caviedes	732	695	676
7	Jr. Pizarro	1953	1945	1996
8	Jr. San Martín	778	850	884
9	Jr. 2 de mayo	642	897	599
10	Jr. Grau	604	596	576
11	Jr. San Martín	252	228	250
12	Jr. Lima	403	395	372
13	Jr. Bellido	335	332	326
14	Av. Mariscal Cáceres	46	57	38

Fuente: Elaboración propia

Para ver la validez de los resultados, se recurrió a los datos de aforo recolectados en marzo de 2019, a casi más de medio año, obtenidos de las mismas intersecciones donde originalmente se hicieron los trabajos, los valores de los flujos se muestran en la tablas

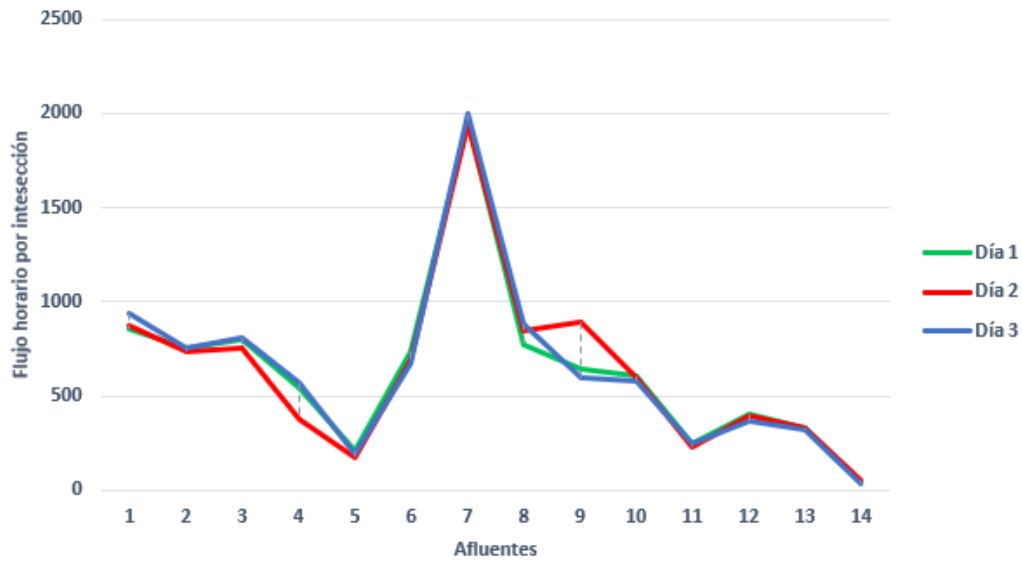


Figura 3.1: Flujos horarios de afluentes de la zona central del Centro Histórico

Fuente: Elaboración propia

3.30 y 3.31. La prueba para demostrar la validez por criterio a través de correlación se aplicó en todas las intersecciones donde no se haya alterado el tráfico. El coeficiente de correlación R de Pearson fue de 0.97, por tanto el método de recolección de datos fue válido.

3.8 Técnicas estadísticas

Entre las técnicas estadísticas para esta investigación se utilizó la expresión estadística GEH, para la comparación de volúmenes de tráfico vehicular entre datos reales y el modelo para garantiza la calibración adecuada y garantizar que el modelo es asequible a la realidad. En los modelos de tráfico, los valores que se compararon generalmente correspondieron a dos volúmenes de tráfico: real y modelado, en puntos determinados sistema, que se evalúan con la expresión estadística GEH (en honor a Geoffrey E. Havers), que determina la calibración del sistema sobre los volúmenes en cada intersección

Posteriormente se realizaron pruebas de hipótesis relacionando distintas variables, donde se comparan los resultados de las demoras del modelado y los reales obtenidos de

campo, tiempos de viaje entre dos modelos, demoras en diferentes densidades vehiculares y otras comparaciones, en cada una de éstas se probó la normalidad y la varianza. Para datos paramétricos se utilizó la prueba estadística de Test t-Student, mientras en las muestras no paramétricas se usó la prueba estadística de Wilcoxon, en todos los casos se trabajó con un nivel de significancia del 0.05, y un nivel de confianza del 95%.

3.9 Desarrollo del trabajo de tesis

3.9.1 Delimitación del espacio de trabajo

Se ha escogido al Sector Central del Centro Histórico de Ayacucho como área de estudio por las siguientes razones:

- La importancia de la zona. En la actualidad se puede considerar esta región, como el centro de actividades urbanas y socioeconómicas de la ciudad de Ayacucho.
- Ubicación de la zona, ha hecho de la zona central del Centro Histórico (no todo el Centro Histórico de la ciudad) el núcleo de la ciudad y punto obligatorio para transitar por su alta concentración administrativa y comercial; además para desplazarse entre los extremos Norte y Sur de la ciudad es necesario pasar por el centro histórico.
- Homogeneidad en su distribución urbanística, el área de trabajo es conveniente para evaluar el tráfico a nivel de redes, ya que presenta gran cantidad de calles con un considerable tráfico vehicular en una área delimitada y homogénea en base al tipo de vías que contiene.

3.9.1.1 Zona de estudio

La zona de estudio es el Centro Histórico de la ciudad de Ayacucho, centro urbano caracterizado por su devenir histórico, se localiza en el distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, la zona cuenta con calles estrechas y

ortogonales, que tienen relevancia histórica. En la figura 3.4 se puede ver su ubicación y delimitación.



Figura 3.2: Parque Central - Centro Histórico de Ayacucho

Fuente: Guía Travel Ayacucho

Actualmente el Centro Histórico, funciona como el centro administrativo para la ciudad de Ayacucho, aquí se cuenta con 10 áreas urbano monumentales y 287 monumentos declarados donde predomina la arquitectura del período republicano, pero en la traza urbana se mantiene con las mismas dimensiones desde la época colonial (MPH-AECID, 2011, p. 14 y 21).

El centro histórico posee el 15 % de la población de la ciudad (29,476 habitantes), 410 unidades de viviendas. El principal problema de sus habitantes está en la contaminación del aire ocasionado por el tráfico vehicular según un estudio de la Municipalidad (MPH-AECID, 2011, p. 34, 35 y 38).

3.9.1.2 Descripción de la zona

3.9.1.2.1 Formación histórica

La zona donde actualmente está el Centro Histórico, empezó a ser habitada en un principio por la confederación Chanca, hasta su conquista por los incas, con ello paso a ser territorio de mitimaes (grupos de familias separadas de sus comunidades por el imperio Inca y trasladadas de pueblos leales a conquistados) (Zapata *et al.*, 2008).

Tras la conquista española, el 25 de abril de 1540, se fundó por segunda vez la ciudad Guamanga a cargo del capitán Vasco de Guevara, sobre la zona de Pucaray, habitada en ese entonces por Guanyacóndores, eso se debió al traslado que sufrió la ciudad antes ubicada en lo que actualmente es Huamanguilla (Purizaga, 2005).

Es en esta etapa que se realizó el trazo y el diseño de la villa de Guamanga en forma de parrilla o damero, se hizo en réplica de los campamentos romanos, y sobre esa base se llevó la construcción de la ciudad, que inicialmente respondía a dos razones, la defensa de las tropas rebeldes de Manco Inca y la necesidad de una ciudad intermedia en la larga ruta entre Lima y Cuzco (Purizaga, 2005).

En la segunda mitad del siglo XVI con la explotación de las minas de Huancavelica, Huamanga fue convertida en el eje administrativo y nudo de todas las rutas comerciales, lo que favoreció su crecimiento urbano. Se construyeron 33 iglesias coloniales de estilo barroco y mestizo, y las casonas coloniales que dieron forma al Centro Histórico (Cárdenas, 1990).

Luego de la independencia, la ciudad se estancó hasta la segunda década del siglo XX, cuando inicia el proceso de modernización con la instalación del alumbrado eléctrico por 1913. Hacia 1924 se celebraba el centenario de la batalla de Ayacucho, para dicha ocasión el gobierno de turno ejecutó varias obras de mejoramiento urbano como la apertura de nuevas calles donde se encontraba la Avenida Leguía, actualmente la Av.

Mariscal Cáceres; también se realizó la ampliación de otras vías como el Jr. Asamblea y otros. (Best, 1974).

De esta etapa en adelante, la ciudad crecería aún más debido a la migración y a la re apertura de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga en 1959, formándose diversos barrios en los alrededores del centro histórico (González Carré *et al.*, 1995).

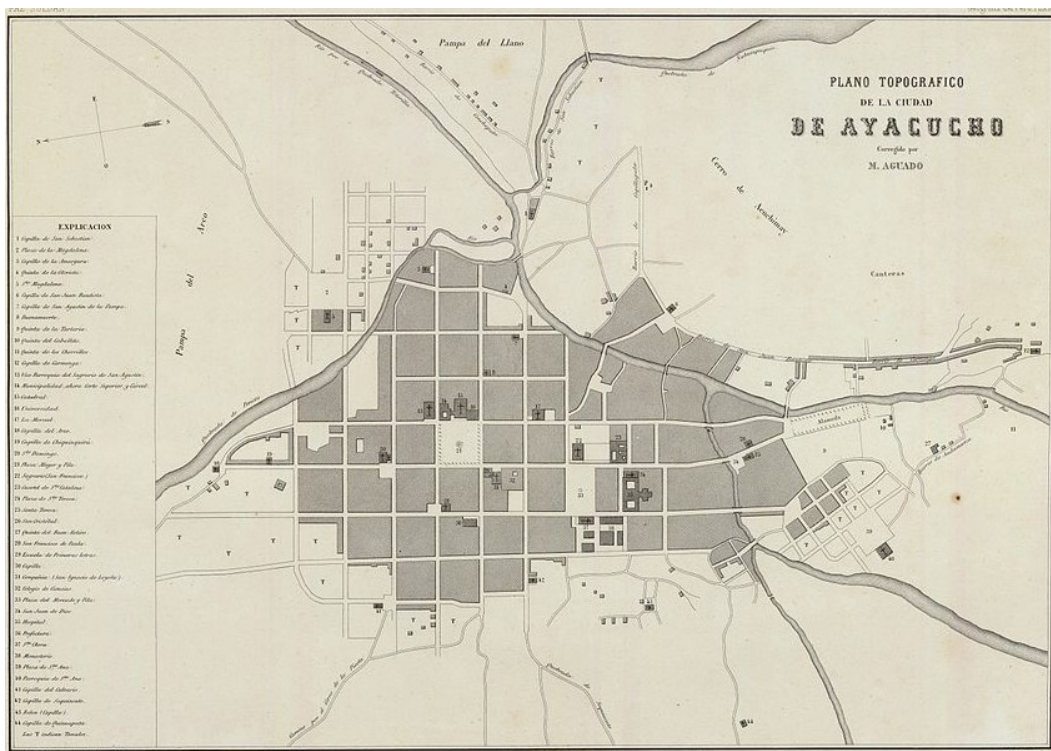


Figura 3.3: Plano topográfico, Ciudad de Ayacucho en 1865.

Fuente: Atlas Geografico del Perú (Paz, 1865, pl. XXXI)

3.9.1.2.2 Delimitación y sectorizado

La delimitación del Centro Histórico de Ayacucho está establecida por la Ordenanza Municipal N° 061-2004-MPH/A de fecha 27-10-2004 (MPH, 2008, p. 7), sus demarcación dentro de la ciudad se pueden ver en la figura 3.4, dentro del área delimitada, la regulación de tráfico es diferenciada, tanto que hay calles por donde el flujo vehicular es continuo mientras en otras zonas el tráfico es casi inexistente y es en estas zonas

donde un análisis sería innecesario, de aquí se establece al Centro Histórico como el universo de trabajo para esta investigación, de la cual se sacará una área de estudio representativa.

El Centro Histórico tiene 8 sectores, establecidos de acuerdo a sus características urbanísticas, estado y calidad de la estructuras que las conforman, tendencias predominantes en su desarrollo, usos, densidad, calidad y jerarquización de los ambientes e inmuebles de carácter histórico (MPH, 2008, p. 7), estos sectores quedaron delimitados como se ve en la figura 3.5. La sectorización se toma como referencia, para poder determinar el espacio de trabajo dentro del Centro Histórico, donde el modelamiento y evaluación de su sistema de regulación de tráfico sea coherente y representativo.

3.9.1.2.3 Delimitación del área de trabajo

La delimitación de la Zona Central se ve en la figura 3.6, esta zona fue seleccionada como zona de muestra para su estudio y modelamiento (ver la sección 3.4), en esta zona se tienen las siguientes calles y cuadras que formaran arte del estudio:

- Av. Mariscal Cáceres 9-10-11-12.
- Calle el Nazareno.
- Jr. 2 de Mayo 1-2.
- Jr. 28 de Julio 1-2.
- Jr. 9 de Diciembre 1-2.
- Jr. Arequipa 1-2-3.
- Jr. Asamblea 1-2.
- Jr. Bellido 2-3-4-5-6.
- Jr. Cusco 1-2-3.
- Jr. Garcilaso de la vega 1-2-3.
- Jr. Libertad 3-4-5-6-7.

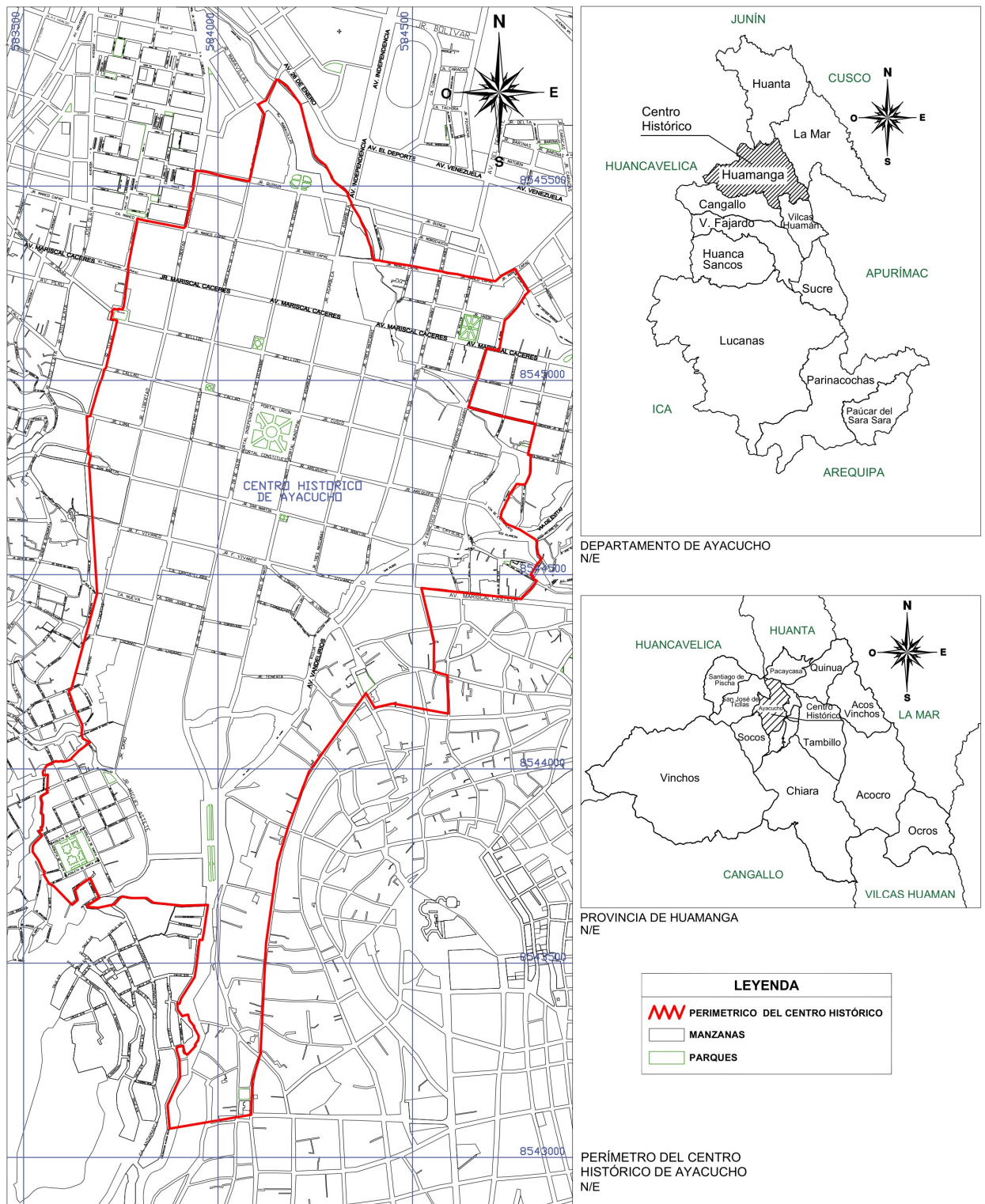


Figura 3.4: Ubicación del Centro Histórico de Ciudad de Ayacucho

Fuente: MPH (2008)

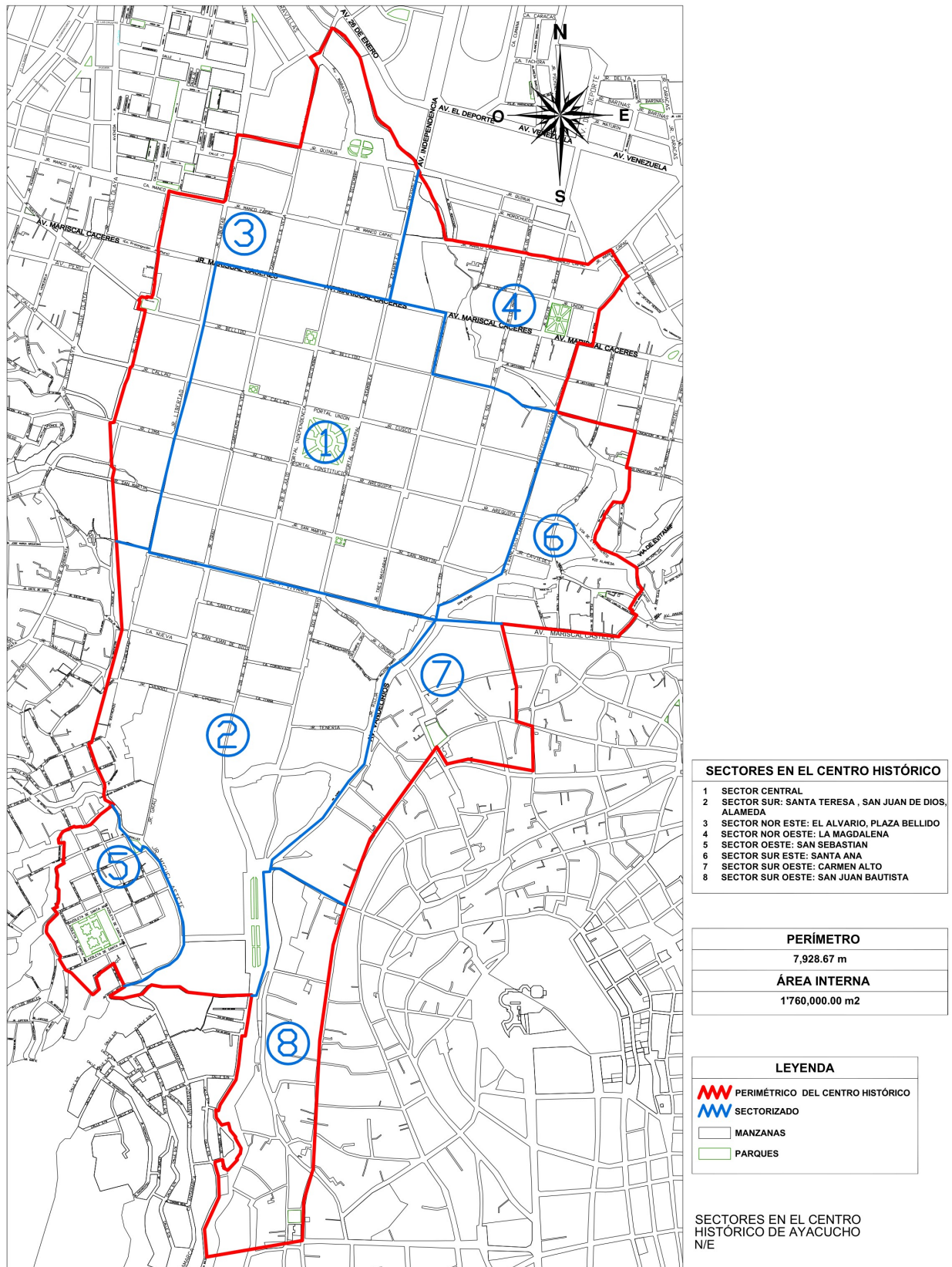


Figura 3.5: Sectorización del Centro Histórico de Ciudad de Ayacucho

Fuente: MPH (2008)

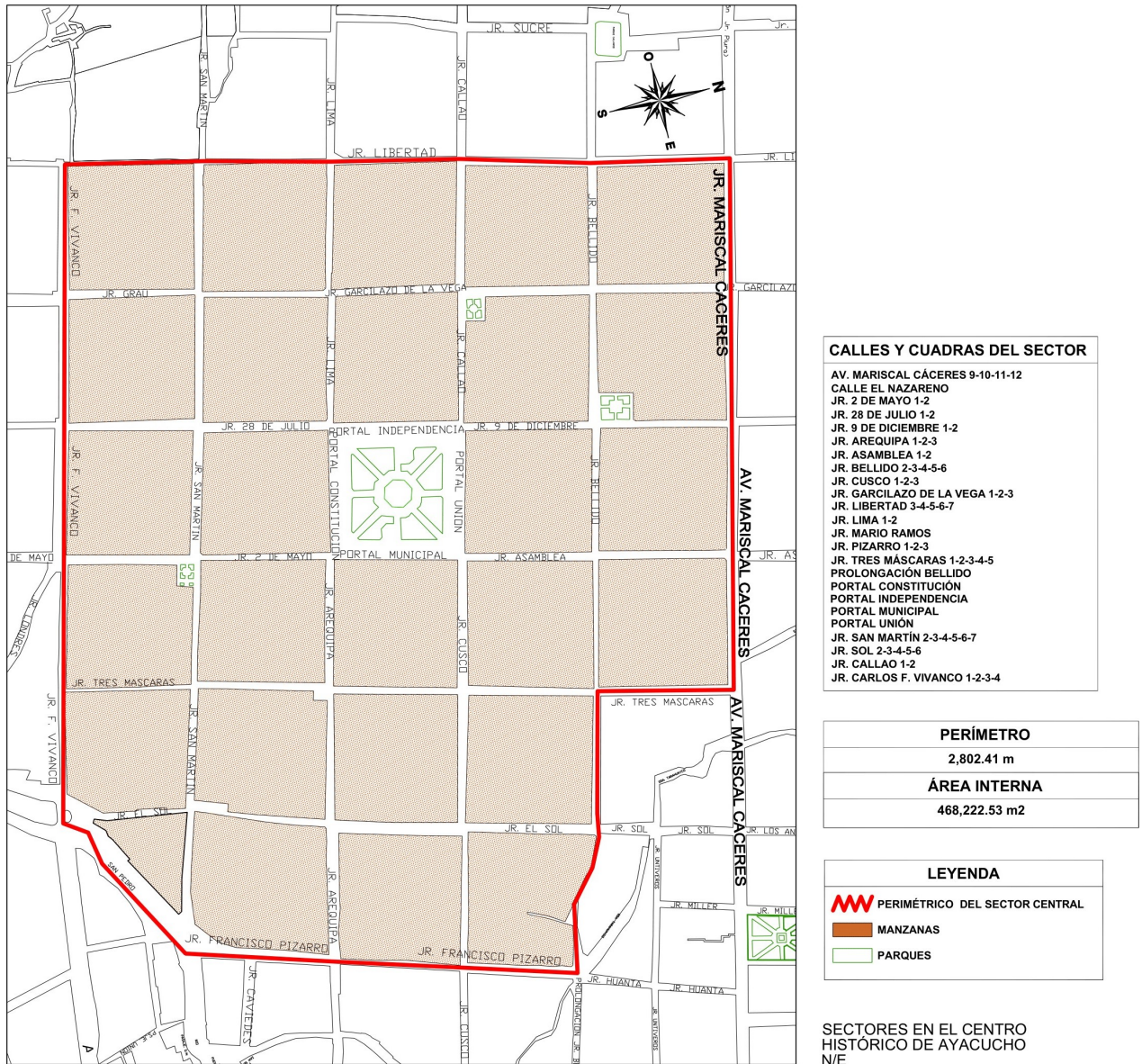


Figura 3.6: Sector Central del Centro Histórico de ciudad de Ayacucho

Fuente: MPH (2008)

- Jr. Lima 1-2.
- Jr. Pizarro 1-2-3.
- Jr. Tres máscaras 1-2-3-4-5.
- Prolongación Bellido.
- Portal Constitución.

- Portal Independencia.
- Portal Municipal.
- Portal Unión.
- Jr. San Martín 2-3-4-5-6-7.
- Jr. Sol 2-3-4-5-6.
- Jr. Callao 1-2.
- Jr. Carlos F. Vivanco 1-2-3-4.

3.9.1.3 Regulación del tránsito en el Centro Histórico

En conformidad con lo dispuesto en el Artículo 81 de la Ley Orgánica de Municipalidades, Ley 27972 (L.O.M., 2003), la regulación de tránsito vehicular está a cargo de las Municipalidades y sus funciones son:

- Normar, regular, organizar y mantener los sistemas de señalización y semáforos.
- Regular el tránsito urbano de peatones y vehículos.
- Instalar, mantener y renovar los sistemas de señalización de tránsito en su jurisdicción, de conformidad con el reglamento nacional vigente.
- Normar, regular y controlar la circulación de vehículos menores motorizados o no motorizados, tales como taxis, moto taxis, triciclos, y otros de similares.

En este sentido la regulación de tránsito vehicular en el Centro Histórico está a bajo responsabilidad de la Municipalidad Provincial de Huamanga, y su administración recae en la Gerencia de Transportes y la Subgerencia de Tránsito y Seguridad Vial, ésta se encarga en velar por el buen servicio del tránsito mediante órdenes municipales que año tras año va emitiendo.

De acuerdo al reglamento para la gestión y administración del Centro Histórico de Ayacucho (MPH, 2008, p.27), existe una serie de restricciones en el tránsito dentro del Centro Histórico, sin embargo algunas de éstas no se vienen desarrollando, las

principales restricciones son:

- Se prohíbe la circulación y estacionamiento de vehículos con carga mayor de 6 toneladas y/o longitudes mayores a 7.50 ml, para contribuir con la conservación de las veredas, calzadas y edificaciones tradicionales del Centro Histórico.
- En el caso de calles con dos carriles se considerará 4.20 m. de ancho de calzada como mínimo.
- El sistema de semaforización debe ser sincronizado, para permitir el tránsito fluido y seguro.
- Se prohíbe el estacionamiento en los Ambientes Urbano Monumentales como la Plaza Mayor y demás ubicados en los Sectores 1 y 2, así como la ocupación de veredas.

Por otro lado el Plan Maestro de Revitalización Integral del Centro Histórico de Huamanga, Ayacucho, 2011-2021 (MPH-AECID, 2011), planteó las siguientes propuestas para un manejo adecuado del tránsito en el Centro Histórico:

- Restringir la circulación de mototaxis en el área central.
- Mantener el control adecuado del número de unidades por línea (Unidades de transporte público), como parte de la propuesta de reordenamiento y racionalización de rutas, a fin de evitar la sobre oferta y congestión vehicular en el Centro de la ciudad.

En este mismo plan (MPH-AECID, 2011), se ha descrito algunos problemas que siguen presentes en el sistema de tránsito del Centro Histórico:

- El paso de los vehículos por un solo carril hace más lento el tráfico agravándose más cuando algunos vehículos se detienen temporalmente frente a algunas edificaciones (por ejemplo el gobierno regional, el hotel Plaza o la sede de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga en el Jr. Arequipa).

- En las vías donde hay un solo carril, el tráfico vehicular se hace lento cuando pasa el camión recolector de basura.

Estas series de restricciones, propuestas y problemas, fueron estudiadas y consideradas para el modelamiento de esta investigación.

3.9.2 Recolección de datos

3.9.2.1 Descripción general de la red para Centro Histórico

En base a que el modelamiento fue a nivel mesoscópico, se estableció como la red de trabajo a la zona central del centro histórico, donde los conectores son las calles por donde únicamente circulen vehículos (las vías peatonales no se consideran) y los nodos representan a las intersecciones de las calles, la red de trabajo se puede ver en la imagen 3.7.

Dentro de la red de trabajo, se tienen los siguientes parámetros morfológicos necesarios para modelar detalladamente la red vial:

- Anchos de calzada
- Longitud de las calles
- Dirección de flujo
- Pendiente de las calles

Los trabajos de campo consistieron en obtener cada uno de estos parámetros para caracterizar la red vial, cada valor se constató en base a mediciones de campo, revisión de planos topográfico de la zona y la inspección del funcionamiento del tráfico.

3.9.2.2 Anchos de calzada

A causa de que el Sector Central se encuentra en constantes mantenimientos a través de los últimos años, las dimensiones de sus calzadas en general han sufrido variaciones, se han realizado trabajos de campo para medir los anchos de calzadas en todas las vías del Sector central, cada medición se realizó a la mitad de cada cuadro asegurando que

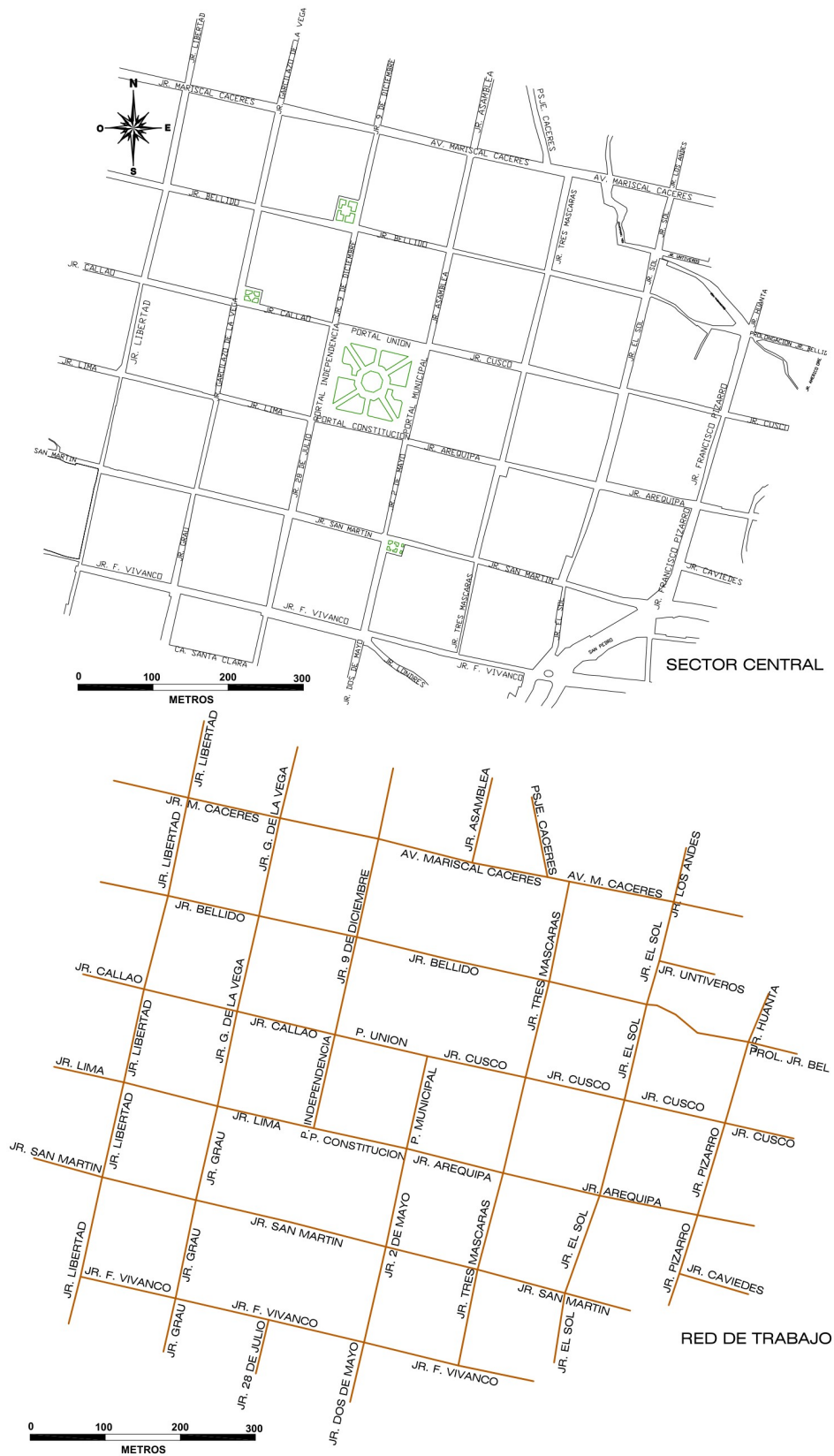


Figura 3.7: Red del Centro Histórico de Ayacucho (Sector Central).

Fuente: Elaboración propia.

esta medida represente el ancho promedio de la calzada en la vía.

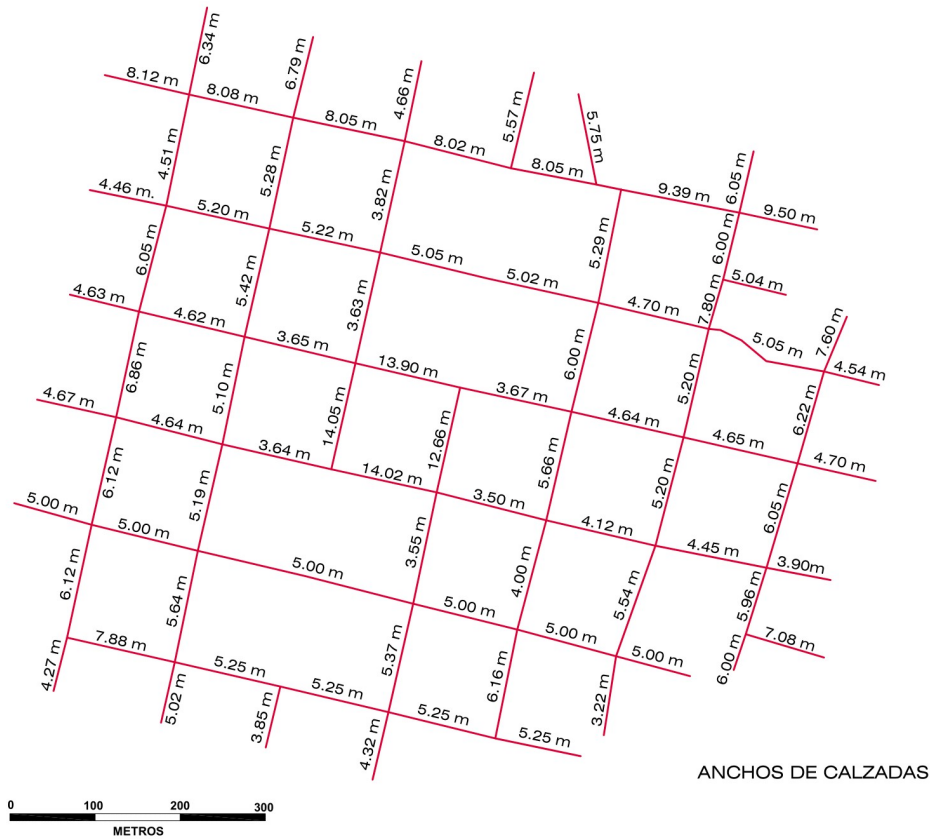


Figura 3.8: Anchos de calzada del Centro Histórico de Ayacucho (Sector Central).

Fuente: Elaboración propia.

La imagen 3.8 resume los anchos promedios de las calzadas dentro de todo el sector central del Centro Histórico. Como se ve, las calles más anchas (14 m en promedio) se encuentran en los alrededores del parque central, correspondientes a los Portales Constitución, Municipal, Independencia y Unión, mientras las calles que son circundantes al parque central tienen calzadas que varían entre los 4 a 5 m (calles angostas) la mayoría de éstas funcionan como un carril, además se tienen a las calles circundantes a la zona central con anchos que varías entre los 6 a 9 metros.

3.9.2.3 Longitudes de las cuadras

Las longitudes de las cuadras en la red se midieron considerando la parte central de las intersecciones que forman las calles, sin embargo para su modelamiento se decidió

usar las fotografías satelitales a escala adecuada. Para las calles externas a la red (de alimentación y salida) solo se consideró en el modelo la longitud adecuada para que se realice una adecuada simulación, dado que estas vías no forman parte de la zona central. En la imagen 3.9 se presenta las longitudes de las cuadras dentro de la red de estudio.

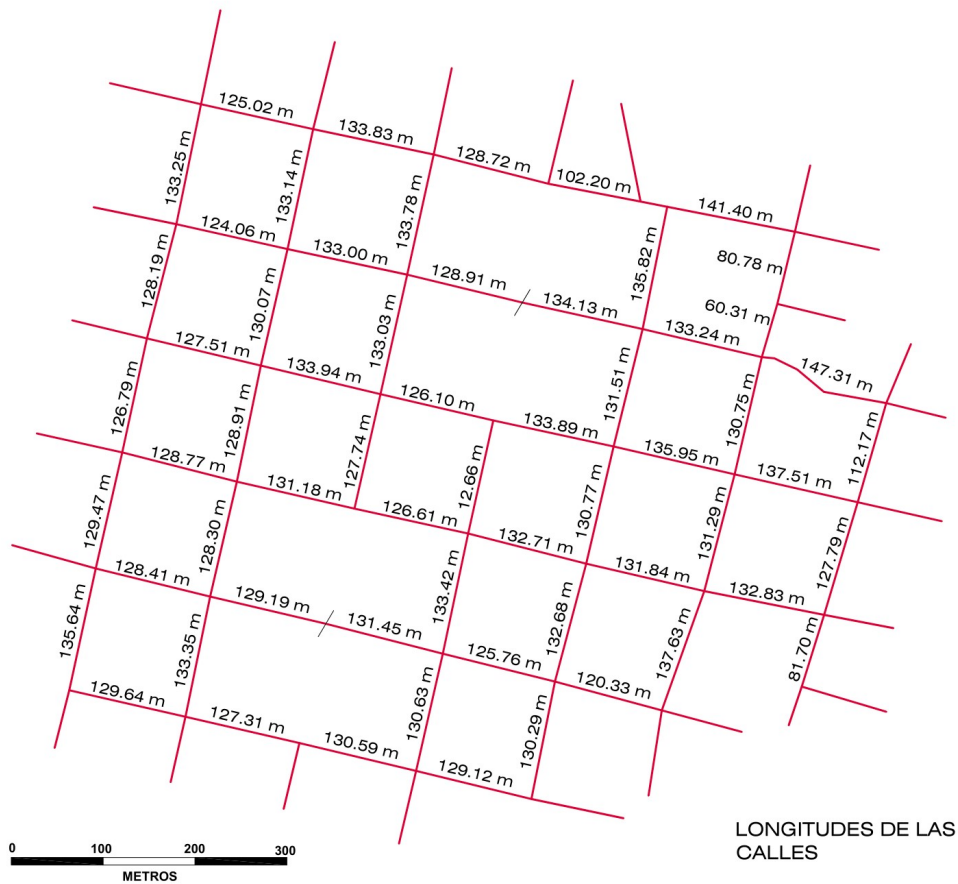


Figura 3.9: Longitudes de calles del Centro Histórico de Ayacucho (Sector Central).

Fuente: Elaboración propia.

3.9.2.4 Direcciones de flujo y números de sendas

Teniendo en cuenta los reglamentos vigentes de la Municipalidad Provincial de Huamanga y en base a una inspección realizada en la Zona Central del Centro Histórico, se han establecido las direcciones de flujo con que actualmente funciona el tránsito vehicular. Se utilizó el término de sendas para llamar a los posibles flujos que aparecen

dentro de una misma vía ya que los carriles no están diferenciados. En la imagen 3.10 se muestran los flujos y los números de sendas por vía.

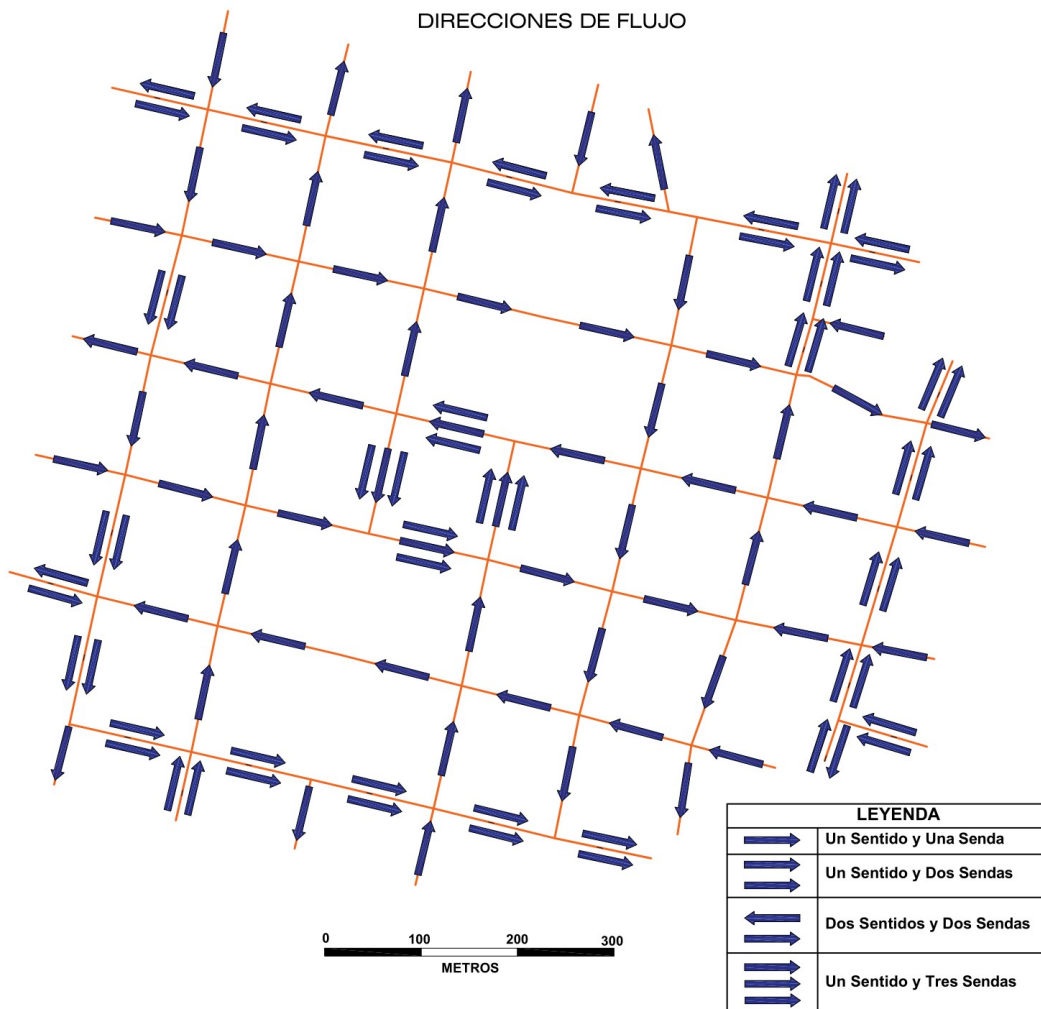


Figura 3.10: Sentidos de flujo vehicular en el Centro Histórico (Sector Central).

Fuente: Elaboración propia.

3.9.2.5 Gradientes

La gradiente de las vías también influye en el flujo vehicular, afectado principalmente en la aceleración y desaceleración de los vehículos, para cada porcentaje de gradiente positivo (inclinación de la carretera) la aceleración disminuye en $-0,1 m/s^2$ y por cada gradiente negativo aumenta en $0,1 m/s^2$ (Vissim, 2011).

En el gráfico 3.11 se muestran los valores y direcciones del gradiente de las calles

horario nocturno presenta una alta demanda de tráfico duradera y con mayor densidad vehicular a esto se mezcla el alto tránsito peatonal ocasionando a que el flujo vehicular disminuya.

En la zona de trabajo se hizo el aforamiento durante la hora pico de la mañana, porque durante este periodo se presenta el mayor flujo vehicular horario durante el día. No se realizó el aforo en las otras horas pico presentes en el mediodía y la noche, por la presencia de alto tránsito peatonal que altera el movimiento libre de los vehículos, además porque en estas horas existe una alta densidad vehicular y ciertas vías entran en estado de congestión, que no permitirían una recolección adecuada de datos como el flujo, velocidad y parámetros del comportamiento vehicular.

3.9.2.6.1 Identificación de la hora de máxima demanda

La hora pico u hora de máxima demanda es la hora del día donde se presenta el mayor volumen de flujo vehicular y fue necesario identificarla para realizar los análisis operacionales de esta investigación.

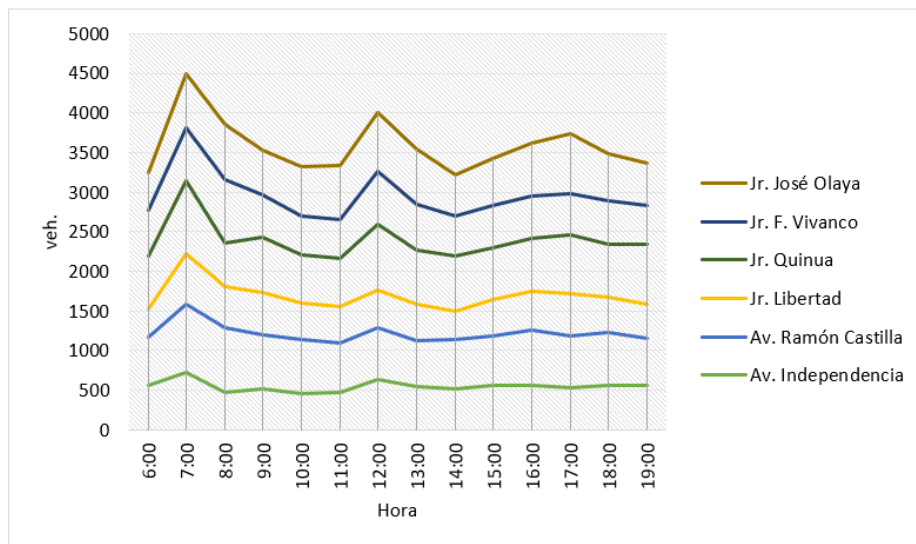


Figura 3.12: Volúmenes apilados de tráfico por hora en distintas calles

Fuente: Elaboración propia en base a aforos recolectados

Para identificar la hora pico, se recolectaron datos de aforos vehiculares realizados

por otras investigaciones cerca y/o dentro del centro histórico, para determinar las tendencias de la variación de los volúmenes vehiculares durante el día. De la recolección de aforos se elaboró un gráfico de los volúmenes apilados para identificar la hora con mayor volumen de tráfico del día, esta hora cayó entre las 7 a 8 am (ver figura 3.12).

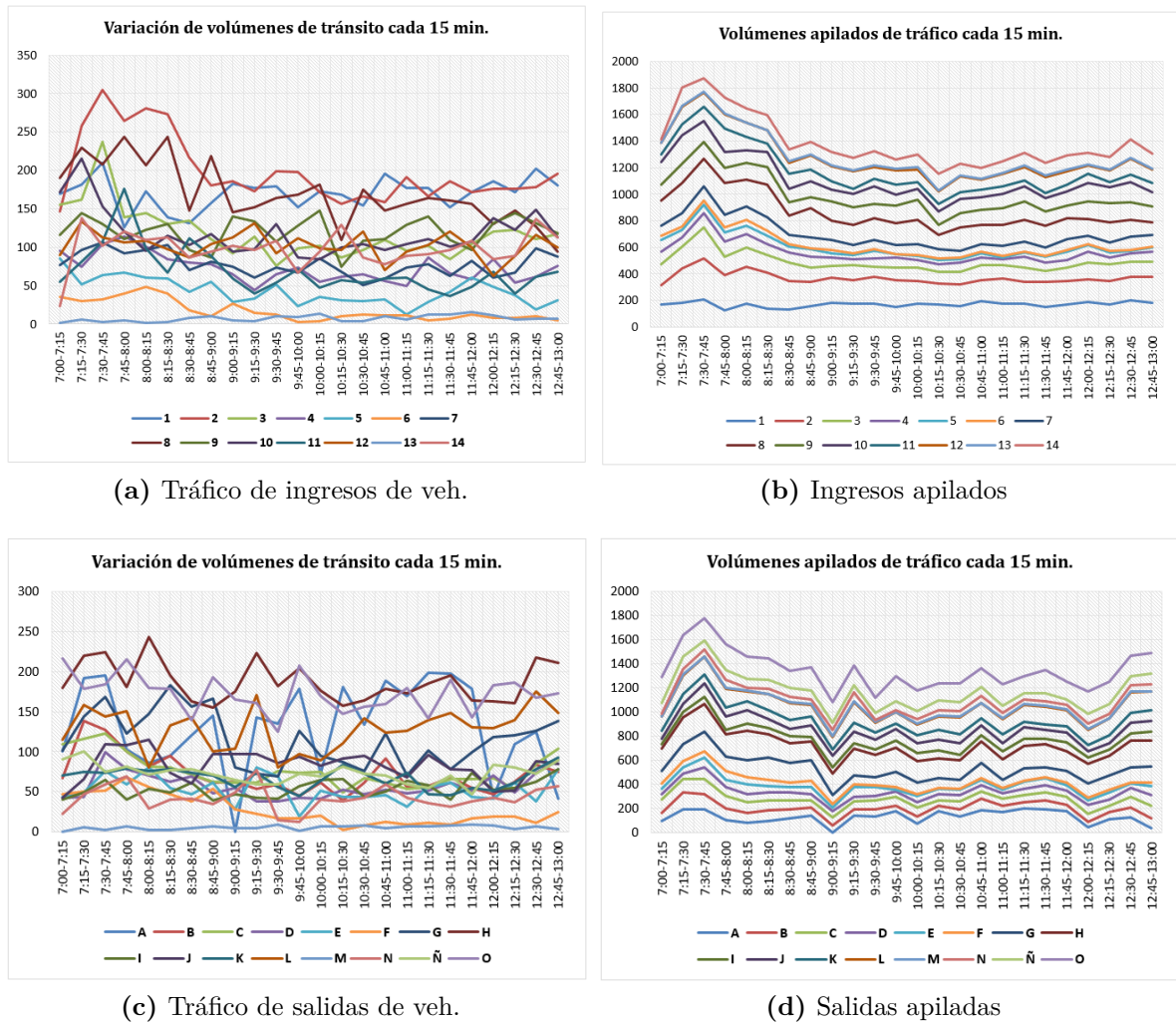


Figura 3.13: Evaluación de la hora de máxima demanda en el centro de la ciudad de Ayacucho desde las 7:00 am hasta la 1:00 pm

Fuente: Elaboración propia en base a (Huamani, 2018).

Además en la tesis "Determinación de zonas adecuadas de estacionamiento vehicular en el centro de la ciudad de Ayacucho"(Huamani, 2018, p. 50 y 51) se realizaron aforos en varios puntos dentro del centro histórico, para medir los volúmenes de ingresos y

salidas en un área que delimita a la Zona Central. Los aforos se realizaron con intervalos de 15 min. con las que se elaboraron los gráficos de la imagen 3.13, donde se pueden ver las curvas de la variación de volúmenes de tráfico y su apilamiento de volúmenes de las calles aforadas.

De acuerdo a las curvas de los gráficos en la imagen 3.12 y 3.13 se determinó que la hora de máxima demanda se encontraba en el horario de 7:30 - 8:30 am, y es donde se realizaron los trabajos de aforamiento para esta investigación, esta hora además se caracteriza con no contar de un alto flujo peatonal y con contar de luz solar, que facilita en realizar las tomas de grabaciones aérea al tráfico requeridas en esta investigación.

3.9.2.6.2 Procedimiento del aforamiento

Los trabajos de aforamientos se ejecutaron en los días laborales de lunes a viernes, para contar con un tráfico similar y representativo de un día común y además con mayor flujo en este horario en comparación a los flujos presentes en los sábados y domingos. Para los nodos interiores bastó con un solo aforo, mientras en los nodos de ingreso o alimentación vehicular de la red se usaron tres días para realizar los trabajos aforos, este procedimiento se basó en base a precedentes de trabajos de simulación vehicular, usando una adaptación del formato de aforos direccionales en intersecciones del Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte (MPDATT, 2005)

Los aforos vehiculares se realizaron para cuantificar el ingreso de vehículos a la red de trabajo, al mismo tiempo que se cualificó en porcentajes la distribución por tipo de vehículos de la reparticiones en cada intersección.

Para simular con precisión la dinámica del flujo vehicular, los bucles para cada volumen de tráfico medidos fueron cada 5 min. como lo precisa el *Transportation Systems Simulation - A Tutorial for Multi-Modal Simulation Using VISSIM* (VISSIM,



Figura 3.15: Vista aérea, Jr. San Martín - Jr. 2 de Mayo

Fuente: Elaboración propia.

se harían con aforadores en campo, el uso de esta herramienta se hace para mejorar la precisión datos y contribuye con la calibración de modelo.

3.9.3 Composición vehicular

La composición vehicular de trabajo se consideró basado a los alcances y propósitos de la investigación, enfocada en obtener un modelamiento mesoscópico.

En base al tráfico observado en los aforamientos, se decidió resumir la diversidad de tipos de vehículos en 5 grupos que se muestran en la tabla 3.5, estos grupos engloban a las categorías de vehículos establecidas en Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2006).

Esta selección se realizó para estandarizar las medidas de los vehículos en grupos con dimensiones representativos, la selección excluyó a los vehículos de grandes dimensiones como los camiones tráiler cuyo paso por el centro histórico está prohibido. La finalidad de la selección fue por no sobrecargar el modelamiento con diversidad vehicular y simplificar el trabajo.

Cuadro 3.5: Tipos de vehículos.

Nº	Tipo de veh.	Categorías	Veh. equivalente
1	Motocicletas	L1, L3	0.5
2	Mototaxis	L2, L5	0.75
3	Vehículos ligeros	M1, M2	1
4	Bus	M2, M3	2.5
5	Camiones	N1, N2, N3, O2, O3, O4	1.5

Fuente: MTC (2006)



Figura 3.16: Captura de la diversidad vehicular de Ayacucho

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4 Demoras en intersecciones con métodos clásicos

3.9.4.1 Caracterización de las intersecciones

El sector central del Centro Histórico cuenta con 41 intersecciones, entre éstas, 22 estuvieron semaforizadas y 19 son no semaforizadas; además 30 intersecciones son tipo cruz y 9 tipo T (ver en la tabla 3.6).

Cuadro 3.6: Caracterización de intersecciones de la Zona Central del Centro Histórico de Ayacucho

Nº	Intersección	Señales de control	Geometría	Carriles (ing. y salid.)	Calles afluentes	Carriles en el Este	Carriles en el Oeste	Carriles en el Norte	Carriles en el Sur
1	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
2	Jr. Grau - Jr. San Martín	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
3	Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
4	Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
5	Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
6	Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
7	Jr. Sol - Jr. Cusco	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
8	Jr. Sol - Jr. Arequipa	Ninguno	Cruz	4	2	1	1	1	1
9	Jr. Libertad - Jr. Bellido	Ninguno	Cruz	5	2	1	1	1	2
10	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	Ninguno	Cruz	5	2	1	1	1	2
11	Jr. Sol - Jr. Untiveros	Ninguno	Cruz	5	2	-	1	2	2
12	Jr. Sol - Jr. Bellido	Ninguno	Cruz	5	2	1	1	2	1
13	Jr. Pizarro - Jr. Bellido	Ninguno	Cruz	6	2	1	1	2	2
14	Jr. Pizarro - Jr. Cusco	Ninguno	Cruz	6	2	1	1	2	2
15	Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	Ninguno	Cruz	6	2	1	1	2	2
16	Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	Ninguno	T	5	2	-	2	2	1
17	Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	Ninguno	T	5	2	2	2	1	-
18	Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	Ninguno	T	5	2	2	2	1	-
19	Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	Ninguno	T	6	2	-	2	2	2
20	Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	Semáforo	Cruz*	2	1	1	1	-	-
21	Jr. Asamblea - Jr. Bellido	Semáforo	Cruz*	2	1	1	1	-	-
22	Jr. Garcilaso de la V - Jr. Callao	Semáforo	Cruz	4	2	1	1	1	1
23	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	Semáforo	Cruz	4	2	1	1	1	1
24	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	Semáforo	Cruz	4	2	1	1	1	1
25	Jr. Sol - Jr. San Martín	Semáforo	Cruz	4	2	1	1	1	1
26	Jr. Libertad - Jr. Callao	Semáforo	Cruz	5	2	1	1	2	1
27	Jr. Libertad - Jr. Lima	Semáforo	Cruz	5	2	1	1	1	2
28	Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	Semáforo	Cruz	6	3	2	2	1	1
29	Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	Semáforo	Cruz	6	3	2	2	1	1
30	Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	Semáforo	Cruz	6	3	2	2	1	1
31	Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	Semáforo	Cruz	6	2	2	2	1	1
32	Jr. Libertad - Jr. San Martín	Semáforo	Cruz	7	2	2	1	2	2
33	Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	Semáforo	Cruz	7	2	2	2	1	2
34	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	Semáforo	Cruz	8	1	1	3	1	3
35	Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	Semáforo	Cruz	8	2	3	1	3	1
36	Jr. Sol - Av. M. Cáceres	Semáforo	Cruz	8	2	2	2	2	2
37	Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	Semáforo	T	5	1	1	3	1	-
38	Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	Semáforo	T	5	1	2	2	-	1
39	Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	Semáforo	T	5	2	2	2	1	-
40	Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	Semáforo	T	5	2	2	2	-	1
41	Jr. Asamblea - Jr. Cusco	Semáforo	T	7	2	3	1	-	3

(*) Intersección tipo Cruz con calle peatonal

Fuente: Elaboración propia.

A fin de estimar las demoras con varias metodologías, se estableció seis intersecciones representativas en la zona central, de acuerdo a la tabla 3.6. Estas intersecciones presentan una geometría en cruz, siendo dos sin semáforos y tres con la señal de control, sus características se pueden ver en la tabla 3.7.

Cuadro 3.7: Intersecciones representativas del centro histórico

Intersección	Señales de control	Geometría	Carriles (ing. y salid.)	Calles convergentes	veh./h
Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Ninguno	Cruz	4	2	1712
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	Ninguno	Cruz	4	2	1153
Jr. Sol - Jr. San Martín	Semáforo	Cruz	4	2	1810
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	Semáforo	Cruz	4	2	1115
Jr. 9 de Diciembre. - Av. M. Cáceres	Semáforo	Cruz	6	3	1313

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4.2 Demoras en intersecciones semaforizadas

Las demoras en las intersecciones semaforizadas se estimaron utilizando los aforamientos para la medición de demoras, además se usó la metodología del HCM 2010 para intersecciones semaforizadas y modelamiento en software Vissim, de acuerdo al modelo de seguimiento simplificado con la adaptación de semáforos. En esta sección se utilizaron estas metodologías para aplicar la adecuada para el modelamiento y evaluación de la red del centro histórico, las intersecciones donde se aplican representan al tipo de intersecciones que predomina sobre la zona de análisis.

3.9.4.2.1 Jr. Sol - Jr. San Martín

La primera estimación de las demoras en una intersección, se realizó con el procedimiento de que establece el Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994), cuyo procedimiento se encuentra en el Anexo C-1, los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.8.

La siguiente metodología es la del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000) para intersecciones con señales de control. Los datos de entrada que se requieren se basa en las condiciones geométricas, semaforicas y del tráfico (ver la figura 3.18), así



(a) Vista panorámica.

(b) Vista de sitio

Figura 3.17: Jr. Sol - Jr. San Martín**Fuente:** Elaboración propia**Cuadro 3.8:** Resultados de la medición de demoras en Jr. Sol - Jr. San Martín

Resultados	Jr. Sol	Jr. San Martín
Demora total de tiempos parados DTP (Veh.-s)	5265	6060
Demora media de vehículos que se paran DMP (s)	25.3	25.1
Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente DMPT (s)	17.1	21.3
Porcentaje de vehículos detenidos	68 %	85 %

Fuente: Elaboración propia.

como se ingresan valores de volúmenes, % de vehículos pesados, factores de hora pico, tipo de control, tipos de entrada (ver Anexo C-2), y los tiempos en verde como indica la tabla 3.9.

Cuadro 3.9: Volúmenes y condiciones de tráfico

Datos	E-O		N-S	
	Izquierda	Directo	Directo	Derecha
Volumen (veh/h)	17	631	748	46
% VP	0	0	0	0
FHP	0.89	0.89	0.79	0.79
Tipo de control	pre-establecido		pre-establecido	
Tipo de entrada	2		3	
Tiempo verde	26		34	
Tiempo amarillo	2		2	

Fuente: Elaboración propia.

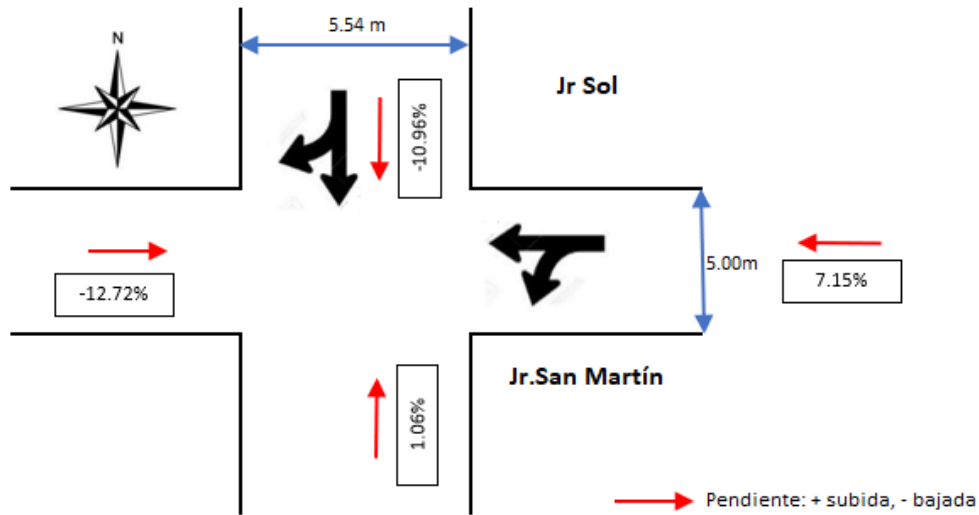


Figura 3.18: Geometría de la intersección del Jr. Sol y Jr. San Martín

Fuente: Elaboración propia.

El segundo paso del análisis de la intersección, consistió en ajustar las cantidades de flujo, los volúmenes horarios se ajustaron dividiéndolos por el factor de hora pico (FHP o FHMD), luego se estableció el agrupamiento de carriles, se ingresaron los volúmenes horarios, ajustados de acuerdo a su respectivo factor de hora pico; a la sumatoria de la tasa de flujo de todas las direcciones de cada acceso, se denominó como Tasa de Flujo Ajustado en el Grupo de Carriles (V_p), finalmente se obtuvieron las proporciones de giros a la izquierda y derecha para cada acceso (ver tabla 3.10).

Cuadro 3.10: Ajustes de volumen

Ajuste de volumen	E-O		N-S	
	Izquierda	Directo	Directo	Derecha
Volumen (veh./h)	17.00	631.00	748.00	46.00
FHP	0.89	0.89	0.79	0.79
Flujo ajustado (veh./h)	19.10	708.99	946.84	58.23
Tasa de flujo	728		1005	
V_p (veh./h)				
Proporción izq. y der.	3%	97%	94%	6%

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la metodología del HCM, los siguientes pasos se enfocan en el cálculo

del factor por ajuste de tráfico peatonal y de bicicletas, que para esta investigación no se va a considerar, asumiendo para ambos el valor de 1.00.

Lo siguiente fue determinar la tasa de flujo de saturación para cada grupo de carriles de ingreso, los cálculos comenzaron con asignar una tasa de saturación base, que por defecto se asume en 1900 vehículos por hora por carril, luego se ajustó la tasa de acuerdo a las condiciones del flujo mediante todos los factores de la ecuación ??, lográndose así obtener la tasa flujo de saturación ajustada el procedimiento se ve en la tabla 3.11.

Cuadro 3.11: Tasa de flujo de saturación

Tasa de flujo de saturación	E-O	N-S
Flujo de saturación de base S_0 (veh.pas/h/carril)	1900	1900
Número de carriles	1.00	1.00
Ancho de carril	5.00	4.04
Factor de ajuste de ancho de carril, f_w	1.16	1.05
Factor de ajuste del vehículo pesado, f_{HV}	1.00	1.00
Pendiente de acceso	7.15	-10.96
Factor de ajuste de pendiente, f_g	0.96	1.05
Factor de ajuste de parqueo, f_p	1.00	1.00
Factor de ajuste por bloqueo de buses, f_{bb}	1.00	1.00
Tipo de área	CBD	CBD
Factor de ajuste del tipo de área, f_a	0.90	0.90
Tasa de flujo no ajustado del grupo	728	1005
Factor de ajuste de utilización de carril, f_{LU}	1.00	1.00
Factor de ajuste de giro a la izquierda f_L .	1.00	1.00
Factor de ajuste de giro a la derecha f_R	1.00	0.99
Factor de ajuste de peat. / bicicleta de giro a la izquierda, f_{Lpb}	1.00	1.00
Factor de ajuste de peat. / bicicleta de giro a la derecha, f_{Rpb}	1.00	1.00
Flujo de saturación ajustado, s (veh./h)	1890	1873

Fuente: Elaboración propia.

El para obtener el análisis de capacidad se usaron los valores hallados de la tasa de flujo ajustada (v) y la tasa de flujo de saturación ajustada (s), del cociente de estos valores se obtuvo la relación de flujo (v/s). Con el tiempo de verde y la duración del ciclo se obtuvo la proporción de verde, luego se determinó la capacidad (c) del grupo de carriles y los grados de saturación ($X = v/c$) y se estimó el grado de saturación crítico

(Xc) (ver tabla 3.12).

Cuadro 3.12: Análisis de capacidad

Análisis de capacidad	E-O	N-S
Flujo ajustado $v(veh./h)$	728	1005
Flujo de saturación, $s(veh./h)$	1890	1873
Tiempo perdido $t_L(s) = l_1 + Y - e$	2	2
Longitud de ciclo, $C(s)$	60	60
Tiempo verde efectivo $g(s) = G + Y - t_L$	26	34
Proporción verde, g/C	0.42	0.55
Capacidad de grupo de carril, $c = s(g/C)$, (veh/h)	792	1027
Relación v/c , X	0.92	0.98
Relación de flujo, v/s	0.39	0.54
Grupo / fase de carril crítico (\checkmark)	\checkmark	\checkmark
Suma de relaciones de flujo para grupos de carriles críticos, $Yc = \sum(\text{grupos de carriles críticos}, v/s)$	0.92	
Tiempo perdido total por ciclo, $L(s)$	4.00	
Grado de saturación crítico, $Xc = (Yc)(C)/(C - L)$	0.99	

Fuente: Elaboración propia.

Un análisis previo para establecer la demora en la intersección (d), se basa en estimar las demoras por cola inicial (d_3) y demora uniforme (d_1), estos parámetros contienen distintos casos de análisis de acuerdo al desarrollo de las colas en la intersección (Q_b), a la relación (v/c) y a la duración de la demanda insatisfecha (t). Dado que durante la observación realizada fue durante la hora pico de la mañana y no se observaron ni registraron en vídeo colas constantes, el valor de (Q_b) se asumió 0, por este motivo el tipo de análisis para obtener los parámetros de demora d_1 y d_3 se basó en el caso I y II, como se ven en la tabla 3.13

Las demoras y nivel de servicio, finalmente se calcularon utilizando los resultados del volumen ajustado, flujo de saturación y análisis de la capacidad, con esta información finalmente se puede encontrar la demora por vehículo para cada grupo de carriles para cada acceso y la intersección (ver tabla 3.14).

Cuadro 3.13: Análisis de la demora uniforme y por cola inicial

Demora uniforme y por cola inicial	E-O	N-S
Duración del análisis, $T(h)$	0.25	0.25
Longitud de ciclo, $C(s)$	60	60
Cola inicial, $Qb(veh.)$	0	0
Proporción de verde, g/C	0.42	0.55
Relación v/c , $X = v/c$	0.92	0.98
Capacidad del grupo de carriles, $c(veh./h)$	792	1027
Proporción de vehículos que llegan en verde, P	0.35	0.52
Relación de pelotón (Rp)	0.81	0.91
Factor de ajuste suplementario, f_{PA}	1.136	1
Factor de ajuste por progresión/coordinación	2.71	1.82
Duración de la demanda insatisfecha en T, $t(h)$	0	0
Caso de Análisis	Caso 1	Caso 1
Caso I y II $Q_b = 0$		
Demora por cola inicial, $d_3(s):d_3 = 0$	0	0
Demora uniforme, $d_1(s)$:	16.45	13.20

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.14: Análisis del nivel de servicio

Demora y Nivel de Servicio	E-O	N-S
Tasa de flujo ajustado $v(veh./h)$	728	1005
Capacidad de grupo de carriles, $c = s(g/C)$, $(veh./h)$	792	1027
Relación v/c , X	0.92	0.98
Calibración de la demora incremental, k	0.5	0.5
Factor de ajuste por entradas de la intersección corriente arriba	1	1
Duración del análisis, $T(h)$	0.25	0.25
Demora incremental, $d_2 (s/veh.)$	17.4	23.3
Demora de cola inicial, $d_3 (s/veh.)$	0	0
Demora uniforme, $d_1 (s/veh.)$	16.5	13.2
Factor de ajuste por progresión/coordinación, PF	2.7	1.8
Demora d	62.0	47.4
Nivel de Servicio	E	D
Tasa de flujo del acceso, $v_A (veh./h)$	728	1005
Demora en la intersección $d_I (s)$		53.5
Nivel de Servicio		D

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4.2.2 Jr. Garcilaso de la Vega - Jr. Lima

La primera estimación de las demoras se realizó con el procedimiento de que establece el Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994), cuyo procedimiento se encuentra en el Anexo C-1, los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.15.



Figura 3.19: Jr. Garcilaso de la Vega - Jr. Lima

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.15: Resultados de la medición de demoras en Jr. Garcilaso de la Vega - Jr. Lima

Resultados	Jr. G. de la Vega	Jr. Lima
Demora total de tiempos parados DTP (Veh.-s)	2250	6930
Demora media de vehículos que se paran DMP (s)	22.5	54.6
Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente DMPT (s)	12.8	49.1
Porcentaje de vehículos detenidos	57%	90%

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente metodología correspondiente al Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000) para intersecciones con señales de control, cuyo procedimiento es el mismo al realizado en el Jr. Sol con San Martín (el procedimiento completo de esta intersección se encuentra en el Anexo C-2), arrojó los resultados de análisis de Nivel de Servicio que

se ven en la tabla 3.16

Cuadro 3.16: Análisis del nivel de servicio según el HCM

Demora y Nivel de Servicio	O-E	S-N
Tasa de flujo ajustado v (veh./h)	433	742
Capacidad de grupo de carriles, $c = s(g/C)$, (veh./h)	670	1239
Relación v/c , X	0.65	0.60
Calibración de la demora incremental, k	0.5	0.5
Factor de ajuste por entradas de la intersección corriente arriba	1	1
Duración del análisis, $T(h)$	0.25	0.25
Demora incremental, d_2 (s/veh.)	4.8	2.1
Demora de cola inicial, d_3 (s/veh.)	0	0
Demora uniforme, d_1 (s/veh.)	18.0	7.2
Factor de ajuste por progresión/coordiación, PF	2.9	1.6
Demora d	57.3	13.7
Nivel de Servicio	E	B
Tasa de flujo del acceso, v_A (veh./h)	433	742
demora en la intersección (s)		29.8
Nivel de Servicio		C

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4.2.3 Jr. 9 de Diciembre. - Av. M. Cáceres

La primera estimación de las demoras se realizó con el procedimiento de que establece el Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994), cuyo procedimiento se encuentra en el anexo C-1, los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.17.



(a) Vista panorámica.

(b) Vista de sitio

Figura 3.20: Jr. 9 de Diciembre. - Av. M. Cáceres

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.17: Resultados de la medición de demoras en Jr. 9 de Diciembre. - Av. M. Cáceres

Resultados	Jr. 9 de Diciembre	Av. M. Cáceres E	Av. M. Cáceres O
Demora total de tiempos parados DTP (Veh.-s)	4440	2670	1005
Demora media de vehículos que se paran DMP (s)	31.0	30.0	27.9
Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente DMPT (s)	25.52	17.0	16.8
Porcentaje de vehículos detenidos	82 %	57 %	60 %

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente metodología correspondiente al Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000) para intersecciones con señales de control, cuyo procedimiento es el mismo al realizado en el Jr. Sol con San Martín (el procedimiento completo de esta intersección se encuentra en el Anexo C-2), arrojó los resultados de análisis de Nivel de Servicio que se ven en la tabla 3.18

Cuadro 3.18: Análisis del nivel de servicio según el HCM

Demora y Nivel de Servicio	O-E	E-O	S-N
Tasa de flujo ajustado v (veh./h)	192	513	496
Capacidad de grupo de carriles, $c = s(g/C)$, (veh./h)	846	776	862
Relación v/c , X	0.23	0.66	0.58
Calibración de la demora incremental, k	0.5	0.5	0.5
Factor de ajuste por entradas de la intersección corriente arriba	1	1	1
Duración del análisis, $T(h)$	0.25	0.25	0.25
Demora incremental, d_2 (s/veh.)	0.6	4.4	2.8
Demora de cola inicial, d_3 (s/veh.)	0	0	0
Demora uniforme, d_1 (s/veh.)	10.2	13.1	10.8
Factor de ajuste por progresión/coordinación, PF	2.2	2.0	2.0
Demora d (s)	22.7	30.9	24.0
Nivel de Servicio	C	C	C
Tasa de flujo del acceso, v_A (veh./h)	192	513	496
demora en la intersección (s)		53.5	
Nivel de Servicio		D	

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4.3 Demoras en intersecciones no semaforizadas

Las demoras en las intersecciones no semaforizadas se estimaron utilizando los aforamientos, la metodología del HCM 2010 para intersecciones de tipo AWSC (All-

Way Stop-Controlled) y modelamiento en software Vissim, de acuerdo al modelo de seguimiento simplificado. En esta sección se utilizaron estas metodologías para aplicar la adecuada para el modelamiento y evaluación de la red del centro histórico, las intersecciones donde se aplican representan al tipo de intersecciones que predomina sobre la zona de análisis.

3.9.4.3.1 Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa

La primera estimación de las demoras se realizó con el procedimiento de que establece el Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994), cuyo procedimiento se encuentra en el Anexo C-1, los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.19.



Figura 3.21: Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.19: Resultados de medición de demoras en Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa

Resultados	Jr. Arequipa	Jr. 3 Máscaras
Demora total de tiempos parados DTP (veh.-s)	1725	3540
Demora media de vehículos que se paran DMP (s)	19.0	25.1
Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente DMPT (s)	9.4	12.6
Porcentaje de vehículos detenidos	49 %	50 %

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente metodología es la que provee del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000) para intersecciones no semaforizadas de tipo de control de detención en todos sus afluentes AWSC (All-way-stop-controlled intersection), esta metodología a diferencia de la metodología que el HCM tiene para intersecciones semaforizadas, solo requiere de datos de geometría basado en su cantidad de carriles y flujo vehicular como indica la tabla 3.20.

Cuadro 3.20: Ajuste de volúmenes y asignación de carriles

Ingreso	Datos	Carril 1			Grupo Geométrico
		Izquierda	Directo	Derecha	
Oeste a Este	Volumen		420	118	1
	FHP		0.87		
	% VP	0	0	0	
	Tasa de Flujo	0	483	136	
Norte a Sur	Volumen	416	429		1
	FHP		0.9		
	% VP	0	0	0	
	Tasa de Flujo	462	477	0	

Fuente: Elaboración propia.

El segundo paso del análisis de la intersección, consistió en determinar el intervalo de ajuste de saturación (h_{adj}), en función a sus parámetros como los intervalos de ajuste de saturación de giro h_{LT} y h_{RT} y a las proporciones de giro respectivo P_{LT} y P_{RT} , ver la tabla 3.21.

El procedimiento continuó con la determinación de los intervalos iniciales de partida (con esto los tiempos de servicio), para cada uno de los carriles en los accesos, estos procedimiento es iterativo, la tabla 3.22 muestra los resultados del este procedimiento que se puede ver con más detalle en los anexos C-3. La primera iteración supone un avance inicial de 3.2 s, la iteración debe continuar hasta que los valores de h_d converjan.

Finalmente en base al intervalo de salida y al grado de utilización se obtuvo las demoras por cada acceso en la intersección y con ello el Nivel de Servicio, otros

Cuadro 3.21: Determinación del intervalo de ajuste de saturación

Intervalo de ajuste de saturación	Ingreso	
	O-E	N-S
Tasa de flujo	618	939
Flujo que gira a la Izq.	0.00	416
Flujo que gira a la Der.	118	0
Proporción Izquierda P_{LT}	0.00	0.44
Proporción Derecha P_{RT}	0.19	0.00
Proporción vehículos pesados P_{HV}	-	-
h_{lt}	0.20	0.20
h_{rt}	-0.60	-0.60
h_{hv}	1.70	1.70
h_{adj}	-0.11	0.09

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.22: Determinación de los intervalos de salida

Intervalo de salida	Ingreso	
	O-E	N-S
Tasa de flujo	618	939
Valor inicial hd (s)	3.20	3.20
Valor inicial x	0.55	0.83
hd Iteracion 1	5.41	5.06
hd diferencia 1	2.21	1.86
x iteración 1	0.93	1.32
hd Iteracion 2	6.37	5.81
hd diferencia 2	0.96	0.75
x iteración 2	1.09	1.52
hd Iteracion 3	6.76	6.14
hd diferencia 3	0.39	0.33
x iteración 3	1.16	1.60
hd Iteracion 4	6.92	6.27
hd diferencia 4	0.17	0.13
x iteración 4	1.19	1.64
hd Iteracion 5	6.99	6.33
hd diferencia 5	0.07	0.06
x iteración 5	1.20	1.65
hd Iteracion 6	7.02	6.35
hd diferencia 6	0.03	0.02
Convergencia	Si	Si
intervalo de salida hd final	7.02	6.35
Grado de utilización x final	1.21	1.66

Fuente: Elaboración propia.

parámetros que se requirieron son el tiempo de arribo m , el tiempo de servicio t_s y el periodo de análisis que por defecto es de 15 minutos (0.25 h). estos resultados están en la tabla 3.23

Cuadro 3.23: Determinación del Nivel de Servicio

Nivel de Servicio	Ingreso	
	O-E	N-S
Tasa de flujo (veh./h)	618	939
Intervalo de salida h_d	7.02	6.35
Grado de utilización x	1.21	1.66
Tiempo de arribo m (s)	2.00	2.00
Tiempo de servicio t_s (s)	5.02	4.35
Periodo de análisis T (h)	0.25	0.25
Demora (s)	133.65	319.89
Nivel de Servicio	F	F
Demora en la intersección (s)	226.77	
Nivel de Servicio	F	

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4.3.2 Jr. Garcilaso de la Vega - Jr. Bellido

La primera estimación de las demoras se realizó con el procedimiento de que establece el Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994), cuyo procedimiento se encuentra en el Anexo C-1, los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.24.

Cuadro 3.24: Resultados de medición de demoras en Jr. G. de la Vega - Jr. Bellido

Resultados	Jr. Bellido	Jr. G. de la Vega
Demora total de tiempos parados DTP (veh.-s)	960	1110
Demora media de vehículos que se paran DMP (s)	16.8	16.6
Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente DMPT (s)	12.3	5.3
Porcentaje de vehículos detenidos	73 %	32 %

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente metodología es la que provee del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, 2000) para intersecciones no semaforizadas de tipo de control de detención en todos sus afluentes AWSC (All-way-stop-controlled intersection), el procedimiento para



Figura 3.22: Jr. G. de la Vega - Jr. Bellido

Fuente: Elaboración propia

esta intersección es similar a la mostrada en la intersección de los jirones Arequipa y 3 Máscaras y está detallada en el Anexo C-3. En la tabla 3.25 se muestran los resultados de su análisis.

Cuadro 3.25: Determinación del Nivel de Servicio

Nivel de Servicio	Ingreso	
	O-E	S-N
Tasa de flujo (veh./h)	359	853
Intervalo de salida hd	6.28	5.07
Grado de utilización x	0.63	1.20
Tiempo de arribo m (s),	2.00	2.00
Tiempo de servicio ts (s)	4.28	3.07
Capacidad (veh./h)		
Periodo de análisis T (h)	0.25	0.25
Demora (s)	19.19	122.64
Nivel de Servicio	C	F
Demora en la intersección (s)	70.92	
Nivel de Servicio	F	

Fuente: Elaboración propia.

3.9.4.4 Resumen y análisis de las metodologías para estimar las demoras

Las principales metodologías que se usaron para evaluar las intersecciones por lo general son muy laboriosas, además que su que no cuentan con un largo alcance (la

metodologías del HCM y Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994) se han hecho para periodos de 15 min), a diferencia del modelamiento de estos, que no solo generó los parámetros calificativos de las intersecciones, sino que las evaluó en interacción las unas con las otras, para gestionar mejor su rendimiento.

En la tabla 3.26 se resumen las metodologías descritas, como se ve, las metodología de medición de campo que propone el Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SEDESOL, 1994) arroja resultados deficientes debido a la manera que establece su metodología, que es más eficiente solo intersecciones con semáforos, mientras en las intersecciones sin semáforo no es recomendable, hay que recordar también que esta metodología solo se basa en los vehículos que se detienen en la intersección, sin incluir factores como la geometría y las características del tránsito, como lo hace la metodología del HCM para ambos tipos de intersecciones, sin embargo la metodología del HCM solo se arroja resultados coherentes en intersecciones semaforizadas, la razón es que describe a mejor detalle la intersección, requiriendo de datos geométricos y del comportamiento del tránsito, la deficiencia del HCM solo se nota en su metodología para estimar demoras en intersecciones no semaforizadas, la principal razón es que esta metodología no caracteriza adecuadamente la intersección, bastándose solo en métodos probabilísticos en su procedimiento.

Por último se puede concluir en esta sección que una metodología adecuada para evaluar las intersecciones es la que implica el modelamiento, esta metodología parte de la simulación microscópica, consistente en simular el movimiento vehicular de la intersección de análisis a fin de emular el comportamiento real en el tiempo analizado, esta metodología al igual que la metodología del HCM, requiere de gran información de la zona a fin de predecir con mejor calidad el área de trabajo.

Cuadro 3.26: Resumen de demoras con distintas metodologías

Intersección	Calle	Control	Según medición	Demoras (s)	
				Según el HCM	Según el modelamiento
Jr. Sol - Jr. San Martín	Jr. Sol	con semáforo	17.1	47.4	21.5
	Jr. San Martín	con semáforo	21.3	62	15.9
Jr. Garcilaso - Jr. Lima	Jr. Garcilaso	con semáforo	12.8	13.7	8
	Jr. Lima	con semáforo	49.1	57.3	21
Jr. 9 de Dic. - Av. M. Cáceres	Jr. 9 de Diciembre	con semáforo	25.5	24	11.9
	Av. M. Cáceres E	con semáforo	17	30.9	14.2
	Av. M. Cáceres O	con semáforo	16.8	22.7	11.8
Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Jr. 3 Máscaras	sin semáforo	12.6	319.9	15.6
	Jr. Arequipa	sin semáforo	9.4	133.7	60.5
Jr. Garcilaso - Jr. Bellido	Jr. Garcilaso	sin semáforo	5.3	122.6	4.6
	Jr. Bellido	sin semáforo	12.3	19.9	3.6

Fuente: Elaboración propia.

3.9.5 Modelamiento

3.9.5.1 Software de modelamiento

Para realizar el modelamiento mesoscópico se hizo uso del software Vissim 9.00, por sus diversas herramientas y capacidad para desarrollar modelos de tráfico, además que su manejo y funcionamiento permitió desarrollar los propósitos de esta investigación.

Vissim es programa de análisis el tráfico que permite administrar redes viales, dentro de Vissim se pueden establecer componentes del tráfico, caracterizar el flujo vehicular y realizar una simulación de la red en funcionamiento, estas características le han convertido en una de las herramientas más conocidas en la ingeniería de tránsito y la planificación de transporte.

Vissim trabaja mediante la simulación vehicular en un sistema de tráfico, a través del manejo de datos estadísticos, arrojando parámetros de tránsito como los tiempo de viaje, longitudes de cola y demoras, resultados que sirvieron para evaluar la red vial que se está estudiando.

La metodología empleada para simular el comportamiento vehicular en redes, de manera física, fue desarrollada por el profesor Wiedemann en 1974, a partir de la distribución estocástica de la velocidad y desplazamientos. Luego paso a manos de la Universidad Técnica de Karlsruhe de Alemania donde se continuó la investigación en base a mediciones de campo para establecer una metodología calibrada con la que se creó Vissim (Vortisch, 2014).

Vissim es un programa que trabaja con diversos modelos de seguimiento vehicular enfocados principalmente en la microsimulación, sin embargo en sus últimas versiones ha desarrollado un componente que permite realizar la simulación a nivel mesoscópico, basada en la teoría de seguimiento de Mahut. La simulación a nivel mesoscópico en Vissim, permite obtener los suficientes parámetros de tránsito que se requiere para evaluar redes viales.

3.9.5.2 Volúmenes de entrada

De acuerdo al sistema de regulación de la zona central a septiembre de 2018, las calles que alimentan a la red están ubicadas como se muestra en la figura 3.23, en el modelamiento, a partir de estos puntos de alimentación, los vehículos serán distribuidos en toda la red de acuerdo a los datos de campo.

Los flujos que se asignaron a los puntos de alimentación, se obtuvieron del promedio de los aforos con intervalos de 5 min, durante la hora pico, con la finalidad de modelar el estado con máximos flujos horario en la red.

El cuadro 3.27 muestra el flujo horario máximo de los registros tomados cada 5 min, que son mayores en todos los casos al flujo total obtenido a lo largo de la hora pico, indicativo que la regulación de la alimentación no es homogénea durante esta hora, a pesar de tener estos los flujos máximos, se optó por uso del promedio de estos para modelar la hora pico, porque el uso de los flujos máximos significaría sobrecargar

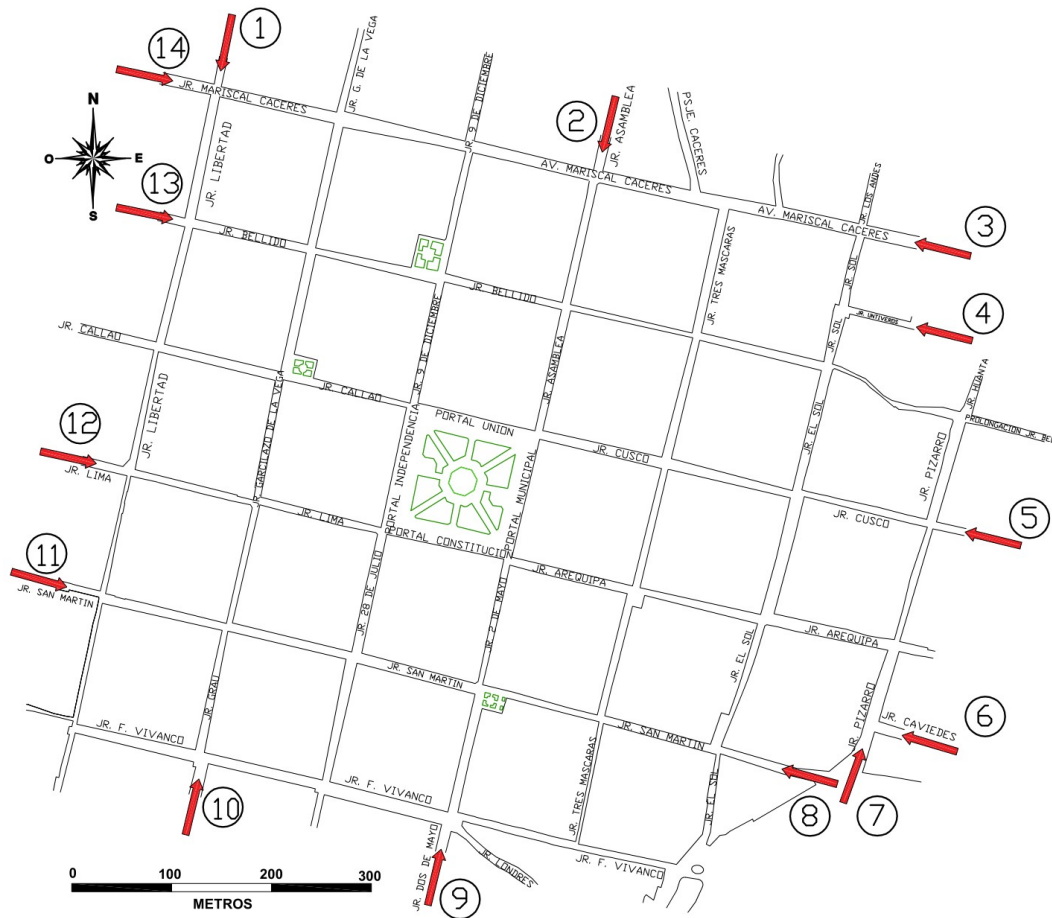


Figura 3.23: Entradas de flujos en la red de la Zona Central

Fuente: Elaboración propia.

la red, además que no se representaría adecuadamente el tráfico de la hora pico. En Vissim se asignó a los volúmenes de ingreso un comportamiento estocástico, para que la alimentación siga de forma heterogénea como lo es en la realidad.

La composición vehicular de los flujos de entrada establecidos en la figura 3.23, se muestran en el cuadro 3.28.

3.9.5.3 Prioridades de paso

Las prioridades de paso regulan los conflictos de paso de vehículos en una intersección con dos ingresos (Vissim, 2011), generalmente la prioridad de paso se utiliza en intersecciones donde una vía de menor categoría se une a una de mayor categoría, donde la prioridad de paso se la lleva la vía principal (en la práctica la vía que cargue

Cuadro 3.27: Flujos máximos y promedios en los afluentes de la red del sector central del Centro Histórico durante la hora pico

Nº	Entradas a la red	Flujo máx. (veh./h)	Flujo prom (veh./h)
1	Jr. Libertad	1132	888
2	Jr. Asamblea	944	751
3	Av. Mariscal Cáceres	1032	788
4	Jr. Untiveros	680	496
5	Jr. Cusco	234	146
6	Jr. Caviedes	1072	701
7	Jr. Pizarro	2444	1964
8	Jr. San Martín	984	838
9	Jr. 2 de mayo	772	713
10	Jr. Grau	800	592
11	Jr. San Martín	352	243
12	Jr. Lima	488	390
13	Jr. Bellido	444	324
14	Av. Mariscal Cáceres	76	41

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.28: Composición de flujo vehicular de afluentes a la red del Centro Histórico en la hora pico

Nº	Jr./Av.	Motocicleta	Mototaxi	Veh. Liviano	Bus	Camión
1	Jr. Libertad	25 %	3 %	55 %	16 %	1 %
2	Jr. Asamblea	36 %	0 %	63 %	0 %	1 %
3	Av. Mariscal Cáceres	30 %	18 %	46 %	5 %	1 %
4	Jr. Untiveros	45 %	6 %	46 %	0 %	3 %
5	Jr. Cusco	22 %	8 %	70 %	0 %	0 %
6	Jr. Caviedes	8 %	15 %	76 %	0 %	1 %
7	Jr. Pizarro	40 %	8 %	45 %	5 %	1 %
8	Jr. San Martín	45 %	0 %	54 %	0 %	1 %
9	Jr. 2 de mayo	33 %	5 %	50 %	12 %	0 %
10	Jr. Grau	36 %	16 %	48 %	1 %	0 %
11	Jr. San Martín	31 %	36 %	33 %	0 %	0 %
12	Jr. Lima	19 %	48 %	32 %	0 %	1 %
13	Jr. Bellido	28 %	2 %	69 %	0 %	1 %
14	Av. Mariscal Cáceres	41 %	5 %	52 %	0 %	3 %

Fuente: Elaboración propia.

mayor flujo vehicular o la vía con velocidades mayores). En un cruce de vías de similares características, la prioridad de paso es de tipo indeterminada, esto significa que los

vehículos pasan o intenten cruzar la intersección sin esperar o dar derecho de paso al vehículo de la otra vía de ingreso, bajo estas condiciones la intersección se expone al desorden vehicular y a la formación de congestión vehicular en las dos vías de ingreso.

Tras el estudio de las vías del Centro Histórico, se decidió asignar a casi todas sus intersecciones prioridades de paso como indeterminadas, porque a pesar que existen rutas definidas, la prioridad de paso no están completamente introducida al comportamiento del conductor ayacuchano (conductor agresivo) y la formación de colas se da en ambos afluentes a la intersección (ver figura 3.24).

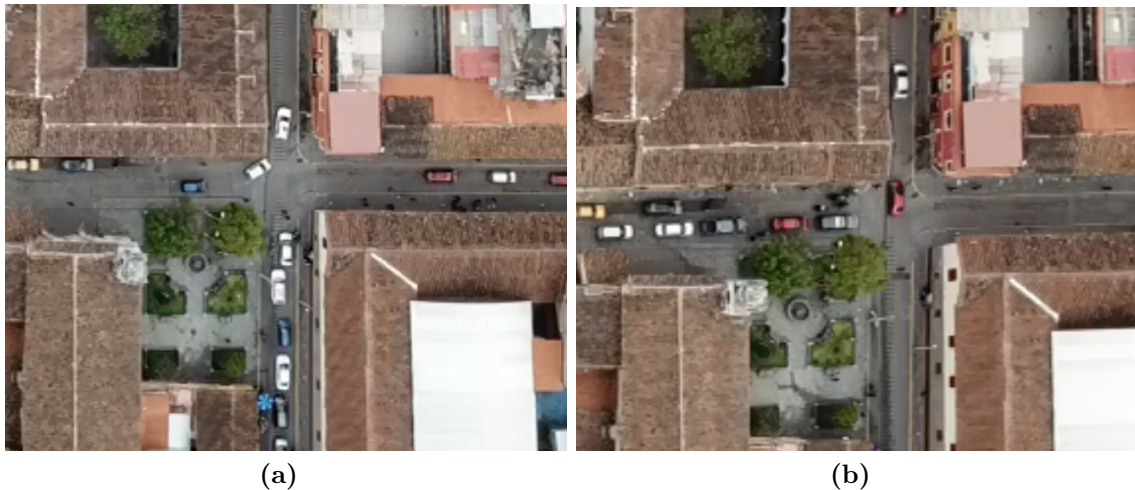


Figura 3.24: Intersección con prioridades de paso indeterminadas

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo a pesar que las vías del centro histórico tienen la misma categoría vehicular, existieron intersecciones donde se tuvo la necesidad de aplicar la prioridad de paso, estos casos se presentan entre las intersecciones del Jr. 3 Máscaras y el Jr. San Martín, donde el paso libre se le otorga a los vehículos del Jr. San Martín, debido a que su dirección hay una pendiente pronunciada (los vehículos avanzan contra pendiente) aquí generalmente los conductores del Jr. 3 Máscaras respetan el paso de los vehículos que suben por el Jr. San Martín (ver figura 3.25a); otro caso ocurre en la intersección de la Av. Mariscal Cáceres con el Jr. 3 Máscaras, donde el ingreso de los vehículos que

vienen del lado Este y Oeste de la Av. Mariscal Cáceres se apilan para ingresar al Jr. 3 Máscaras, aquí la prioridad la tienen los vehículos que ingresan del lado Oeste, por la facilidad que tienen para realizar el cambio de dirección con respecto a los vehículos del lado Este (ver la figura 3.25).



Figura 3.25: Intersecciones con prioridades de paso

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.29 se indican las calles donde se asignaron las prioridades de paso. En el modelamiento las prioridades de paso sirven para regular una adecuada distribución de los flujos vehiculares en intersecciones complejas, su uso permitió que el modelo se asemeje más a la realidad del movimiento de tráfico que ocurre en una intersección.

3.9.5.4 Distribución y asignación de rutas de flujo

La asignación de rutas se usó para controlar la distribución de vehículos por tipo desde los ingresos a toda la red del Sector Central, con este procedimiento el modelo toma la asignación estática para modelar los flujos dentro de la red.

La asignación de rutas sirvió para modelar algunas restricciones y características de tráfico en la red como:

- Prohibición del ingreso de mototaxis al Parque Central y calles colindantes
- Rutas asignadas para los omnibuses de transporte público

Cuadro 3.29: Prioridades de paso

Intersección	Prioridad
Jr. Libertad - Jr. Bellido	Indeterminada
Jr. Garcilaso de la V. - Av. Mariscal Cáceres	Indeterminada
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	Indeterminada
Jr. Grau - Jr. San Martín	Indeterminada
Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	Indeterminada
Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	Indeterminada
Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-O
Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	Indeterminada
Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Indeterminada
Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	Jr. San Martín
Jr. Cusco - Jr. Sol	Indeterminada
Jr. Bellido - Jr. Sol	Indeterminada
Jr. Pizarro - Jr. Bellido	Indeterminada
Jr. Pizarro - Jr. Cusco	Indeterminada

Fuente: Elaboración propia.

- Prohibición del ingreso de vehículos pesado a la Zona Central.

La distribución de flujos se elaboró a partir del aforamiento realizado en todas las intersecciones de la red, para una calle que ingresa a la intersección se asignaron tres posibles rutas que los vehículos puedan tomar: seguir en sentido recto (1), girar a la izquierda (2) o girar a la derecha (3) (ver la figura 3.26), y se excluyó el caso atípico de los giros en U, en el Anexo A-1 y A-2 se encuentran los resultados de las decisiones de ruta que todos los vehículos tomaron en las intersección de la red, la recolección de estos datos se hizo en conjunto a los trabajos de aforamiento.

En las tablas 3.30 y 3.31 se muestran los resultados de la recolección de datos realizados en el mes de septiembre de 2018 y marzo de 2019, para ambos casos se ha realizado una comparación en las intersecciones del sistema analizados a fin de corroborar que las variaciones de las distribuciones porcentuales de los flujo vehicular no varían para ambas fechas. Sin embargo cabe mencionar que en septiembre de 2018 el Jr. 28 de Julio estaba cerrado a diferencia de marzo de 2019, cuando se cerró por

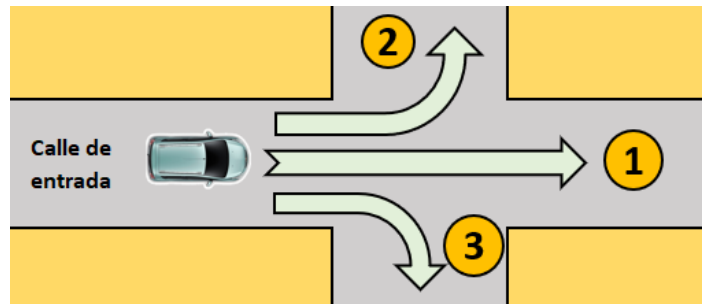


Figura 3.26: Asignación de rutas

Fuente: Elaboración propia.

mantenimientos 3 cuadras del Jr. Sol, estos cambios además modificaron algunas rutas de los servicios de transporte, se afectaron también la distribución de las esquinas directamente involucradas a las calles cerradas.

A pesar los cambios que sufrió el sistema, las distribuciones no se vieron afectadas en la mayoría de intersecciones, conservando similares las tendencias de distribución porcentual en ambas fechas de registro, con esto se concluye que el sistema puede ser modelado eficientemente mediante la asignación estática para predecir el tráfico vial a futuro.

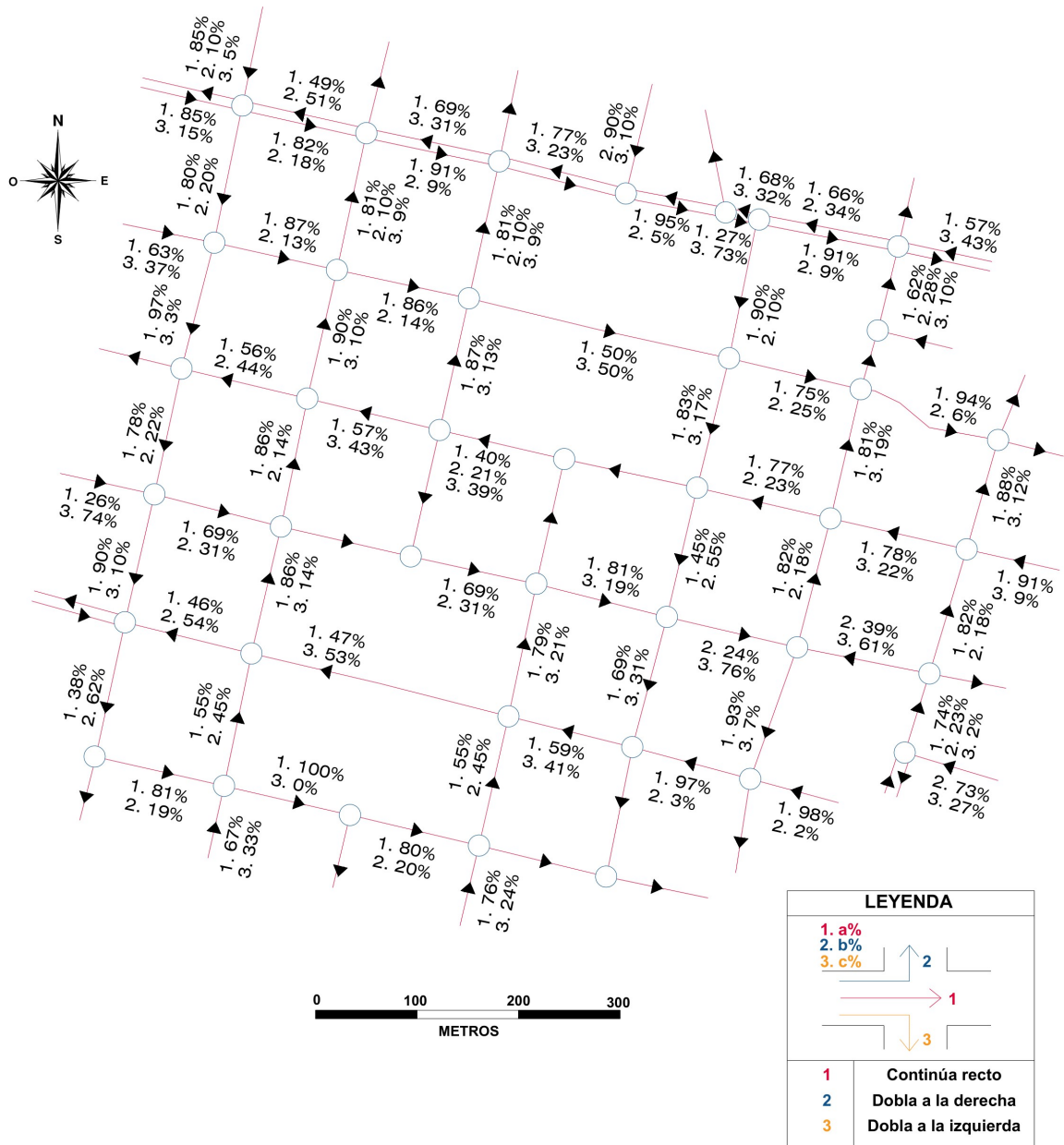


Figura 3.27: Diagrama de rutas Septiembre de 2018

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.30: Distribución de volúmenes registrados en el 2018 y 2019

N	Intersección	Ingreso	Distribución Sept. 2018			Distribución Marzo 2019			Observación		
			Flujo hor.	Dir. 1	Dir. 2	Dir. 3	Flujo hor.	Dir. 1		Dir. 2	Dir. 3
1	Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	Jr. Libertad	888	85 %	10 %	5 %	874	84 %	10 %	6 %	
		Av. M. Cáceres	359	49 %	51 %	-	347	44 %	56 %	-	
		Av. M. Cáceres	41	85 %	-	15 %	57	74 %	-	26 %	
2	Jr. Libertad - Jr. Bellido	Jr. Libertad	976	80 %	20 %	-	975	82 %	18 %	-	
		Jr. Bellido	324	63 %	-	37 %	332	61 %	-	39 %	
3	Jr. Libertad - Jr. Callao	Jr. Libertad	964	97 %	-	3 %	919	96 %	-	4 %	
		Jr. Callao	398	56 %	44 %	-	416	53 %	47 %	-	
4	Jr. Libertad - Jr. Lima	Jr. Libertad	1141	78 %	22 %	-	1073	78 %	22 %	-	
		Jr. Lima	390	26 %	-	74 %	425	23 %	-	77 %	
5	Jr. Libertad - Jr. San Martín	Jr. Libertad	999	90 %	-	10 %	1134	90 %	-	10 %	
		Jr. San Martín	610	46 %	54 %	-	540	63 %	37 %	-	
6	Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	Jr. Libertad	1475	38 %	62 %	-	1428	42 %	58 %	-	
7	Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	Jr. Garcilaso de la V	735	81 %	10 %	9 %	785	71 %	15 %	14 %	
		Av. M. Cáceres	127	82 %	18 %	-	148	86 %	14 %	-	
		Av. M. Cáceres	451	69 %	-	31 %	354	65 %	-	35 %	
8	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	Jr. Garcilaso de la V.	764	90 %	-	10 %	837	90 %	-	10 %	
		Jr. Bellido	389	87 %	13 %	-	299	68 %	32 %	-	
9	Jr. Garcilaso de la V - Jr. Callao	Jr. Garcilaso de la V.	701	86 %	14 %	-	776	85 %	15 %	-	
		Jr. Callao	521	57 %	-	43 %	478	53 %	-	47 %	
10	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	Jr. Garcilaso de la V.	689	86 %	-	14 %	762	90 %	-	10 %	
		Jr. Lima	426	69 %	31 %	-	380	74 %	26 %	-	
11	Jr. Grau - Jr. San Martín	Jr. Grau	560	55 %	45 %	-	661	60 %	40 %	-	
		Jr. San Martín	819	47 %	-	53 %	683	46 %	-	54 %	
12	Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	Jr. Grau	592	67 %	-	33 %	797	75 %	-	25 %	
		Jr. F. Vivanco	867	81 %	19 %	-	798	78 %	22 %	-	
13	Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres	429	77 %	-	23 %	361	72 %	-	28 %	
		Av. M. Cáceres	196	91 %	9 %	-	227	88 %	12 %	-	
		Jr. 9 de Diciembre	477	66 %	25 %	9 %	521	62 %	20 %	18 %	
14	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	Jr. 9 de diciembre	546	87 %	-	13 %	530	87 %	-	13 %	
		Jr. Bellido	404	86 %	14 %	-	286	87 %	13 %	-	
15	P. Unión - P. Independencia	Portal Unión	1202	40 %	21 %	39 %	860	36 %	23 %	42 %	
16	Jr. F. Vivanco - Jr. 28 de Julio	Jr. F. Vivanco	873	100 %	-	-	894	71 %	-	29 %	
17	Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	Jr. Asamblea	751	-	90 %	10 %	756	-	92 %	8 %	
18	P. Constitución - P. Municipal	Jr. 2 de Mayo	708	79 %	-	21 %	505	83 %	-	17 %	
		P. Constitución	629	69 %	31 %	-	521	59 %	41 %	-	

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.31: Distribución de volúmenes registrados en el 2018 y 2019

N	Intersección	Ingreso	Distribución Septiembre 2018			Distribución Marzo 2019			Observación		
			Flujo hor.	Dir. 1	Dir. 2	Dir. 3	Flujo hor.	Dir. 1		Dir. 2	Dir. 3
19	Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	Jr. 2 de Mayo	636	55 %	45 %	-	537	59 %	41 %	-	
		Jr. San Martín	997	59 %	-	41 %	838	71 %	-	29 %	
20	Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	Jr. 2 de Mayo	713	76 %	-	24 %	503	86 %	-	14 %	
		Jr. F. Vivanco	873	80 %	20 %	-	616	81 %	19 %	-	
21	Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres	504	68 %	-	32 %	1161	85 %	-	15 %	
		Av. M. Cáceres	1020	95 %	5 %	-	1030	93 %	7 %	-	
22	Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres	985	27 %	-	73 %	982	28 %	-	72 %	
		Av. M. Cáceres	771	66 %	34 %	-	1439	82 %	18 %	-	
23	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	Jr. 3 Máscaras	965	90 %	10 %	-	966	82 %	18 %	-	
		Jr. Bellido	361	50 %	-	50 %	389	47 %	-	53 %	
24	Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	Jr. 3 Máscaras	1102	83 %	-	17 %	1079	79 %	-	21 %	
		Jr. Cusco	425	77 %	23 %	-	486	72 %	28 %	-	
25	Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Jr. 3 Máscaras	1051	45 %	55 %	-	979	41 %	59 %	-	
		Jr. Arequipa	661	81 %	-	19 %	751	66 %	-	34 %	
26	Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	Jr. 3 Máscaras	661	69 %	-	31 %	577	74 %	-	26 %	
		Jr. San Martín	865	97 %	3 %	-	760	96 %	4 %	-	
27	Jr. Sol - Av. M. Cáceres	Jr. Sol	797	62 %	28 %	10 %	-	-	-	-	Jr. Sol cerrado
		Av. M. Cáceres	788	57 %	-	43 %	1175	62 %	-	38 %	
		Av. M. Cáceres	284	91 %	9 %	-	293	96 %	4 %	-	
28	Jr. Sol - Jr. Untiveros	Jr. Untiveros	496	-	100 %	-	0	-	-	-	Jr. Sol cerrado
29	Jr. Sol - Jr. Bellido	Jr. Bellido	285	75 %	25 %	-	314	100 %	0 %	-	Jr. Sol cerrado
		Jr. Sol	439	81 %	-	19 %	0	-	-	0 %	Jr. Sol cerrado
30	Jr. Sol - Jr. Cusco	Jr. Sol	477	82 %	18 %	-	0	-	0 %	-	Jr. Sol cerrado
		Jr. Cusco	437	78 %	-	22 %	304	100 %	-	0 %	Jr. Sol cerrado
31	Jr. Sol - Jr. Arequipa	Jr. Arequipa	989	-	24 %	76 %	797	33 %	-	67 %	
		Jr. Arequipa	385	-	39 %	61 %	0	-	-	-	Cambio de Sentido
32	Jr. Sol - Jr. San Martín	Jr. Sol	972	93 %	-	7 %	597	95 %	-	5 %	
		Jr. San Martín	838	98 %	2 %	-	723	96 %	4 %	-	
33	Jr. Pizarro - Jr. Bellido	Jr. Bellido	353	94 %	6 %	-	204	73 %	27 %	-	
		Jr. Pizarro	1542	88 %	-	12 %	1436	84 %	-	16 %	
34	Jr. Pizarro - Jr. Cusco	Jr. Cusco	146	91 %	-	9 %	130	78 %	-	22 %	
		Jr. Pizarro	1833	82 %	18 %	-	1506	85 %	15 %	-	
35	Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	Jr. Pizarro	2182	74 %	23 %	2 %	1401	98 %	-	2 %	
		Jr. Arequipa	-	-	-	-	217	60 %	40 %	-	Cambio de sentido
36	Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	Jr. Caviedes	701	-	73 %	27 %	504	-	88 %	12 %	

Fuente: Elaboración propia.

3.9.5.5 Parqueo vehicular

Los usos de parqueo vehicular fueron establecidos con la última Ordenanza Municipal N° 002-2018-MPH-A de la gerencia de transportes de la Municipalidad Provincial de Huamanga (MPH), encargado de establecer las zonas rígidas, zonas de parqueo vehicular y paraderos de transporte público en la ciudad de Ayacucho (MPH, 2006). Según la Ordenanza Municipal N° 002-2018-MPH-A dentro de la Zona Central se tienen los espacios de estacionamiento temporal mostrados en la tabla 3.32. Otras zonas de parqueo se identificaron en base al reconocimiento en campo.

Cuadro 3.32: Lugares declarados como zonas de parqueo

N	Calle/Jr./Av.	Cuadra	Márgen
1	Jr. 2 de Mayo	2da cuadra	Lado Oeste
2	Jr. 3 Máscaras	3ra, 4ta cuadra y 5ta Cuadra	Lado Oeste
3	Jr. San Martín	2da cuadra (Intersección Jr. Libertad y Jr. Grau)	Lado Norte
4	Jr. Lima	3ra cuadra	Lado Norte
5	Jr. Callao	4ta cuadra	Lado Norte
6	Jr. Bellido	1ra hasta la 7ma cuadra (Parque el Calvario hasta Jr. 3 Máscaras)	Lado Norte

Fuente: (MPH, 2006)

El tipo de estacionamiento que rige en la zona central del Centro Histórico es de tipo cordón, dentro de la red los anchos van desde el mínimo que ocupan las motocicletas, hasta los anchos ocupados por los vehículos livianos de entre 1.60 m a 2.20 m. En el modelamiento se adoptó las medidas que indica el Reglamento Nacional de Edificaciones en el artículo 65 del apartado A.010 donde para estacionamientos continuos se establece el ancho de 2.40 m (RNE, 2018), sin embargo para algunas calles, particularmente estrechas, se usó un ancho de 2.00 m, con el fin de no alterar el movimiento vehicular en el modelamiento.

Durante la hora pico de la mañana, se ha observado que en las zonas establecidas



Figura 3.28: Zona de estacionamiento en el Jr. Bellido

Fuente: Elaboración propia.

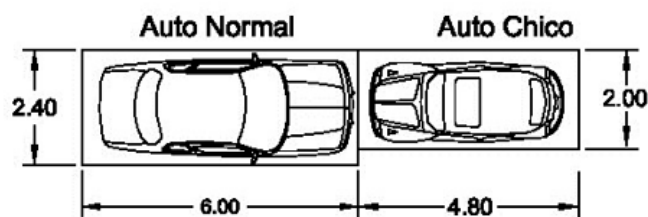


Figura 3.29: Medidas para estacionamientos en cordón

Fuente: Reglamento gráfico: Estacionamientos (2016)

para el parqueo vehicular, no se ocupan al 100 %, pero aun cuando los espacios de estacionamiento están libres, casi ningún vehículo invade estas zonas, estas consideraciones se consideraron en el modelamiento, donde se decide por obviar el modelamiento y simulación de los estacionamientos, puesto que su detallado vendría mejor en un modelo microscópico y no afecta los fines de esta investigación.

En la figura 3.30 se puede ver los usos de las zonas de parqueo y su ocupación durante la hora pico de la mañana, las capturas fueron obtenidas de las grabaciones aéreas, de las grabaciones y de las inspecciones de campo se estimó el nivel de ocupación de las zonas de paqueo que se muestra en el cuadro 3.33 durante la hora pico de la mañana.



(a) Jr. 2 de Mayo (Parqueo lado superior)



(b) Jr. 3 Máscaras (Parqueo lado superior)



(c) Jr. San Martín (Parqueo lado superior)



(d) Jr. Lima (Parqueo lado superior)



(e) Jr. Callao (Parqueo lado superior)



(f) Jr. Bellido (Parqueo lado superior)

Figura 3.30: Usos de estacionamiento

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.33: Usos de espacios de estacionamiento - hora pico de la mañana

N	Calle/Jr./Av.	Delimitación	Uso
1	Jr. 2 de Mayo	Entre el Jr. Arequipa y el Jr. San Martín	85 %
2	Jr. 3 Máscaras	Entre el Jr. Arequipa y el Jr. Cusco	60 %
3	Jr. 3 Máscaras	Entre el Jr. Cusco y el Jr. Bellido	60 %
4	Jr. 3 Máscaras	Entre el Jr. Bellido y la Av. Mariscal Cáceres	75 %
5	Jr. San Martín	Entre el Jr. Libertad y el Jr. Grau	50 %
6	Jr. Lima	Entre el Jr. Libertad y el Jr. Garcilaso de la Vega	75 %
7	Jr. Callao	Entre el Jr. Libertad y el Jr. Garcilaso de la Vega	50 %
8	Jr. Bellido	Entre el Jr. Libertad y el Jr. Garcilaso de la Vega	75 %
9	Jr. Bellido	Entre el Jr. Garcilaso de la Vega y el Jr. 9 de diciembre	95 %
10	Jr. Bellido	Entre el Jr. 9 de diciembre y el Jr. Asamblea	100 %
11	Jr. Bellido	Entre el Jr. Asamblea y el Jr. 3 Máscaras	85 %

Fuente: Elaboración propia

3.9.5.6 Sistema de semaforización

Actualmente los semáforos en la zona central funcionan en su mayoría de manera independiente, casi ningún semáforo se sincroniza con otro, y no hay un sistema de control inteligente para su funcionamiento.

Los semáforos en la red se encuentran distribuidos de acuerdo a la disposición de la gerencia de transportes de la Municipalidad, en figura 3.31 se muestran las ubicaciones de los semáforos en la red de trabajo.

Para este estudio, a fin de tener un fiel modelo de la realidad, se midieron los tiempos de los semáforos y se verificó si existe alguna sincronización entre ellos (a fin de cargar al modelo esta esa sincronía). En el cuadro 3.34 se muestra los tiempos del semaforizado, donde se consideró solo los tiempos de rojo y verde, el color ámbar no se consideró en este estudio porque su duración se puede despreciar, además tanto vehículos como

Cuadro 3.34: Duración de semáforos en la Zona Central

Nº	Intersección (Av./Jr.)	Dirección (Av./Jr.)	Duración (s)		
			Verde	Rojo	Total
1	Libertad - Mariscal	Libertad	48	27	75
2	Libertad - Callao	Libertad	52	23	75
3	Libertad - Lima	Libertad	50	25	75
4	Libertad - San Martín	Libertad	50	35	85
5	Grau - F. Vivanco	Grau	35	45	80
6	Grau - Lima	Grau	42	23	65
7	Garcilaso - Callao	Garcilaso	40	30	70
8	9 de Diciembre - M. Cáceres	9 de diciembre	33	30	63
9	9 de Diciembre - Callao	Callao	38	22	60
10	28 de Julio - Lima	Lima	45	20	65
11	28 de Julio - San Martín	San Martín	48	17	65
12	28 de Julio - F. Vivanco	28 de Julio	15	50	65
13	2 de Mayo - F. Vivanco	F. Vivanco	42	35	77
14	2 de Mayo - Arequipa	2 de Mayo	40	30	70
15	Asamblea - Cusco	Asamblea	46	24	70
16	Asamblea - Bellido	Bellido	60	26	86
17	Asamblea - M. Cáceres	Asamblea	48	38	86
18	3 Máscaras - M. Cáceres	M. Cáceres	45	18	63
19	3 Máscaras - Bellido	3 Máscaras	50	25	75
20	F. Vivanco - San Lorenzo	F. Vivanco	47	38	85
21	Sol - M. Cáceres	M. Cáceres	42	38	80
22	Sol - San Martín	Sol	34	26	60

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.35: Semáforos con periodo de 75 s

Nº	Intersección con semáforo (Av./Jr.)	Rumbo del semáforo (Av./Jr.)	Sincronización (s)		
			Inicio en Verde	transición a Rojo	Final de Rojo
1	Libertad - Mariscal	Libertad	0	48	75
2	Libertad - Callao	Libertad	70	18	13
3	Libertad - Lima	Libertad	62	12	74

Fuente: Elaboración propia

3.9.5.7 Comportamiento vehicular mesoscópico

El tránsito de la ciudad de Ayacucho como en la mayoría ciudades del Perú, no tienen un funcionamiento ordenado a causa de la poca instrucción y colaboración de los conductores provocando la formación del caos vehicular. En el software se incorpora esta actitudes modelando la invasión de carriles, adelantamientos en un solo carril, el tránsito mixto de vehículos y otras actitudes de los conductores.

Los parámetros del comportamiento de conducción afectan directamente al comportamiento vehicular dentro de la red (PTV, 2013, p. 158), su calibración se realiza con los videos realizados sobre la zona. Los parámetros a nivel mesoscópico que afectan el comportamiento vehicular son:

- Tiempo de reacción
- Separación en detención
- Velocidades

3.9.5.7.1 Tiempo de reacción

Este tiempo de reacción se refiere al tiempo en que el conductor tarda en reaccionar al movimiento del conductor que tiene en frente, generalmente su valor varía entre los 0.1 y los 2 segundos (Cal *et al.*, 1994), para esta investigación teniendo en cuenta las grabaciones del flujo vehicular se decidió tomar el valor de 0.1 s.

3.9.5.7.2 Separación en detención

En la meso simulación este valor se refiere a la distancia en detención entre los vehículo más la distancia efectiva del vehículos, para el modelo el valor adoptado fue de 1.2 m como mínimo.

3.9.5.8 Velocidades

La velocidad se establece como una razón de movimiento de distancia entre tiempo (generalmente con unidades de *km/h*).

La velocidad de los vehículos dentro de la red, están limitados por la morfología del sistema y la congestión típica presente en zonas centrales de las ciudades. En el caso del sistema analizado la longitud promedio de una cuadra va entre de 100 a 120 m, esto influye en el desarrollo de la velocidad del vehículo.

3.9.5.8.1 Velocidad a flujo libre

La velocidad a flujo libre se utiliza para modelar la velocidad deseada del vehículo sin que éste tenga restricciones de demora en su recorrido, así esta velocidad es mayor que la velocidad promedio de viaje.

En campo se hicieron mediciones de las velocidades de vehículos en distintos puntos de la red, los recorridos de los vehículos siempre cumplían en no tener restricciones de demoras durante el registro de su velocidad. En la tabla 3.36 se muestran las velocidades a flujo libre promedio para cada tipo de vehículo.

Cuadro 3.36: Velocidades en km/h de vehículos dentro de la Zona Central

Vehículos	Prom. (km/h)
Motocicletas	30.1
Mototaxis	23.2
Vehículos livianos	29.0
Bus	23.7
Camiones	20.3

Fuente: Elaboración propia

3.9.5.8.2 Velocidad promedio de viaje

La velocidad promedio de viaje se estimó con el registro del tiempo de recorrido o viaje, para una longitud de carretera, en esta medición se incluyeron todos los tiempos de demoras debido a los obstáculos en su recorrido.

Se definieron rutas de viaje y a distintos vehículos, para medir la velocidad promedio de viaje característico del sistema. Con las grabaciones aéreas se definieron 10 corredores de dos cuadras cada una, sus características se pueden en el cuadro 3.37, en cada corredor se considera la interrupción por semáforos e interrupción por vehículos. Una vez establecido los corredores se registraron los tiempos de viaje de 30 vehículos en cada recorrido, para estimar la velocidad promedio. Para esta investigación se ha visto necesario considerar las velocidades de viaje de vehículos con tamaño estándar, obviando para este fin a los camiones y las motocicletas, cuyas velocidades y número, respectivamente, no son representativos.

Cuadro 3.37: Características de los corredores

Nº	Corredor de recorrido		Recorr.	Dist. (m)	Intersecciones libre.		Nº de Carriles
	Origen	Destino			Semaf.		
1	Jr. 2 de May. - Jr. F. Vivanco	Jr. San Martín - Jr. 28 de Jul.	2M-SM	262	2	1	1
2	Jr. San Martín - Jr. Libertad	Jr. C. F. Vivanco - Jr. Grau	Lib-FV	260	2	1	2
3	Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	Jr. 9 de Dic. - Jr. Callao	Mun-Uni	244	1	2	3
4	Jr. Pizarro - Jr. San Martín	Jr. Sol - Jr. Arequipa	Piz-Are	267	3	0	1
5	Jr. Pizarro - Jr. S. Martín	Jr. 3 Máscaras - Jr. S. Martín	SM-SM	242	2	1	1
6	Jr. Cusco - Jr. 3 Máscaras	Jr. Sol - Jr. Arequipa	3M-Are	259	3	0	1
7	Av. M. Cáceres - Jr. Sol	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	MC-3M	283	1	2	1
8	Jr. G. Vega - Av. M. Cáceres	Jr. Libertad - Jr. Bellido	MC-Lib	275	2	1	1
9	Jr. 9 de Dic. - Jr. Bellido	Av. M. Cáceres - Jr. Asam.	9D-MC	273	2	1	1
10	Jr. Libertad - Jr. Callao	Jr. Lima - Jr. G. de la Vega	Lib-Lim	266	1	2	1

Fuente: Elaboración propia

La velocidad promedio de viaje en estos recorridos cortos se estimó de acuerdo al cuadro , aquí se ve que el promedio de la velocidad es 13.3 km/h.

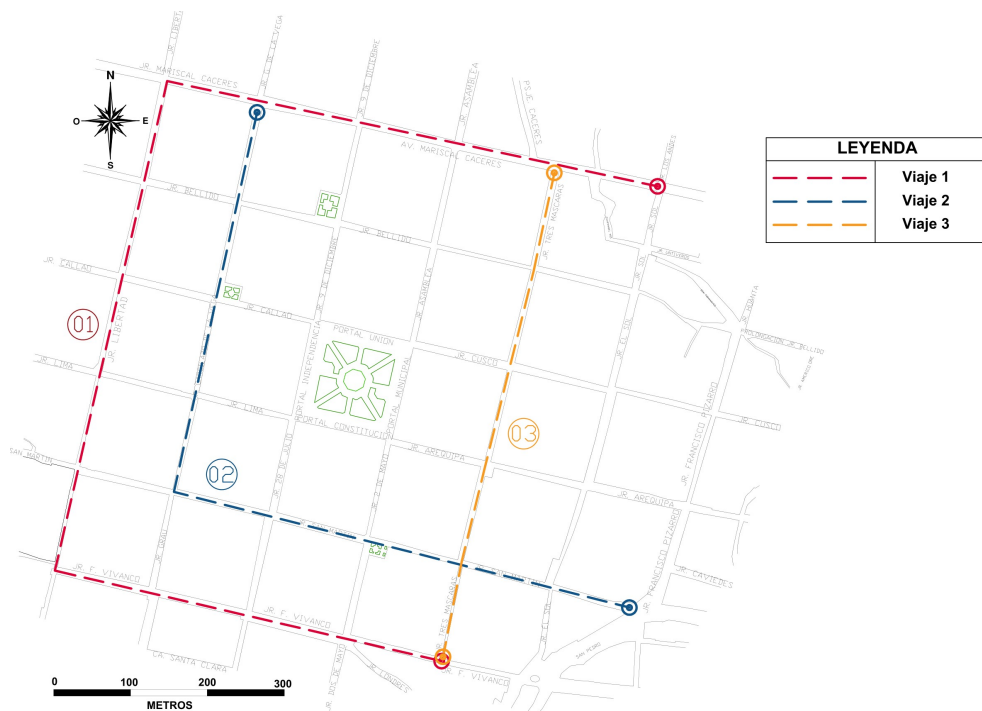
Por otro lado se realizó un registro en campo de tiempos de viaje en recorridos más largos, con rutas típicas que realizan los vehículos al circular el centro histórico, estas rutas se muestran en el imagen 3.32 y allí se midieron los tiempos de viaje mediante el seguimiento con motocicleta a vehículos al azar, este trabajo se ejecutó durante la hora pico.

En la tabla 3.39 se resume el registro de velocidades promedio para las rutas de viaje mostradas en la figura 3.32, aquí podemos percibir que la velocidad se reduce en un

Cuadro 3.38: Registro de velocidades promedio

Nº	Recorrido	Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad (km/h)
1	2M-SM	262	86	11.0
2	Lib-FV	260	97	9.6
3	Mun-Uni	244	62	14.2
4	Piz-Are	267	57	16.9
5	SM-SM	242	53	16.4
6	3M-Are	259	60	15.5
7	MC-3M	283	66	15.4
8	MC-Lib	275	82	12.1
9	9D-MC	273	89	11.0
10	Lib-Lim	266	92	10.4
			Vel Prom:	13.3

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.32:** Mapa de rutas de viaje

Fuente: Elaboración propia.

tramo que cuenta con más semáforos, y lo contrario pasa cuando estos disminuyen en el tramo de recorrido. Para fines de esta investigación se decide obtener la velocidad promedio de viaje dentro de la red al promedio entre los registros de la tabla 3.38 y la tabla 3.39, luego el valor de la velocidad promedio de viaje es de 12.9 km/h.



Figura 3.33: Trabajos de medición de tiempos de viaje

Fuente: Elaboración propia.

El valor de velocidad promedio será utilizado para poder estimar la densidad de vehículos dentro de la red, además como vemos se obtiene a partir de un cálculo aproximado. Posteriormente se obtendrá el valor promedio de velocidad a partir de la simulación del modelo.

Cuadro 3.39: Registro de velocidades promedio en rutas largas

Nº	Corredores de recorrido		Dist. (m)	Nº de nodos		T prom (s)	Vel prom (km/h)
	Origen	Destino		Libre	Semaf.		
1	Jr. Sol - Av. M. Cáceres	Jr. F. Vivanco - Jr. 3 Máscaras	1828	5	10	692	9.51
2	Jr. Cusco - Jr. Pizarro	Jr. G. de la Vega - Av. M. Cáceres	1123	6	4	307	13.17
3	Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	650	1	5	197	11.88

Fuente: Elaboración propia

3.9.5.9 Densidad y volumen vehicular en la red

El buen funcionamiento mesoscópico de la red, que evalúe el estado pico de la red, se garantizó, introduciendo una masa vehicular previa, por puntos estratégicos en la red, a fin de alcanzar una densidad inicial de trabajo.

Por teoría de flujo, la densidad vehicular viene definido como el número de vehículos que ocupa cierta longitud de un carril, expresada generalmente con vehículos por kilómetros, la ecuación de la densidad se expresa como la expresión 3.2.

$$D = \frac{v}{S} \quad (3.2)$$

Donde:

v : Razón de flujo (veh./h).

S : Velocidad promedio de viaje.

D : Densidad (veh./km/carril).



Figura 3.34: Siglas para las cuadras dentro de la red

Fuente: Elaboración propia.

La imagen 3.34 establece unas siglas para cada cuadra dentro del sector analizado, en cada una de éstas, se ha obtenido su densidad, de acuerdo a los trabajos de aforo realizados en las intersecciones.

Las densidades y volúmenes promedio se calculan con los datos de campo. De acuerdo

a la fórmula 3.2, donde la velocidad promedio, estimada con tiempos de viaje, es de 12.9 km/hr, la razón de flujo se muestran ordenados en los cuadros 3.40 y 3.41.

Además de acuerdo a las siglas de la imagen 3.34, los cuadros 3.40 y 3.41, contienen las densidades de cada cuadra en la red, así como la cantidad promedio de vehículos que circulan en su tramo. Con estas densidades se puede deducir que la cantidad de vehículos promedio en el sector central del Centro Histórico durante la hora pico es de aproximadamente 490 veh., que se traduce en una densidad total de 56 veh./km.

El modelamiento utilizó la densidad calculada para establecer un momento inicial de modelación, para que el modelo represente la hora pico durante la simulación. Para llegar a este punto, se cargaron entradas de vehículos dentro del sistema, en puntos estratégicos de cada cuadra, de acuerdo a su flujo horario y con la misma proporción vehicular que se registró en los puntos mencionados.

3.9.6 Calibración del modelamiento

El modelamiento en Vissim, para un sistema mesoscópico, implicó que el tráfico simulado debe distribuirse de forma realista a lo largo de todos los componentes de la red. El procedimiento de trabajo en Vissim, seguido para armar una red mesoscópica, consistió en armar la red estableciendo la distribución de las vías y su interacción con otras, a partir de los nodos, cada uno de éstos elementos con sus propias características (número de carriles, direcciones en el caso de los enlaces e ingresos y salidas en el caso de los nodos); una vez establecida la forma red, se procedió con la caracterización de ésta, incluyendo los volúmenes de tráfico a los enlaces exteriores o puntos de ingreso, cada flujo a su vez se distribuyó proporcionalmente en cada ramal de toda la red. El último paso consistió en el detallado o la caracterización general de la red, incluyendo las restricciones para paradas de tráfico, el comportamiento vehicular entre otros.

El modelo generado en VISSIM, trabaja a partir del modelo de seguimiento simplifi-

Cuadro 3.40: Densidades durante la hora pico en cuadras del Centro Histórico

N	Av./Jr.	Cuadra	Flujo hr. (veh./h)	Densidad (veh./km)	Long (m)	Veh / cuadra
1	Jr. Libertad	Lib 1	976	76	133.25	10
2	Jr. Libertad	Lib 2	964	75	128.19	10
3	Jr. Libertad	Lib 3	1141	88	126.79	11
4	Jr. Libertad	Lib 4	999	77	129.47	10
5	Jr. Libertad	Lib 5	1475	114	136.64	16
6	Jr. Garcilaso de la V	GV 1	735	57	133.14	8
7	Jr. Garcilaso de la V.	GV 2	764	59	130.07	8
8	Jr. Garcilaso de la V.	GV 3	701	54	128.91	7
9	Jr. Grau	Gra 1	689	53	128.3	7
10	Jr. Grau	Gra 2	560	43	133.35	6
11	Jr. 9 de Diciembre	9D 1	477	37	133.78	5
12	Jr. 9 de diciembre	9D 2	546	42	133.03	6
13	Portal Independencia	PI	347	27	127.74	3
14	Portal Municipal	PM	728	56	126.03	7
15	Jr. 2 de Mayo	2M 1	708	55	133.42	7
16	Jr. 2 de Mayo	2M 2	636	49	130.63	6
17	Jr. 3 Máscaras	3M 1	965	75	135.82	10
18	Jr. 3 Máscaras	3M 2	1102	85	131.51	11
19	Jr. 3 Máscaras	3M 3	1051	81	130.77	11
20	Jr. 3 Máscaras	3M 4	661	51	132.68	7
21	Jr. 3 Máscaras	3M 5	492	38	130.29	5
22	Jr. Sol	Sol 1	797	62	141.09	9
23	Jr. Sol	Sol 2	439	34	130.75	4
24	Jr. Sol	Sol 3	477	37	131.29	5
25	Jr. Sol	Sol 4	972	75	137.63	10
26	Jr. Sol	Sol 5	945	73	93.67	7
27	Jr. Pizarro	Piz 1	1542	120	112.17	13
28	Jr. Pizarro	Piz 2	1833	142	127.79	18
29	Jr. Pizarro	Piz 3	2182	169	126.03	21
30	Av. M. Cáceres	MC 1 E-O	359	28	125.02	3
31	Av. M. Cáceres	MC 1 O-E	127	10	125.02	1
32	Av. M. Cáceres	MC 2 E-O	451	35	133.83	5
33	Av. M. Cáceres	MC 2 O-E	196	15	133.83	2
34	Av. M. Cáceres	MC 3 E-O	429	33	128.83	4
35	Av. M. Cáceres	MC 3 O-E	229	18	128.83	2
36	Av. M. Cáceres	MC 4 E-O	504	39	131.96	5
37	Av. M. Cáceres	MC 4 O-E	985	76	131.96	10
38	Av. M. Cáceres	MC 5 E-O	771	60	141.4	8
39	Av. M. Cáceres	MC 5 O-E	284	22	141.4	3
40	Jr. Bellido	Bel 1	389	30	124.06	4
41	Jr. Bellido	Bel 2	404	31	133	4
42	Jr. Bellido	Bel 3	361	28	128.91	4

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.41: Densidades durante la hora pico en cuadras del Centro Histórico

N	Av./Jr.	Cuadra	Flujo hr. (veh./h)	Densidad (veh./km)	Long (m)	Veh / cuadra
43	Jr. Bellido	Bel 4	361	28	134.13	4
44	Jr. Bellido	Bel 5	285	22	133.24	3
45	Jr. Bellido	Bel 6	353	27	147.31	4
46	Jr. Callao	Cal 1	398	31	127.51	4
47	Jr. Callao	Cal 2	521	40	133.94	5
48	Portal Unión	PU	1202	93	126.1	12
49	Jr. Cusco	Cus 1	476	37	133.89	5
50	Jr. Cusco	Cus 2	425	33	135.95	4
51	Jr. Cusco	Cus 3	437	34	137.51	5
52	Jr. Lima	Lim 1	426	33	128.77	4
53	Jr. Lima	Lim 2	414	32	131.18	4
54	P. Constitución	PC	629	49	126.61	6
55	Jr. Arequipa	Are 1	661	51	132.71	7
56	Jr. Arequipa	Are 2	989	77	131.84	10
57	Jr. Arequipa	Are 3	385	30	132.83	4
58	Jr. San Martín	SM 1	610	47	128.41	6
59	Jr. San Martín	SM 2	819	64	129.19	8
60	Jr. San Martín	SM 3	819	63	131.45	8
61	Jr. San Martín	SM 4	997	77	126.76	10
62	Jr. San Martín	SM 5	865	67	120.33	8
63	Jr. San Martín	SM 6	838	65	90.03	6
64	Jr. F. Vivanco	FV 1	867	67	129.64	9
65	Jr. F. Vivanco	FV 2	873	68	127.31	9
66	Jr. F. Vivanco	FV 3	873	68	130.59	9
67	Jr. F. Vivanco	FV 4	962	75	129.12	10
68	Jr. F. Vivanco	FV 5	1454	113	102.36	12

Fuente: Elaboración propia

cado de Mahut, que no hace importancia a las aceleraciones de los vehículos, de esta manera puede acelerar el proceso que conllevaría realizar el modelo de seguimiento de Wiedemann que se usa más en modelos microscópico, este tiempo de cálculo rápido es una gran ventaja para la mesosimulación. Otro punto a resaltar en los modelos de mesosimulación, es el detalle, a diferencia del modelo microscópico, que tiene un nivel de detalle altísimo, a nivel mesoscópico estos detalles se reducen, en este modelo no se detallan ni los estacionamientos, ni las paradas de buses ni la interacción entre vehículos y peatones, estos detallados solo es recomendado en la microsimulación.

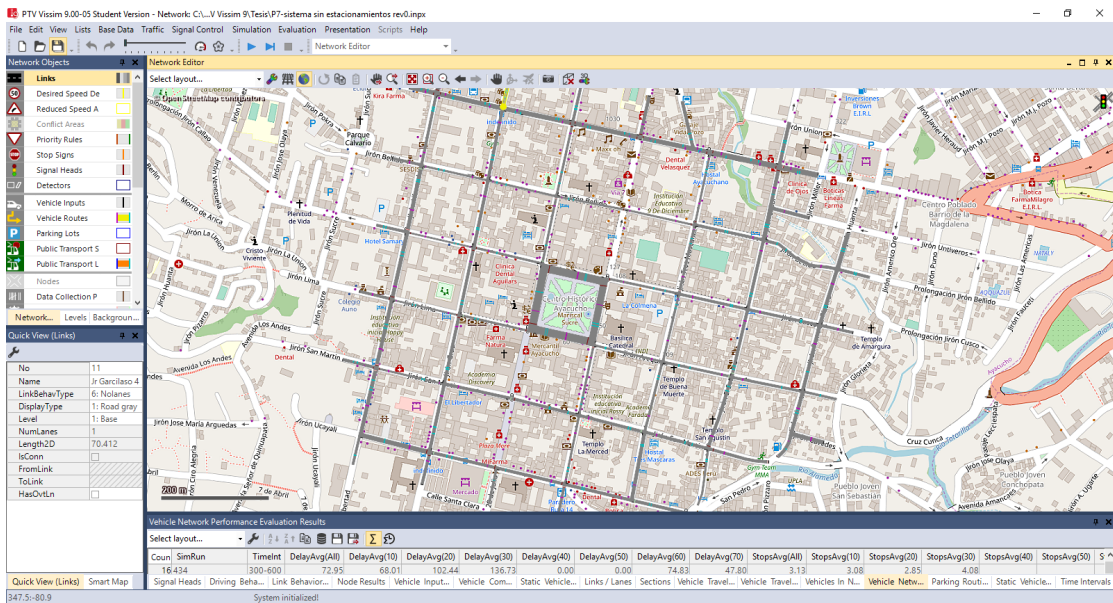


Figura 3.35: Modelado en VISSIM

Fuente: Captura del modelo en VISSIM.

Con el modelo generado, otro punto importante, para garantizar su comportamiento realista es el tiempo de estabilidad, que indica el tiempo necesario para que el sistema completo alcance una densidad vehicular casi constante. En este caso a diferencia de una microsimulación, los volúmenes fueron cargados dentro del sistema de acuerdo a la proporción registrada en cada zona, hasta alcanzar la densidad promedio calculada en base a los aforos de campo, al hacer esto el tiempo de estabilidad se redujo un mínimo aceptable.

La variación de la densidad del flujo vehicular del sistema en función al tiempo se muestra en la figura 3.36, esto se logró antes del primer minuto, además el gráfico muestra la variación de cada tipo de vehículo dentro del sistema, a partir de volúmenes estocásticos en su ingreso, viéndose que las densidades por tipo de vehículo también se mantienen estables. Luego se decide que la densidad vehicular es estable a partir del primer minuto, para fines de esta investigación.

Dado que en Vissim trabaja con un modelo estocástico, el patrón de carga de tráfico

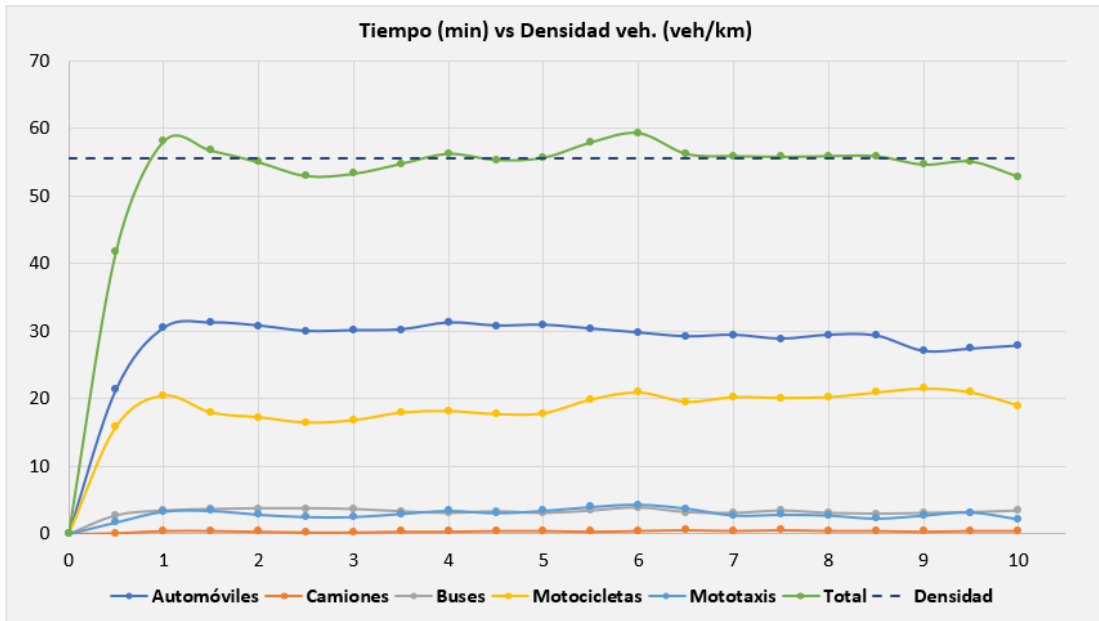


Figura 3.36: Densidad vehicular en la red durante la simulación

Fuente: Elaboración propia.

durante una simulación no es exactamente igual a los valores asignados, Vissim aplica una variación a este ingreso. La variación es aleatoria, pero esta aleatoriedad está determinada por el valor de la semilla aleatoria, para Vissim el valor de la semilla aleatoria va entre 1 a 99999. En esta investigación se usa las mismas semillas aleatorias para todas las pruebas, sus valores van del 15 al 24, cada ejecución tiene un valor diferente para la semilla aleatoria.

El siguiente paso en la modelación es constatar la calibración del sistema, para este paso se utilizó el indicador GEH muestra la bondad de ajuste del modelo, relacionando la diferencia absoluta y la diferencia porcentual entre los volúmenes de tráfico observados y los modelados usando la ecuación 3.3.

$$GEH = \sqrt{\frac{(E - V)^2}{(E + V)/2}} \quad (3.3)$$

Donde:

GEH : Indicador estadístico

E : Volumen del modelo

V : Volumen medido en campo

El criterio de aceptación se basó en considerar correctos los casos donde el valor del GEH sea menor de 5 ($GEH < 5$), y aun cuando la gama del valor de GEH que vaya de 5.0 a 10.0 puede garantizarse como aceptable de acuerdo al procedimiento de esta metodología, además en el criterio se puede adaptar en redes, que en el 85 % de los volúmenes del sistema se debe tener un GEH menor a 5, para que el modelo se considere calibrado. Si GEH es mayor a 10.0 hay una alta probabilidad de que exista un problema con el modelo o que esté mal calibrado.

Al analizar una red de tamaño mesoscópica, la calibración se realizó teniendo en cuenta que se contó con 41 nodos y en cada uno de ellos además existen entre 1 a 3 afluentes, que serán calibrados de acuerdo al volumen registrado en campo.

En las tablas 3.42 y 3.43 se muestran los resultados de la calibración, entre los flujos obtenidos en campo, con los resultados de 247 corridas del modelo. Se analizaron 41 intersecciones, de entre estas se analizaron 81 casos, las tablas muestran que en ningún caso el valor de GEH excede el 10, para los flujos totales, por lo que la simulación alcanza un buen nivel de calibración, cumpliendo con el 87 % de los casos (71 casos) con $GEH < 5$ y solo para el 13 % de los casos (10 casos) se cumple que el GEH varíe entre 5 y 10; además en las tablas 3.42 y 3.43 se añadió el GEH de los vehículos livianos, por del tipo de vehículo más representativo en la red, obteniendo que incluso el sistema está calibrado para estos vehículos, por tanto el modelo es apto para su aplicación.

3.9.7 Confiabilidad del modelamiento

Basado en el procedimiento de estimar una adecuada confiabilidad en los resultados del modelamiento, se usó el método de la Administración Federal de Carreteras (FHWA).

que propuso una metodología para estimar el número apropiado de ejecuciones de simulación requeridas (FHWA, 2004) para obtener resultados válidos (ver sección 2.3.7).

El parámetro más estudiado en esta investigación es la demora por vehículo en cada intersección, este parámetro tanto en campo como en el modelamiento presenta valores inconstantes, por esta variabilidad se requirió de una cantidad de corridas para estimar un valor congruente y válido.

Dado que el valor de la demora tendía a ser inconstante, la metodología del clásica del HCM no sería adecuada para estimar estos resultados, por su naturaleza determinista y porque se basa solo a un periodo breve de tiempo.

En el modelamiento se realizaron finalmente 247 corridas, con el que se obtuvieron la precisión mostrada en la tabla 3.44, en la determinación de las demoras por vehículo en las intersecciones, la tabla muestra el promedio por intersección.

Cuadro 3.42: Calibración de volúmenes vehiculares

Intersección	Ingreso por:	Autos (aforo)	Vol. (aforo)	Auto del Modelo	Vol. del Modelo	GEH Autos	GEH	Verif.
Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	Jr. Libertad	479	888	454	814	1	3	verificada
	Av. M. Cáceres-E	202	359	213	447	1	4	verificada
	Av. M. Cáceres-O	20	41	13	40	2	0	verificada
Jr. Libertad - Jr. Bellido	Jr. Libertad	475	976	467	920	0	2	verificada
	Jr. Bellido	233	324	220	320	1	0	verificada
Jr. Libertad - Jr. Callao	Jr. Libertad	574	964	420	834	7	4	verificada
	Jr. Callao	257	398	253	427	0	1	verificada
Jr. Libertad - Jr. Lima	Jr. Libertad	665	1141	567	1121	4	1	verificada
	Jr. Lima	131	390	120	380	1	1	verificada
Jr. Libertad - Jr. San Martín	Jr. San Martín-O	76	243	73	240	0	0	verificada
	Jr. Libertad	449	999	427	1041	1	1	verificada
	Jr. San Martín-E	285	610	287	647	0	1	verificada
Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	Jr. Libertad	701	1475	694	1534	0	2	verificada
Jr. Garcilaso - Av. M. Cáceres	Jr. Garcilaso	440	735	474	847	2	4	verificada
	Av. M. Cáceres-O	92	127	80	127	1	0	verificada
	Av. M. Cáceres-E	258	451	227	467	2	1	verificada
Jr. Garcilaso - Jr. Bellido	Jr. Garcilaso	465	764	494	900	1	5	verificada
	Jr. Bellido	273	389	260	400	1	1	verificada
Jr. Garcilaso - Jr. Callao	Jr. Garcilaso	391	701	420	787	1	3	verificada
	Jr. Callao	338	521	287	467	3	2	verificada
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	Jr. Grau	368	689	394	787	1	4	verificada
	Jr. Lima	274	426	233	400	3	1	verificada
Jr. Grau - Jr. San Martín	Jr. Grau	234	560	227	547	0	1	verificada
	Jr. San Martín	439	819	414	807	1	0	verificada
Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	Jr. Grau	279	592	267	574	1	1	verificada
	Jr. F. Vivanco	413	867	380	834	2	1	verificada
Jr. 9 de Dic. - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-E	241	429	173	380	5	2	verificada
	Av. M. Cáceres-O	104	196	100	193	0	0	verificada
	Jr. 9 de diciembre	309	477	340	567	2	4	verificada
Jr. 9 de Dic. - Jr. Bellido	Jr. 9 de diciembre	353	546	307	514	3	1	verificada
	Jr. Bellido	283	404	300	487	1	4	verificada
Jr. 9 de Dic. - Jr. Callao	Portal Unión	809	1202	760	1201	2	0	verificada
Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	Portal Independencia	170	216	160	207	1	1	verificada
	Jr. Lima	342	485	240	454	6	1	verificada
Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	Jr. San Martín	439	819	407	800	2	1	verificada
Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	442	873	434	900	0	1	verificada
Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	Jr. Asamblea	475	751	407	640	3	4	verificada
	Av. M. Cáceres-E	239	504	133	320	8	9	aceptable
	Av. M. Cáceres-O	121	228	113	233	1	0	verificada
Jr. Asamblea - Jr. Bellido	Jr. Bellido	256	361	273	447	1	4	verificada

Fuente: Elaboración propia con resultados de VISSIM

Cuadro 3.43: Calibración de volúmenes vehiculares

Intersección	Ingreso por:	Autos (aforo)	Vol. (aforo)	Auto del Modelo	Vol. del Modelo	GEH Autos	GEH	Verif.
Jr. Asamblea - Jr. Cusco	Portal Municipal	466	728	447	687	1	2	verificada
	Jr. Cusco	350	459	273	427	4	2	verificada
Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	Jr. 2 de Mayo	409	708	380	634	1	3	verificada
	Po. Constitucional	443	629	374	607	3	1	verificada
Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	Jr. 2 de Mayo	365	636	293	500	4	6	aceptable
	Jr. San Martín	587	997	507	927	3	2	verificada
Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	Jr. 2 de Mayo	379	713	267	500	6	9	aceptable
	Jr. F. Vivanco	442	873	420	867	1	0	verificada
Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-E	239	504	167	400	5	5	verificada
	Av. M. Cáceres-O	547	1020	467	794	4	8	aceptable
Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-O	522	985	440	767	4	7	aceptable
	Av. M. Cáceres-E	404	771	287	600	6	7	aceptable
Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	Jr. 3 Máscaras	532	965	407	714	6	9	aceptable
	Jr. Bellido	256	361	273	447	1	4	verificada
Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	Jr. 3 Máscaras	670	1102	507	894	7	7	aceptable
	Jr. Cusco	295	425	233	387	4	2	verificada
Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Jr. 3 Máscaras	623	1051	474	854	6	6	aceptable
	Jr. Arequipa	407	661	320	567	5	4	verificada
Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	Jr. 3 Máscaras	355	661	273	627	5	1	verificada
	Jr. San Martín	479	865	427	780	2	3	verificada
Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	Jr. 3 Máscaras	258	492	207	480	3	1	verificada
	Jr. F. Vivanco	415	902	380	887	2	1	verificada
Jr. Sol - Av. M. Cáceres	Jr. Sol	404	797	340	794	3	0	verificada
	Av. M. Cáceres-E	371	788	293	627	4	6	aceptable
	Av. M. Cáceres-O	121	284	120	227	0	4	verificada
Jr. Sol - Jr. Unti- veros	Jr. Untiveros	234	496	193	434	3	3	verificada
Jr. Sol - Jr. Bellido	Jr. Bellido	201	285	180	280	1	0	verificada
	Jr. Sol	233	439	200	474	2	2	verificada
Jr. Sol - Jr. Cusco	Jr. Sol	256	477	193	460	4	1	verificada
	Jr. Cusco	295	437	253	420	3	1	verificada
Jr. Sol - Jr. Arequipa	Jr. Arequipa-O	657	989	527	827	5	5	aceptable
	Jr. Arequipa-E	150	385	140	427	1	2	verificada
Jr. Sol - Jr. San Martín	Jr. Sol	593	972	507	874	4	3	verificada
	Jr. San Martín	451	838	440	827	1	0	verificada
Jr. Pizarro - Jr. Bellido	Jr. Bellido	246	353	200	313	3	2	verificada
	Jr. Pizarro	713	1542	614	1394	4	4	verificada
Jr. Pizarro - Jr. Cusco	Jr. Cusco	106	146	93	140	1	0	verificada
	Jr. Pizarro	901	1833	754	1641	5	5	verificada
Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	Jr. Pizarro	1024	2182	887	2068	4	2	verificada
Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	Jr. Caviedes	539	701	414	694	6	0	verificada
	Jr. Pizarro	893	1964	780	1674	4	7	aceptable

Fuente: Elaboración propia con resultados de Vissim

Cuadro 3.44: Resultados y rango de error de demoras en intersección

Intersección	Demora Promedio (s)	S	CI	CI/S	Nivel de confianza
Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	14.3	3.93	2	0.5	99%
Jr. Libertad - Jr. Bellido	13.0	6.02	4	0.7	99%
Jr. Libertad - Jr. Callao	11.0	1.86	1	0.5	99%
Jr. Libertad - Jr. Lima	12.2	1.69	1	0.6	99%
Jr. Libertad - Jr. San Martín	23.2	5.05	3	0.6	99%
Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	6.9	7.25	4	0.6	99%
Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	8.9	3.89	2	0.5	99%
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	6.3	2.79	2	0.7	99%
Jr. Garcilaso de la V - Jr. Callao	13.6	1.62	1	0.6	99%
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	12.0	2	1	0.5	99%
Jr. Grau - Jr. San Martín	14.1	9.81	5	0.5	99%
Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	29.1	10.67	6	0.6	99%
Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	12.3	1.21	1	0.8	99%
Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	6.3	3.07	2	0.7	99%
Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	14.7	6.61	4	0.6	99%
Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	8.9	1.18	1	0.8	99%
Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	5.0	4.18	3	0.7	99%
Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	12.0	8.59	5	0.6	99%
Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	18.8	7.36	4	0.5	99%
Jr. Asamblea - Jr. Bellido	14.3	16.17	9	0.6	99%
Jr. Asamblea - Jr. Cusco	12.3	1.98	1	0.5	99%
Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	44.8	18.42	10	0.5	99%
Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	26.2	9.17	5	0.5	99%
Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	37.2	11.45	6	0.5	99%
Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	14.8	9.14	5	0.5	99%
Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	31.1	11.05	6	0.5	99%
Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	37.9	16.83	9	0.5	99%
Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	27.3	8.65	5	0.6	99%
Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	31.6	7.42	4	0.5	99%
Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	8.6	5.82	3	0.5	99%
Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	11.2	7.63	4	0.5	99%
Jr. Sol - Av. M. Cáceres	24.2	9.54	5	0.5	99%
Jr. Sol - Jr. Untiveros	12.5	13.5	7	0.5	99%
Jr. Sol - Jr. Bellido	5.9	3.85	2	0.5	99%
Jr. Sol - Jr. Cusco	5.3	1.99	1	0.5	99%
Jr. Sol - Jr. Arequipa	1.2	2.62	2	0.8	99%
Jr. Sol - Jr. San Martín	19.5	5.46	3	0.5	99%
Jr. Pizarro - Jr. Bellido	8.7	4.34	3	0.7	99%
Jr. Pizarro - Jr. Cusco	4.1	1.82	1	0.5	99%
Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	3.2	1.58	1	0.6	99%
Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	2.1	0.94	1	1.1	99%

Fuente: Elaboración propia con resultados de Vissim

4

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados y la eficiencia que tiene el modelamiento del sistema de regulación vehicular en el centro histórico.

4.1 Contrastación de hipótesis

4.1.1 Contrastación de la hipótesis general

- Si se logra desarrollar un modelamiento realista de simulación para el sistema de regulación de tráfico en la red vial dentro del Centro Histórico de Ayacucho, se podrá estimar las demoras de los flujos vehiculares y así evaluar las condiciones de tráfico.

La longitud de las vías del sistema es de aproximadamente 10 kilómetros, la mayoría de estas vías son similares, salvo la Av Mariscal Cáceres todas las vías son de un sentido, y tienen entre 1 y 2 carriles. A fin de validar los resultados del modelamiento y por ende de la investigación y obtener así la calidad de servicio del sistema de regulación, se escogieron 14 corredores para la evaluación del parámetro de demora o tiempos de viaje, estos corredores se detallan en el cuadro 4.1, caracterizados por tener 2 cuadras de recorrido e influenciados en algunos casos por semáforos. Cada demora representa el tiempo que un vehículo llega de su origen a destino influenciado por las interrupciones que le ocasionan su paso por intersecciones y su interacción con otros vehículos.

Los datos que se obtuvo en los corredores se muestran en la tabla 4.1, para establecer los tiempos de viaje en campo (demoras reales), se controló los tiempos de vehículos mediante el seguimiento en video, donde las demoras se obtuvieron del promedio de 30 vehículos que circularon por el tramo especificado (todas estas tomas hechas durante

la hora pico), mientras las demoras del modelo se extrajeron de los resultados de 247 corridas con números de semilla distintos, el modelo realizado en Vissim, considera el promedio de todos los vehículos que transcurren en el corredor durante el periodo de análisis (ver tabla 4.1).

Cuadro 4.1: Comparación de demoras reales y del modelamiento

Nº	Corredor de recorrido		Recorr.	Dist. (m)	Demora		Dif. Abs.
	Origen	Destino			Real	Modelo	
1	Jr. 2 de May. - Jr. F. Vivanco	Jr. San Martín - Jr. 28 de Jul.	2M-SM	262	86	99	13
2	Jr. San Martín - Jr. Libertad	Jr. C. F. Vivanco - Jr. Grau	Lib-FV	260	97	84	13
3	Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	Jr. 9 de Dic. - Jr. Callao	Mun-Uni	244	62	65	3
4	Jr. Pizarro - Jr. San Martín	Jr. Sol - Jr. Arequipa	Piz-Are	267	57	56	1
5	Jr. Pizarro - Jr. San Matín	Jr. 3 Másc. - Jr. San Martín	SM-SM	242	53	49	4
6	Jr. Cusco - Jr. 3 Máscaras	Jr. Sol - Jr. Arequipa	3M-Are	259	60	69	9
7	Av. M. Cáceres - Jr. Sol	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	MC-3M	283	66	149	83
8	Jr. Garcilaso - Av. M. Cáceres	Jr. Libertad - Jr. Bellido	MC-Lib	275	82	78	4
9	Jr. 9 de Dic. - Jr. Bellido	Av. M. Cáceres - Jr. Asam.	9D-MC	273	89	72	17
10	Jr. Libertad - Jr. Callao	Jr. Lima - Jr. G. de la Vega	Lib-Lim	266	92	72	20

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la comparación de las demoras producidas por entre el simulador y los registros de campo se ven en la figura 4.1, en la que se aprecian las diferencias entre ambos casos.

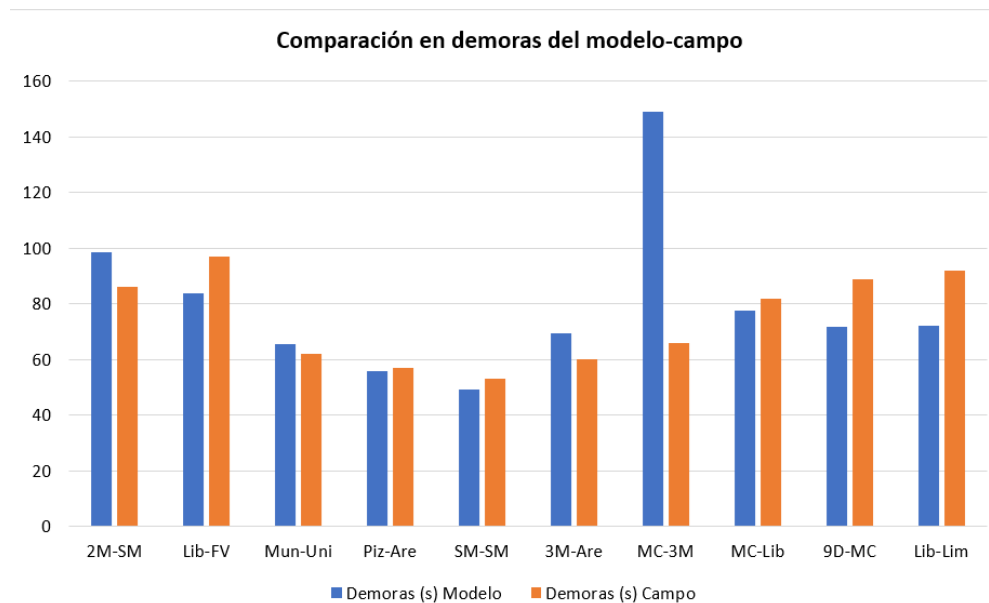


Figura 4.1: Comparación de las demoras del modelo y de registros de campo

Fuente: Elaboración propia.

las diferencias significativas se dieron en el corredor de la Av. Mariscal Cáceres y el Jr. 3 Máscaras, donde hay 43 s. de diferencia, que es un 39 % de diferencia en porcentaje (tras la inspección entre modelo y campo, se observó que el Jr. 3 Máscaras se congestionó en el modelo, como tiende a serlo durante las horas punta en la realidad, sin embargo durante su registro esta calle no llegó al punto de congestión), las tendencias sin embargo se mantienen y no hay mucha diferencia significativa entre los tramos cortos.

Para probar el nivel de insignificancia de los resultados del modelo, se hizo un análisis estadístico para muestras relacionadas, para esto se planteó una hipótesis nula y una alterna basadas en la hipótesis general. La prueba estadística se realizó mediante el software “IBM SPSS Statistics” y se consideró los siguientes pasos

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alternativa
 - H_0 : No existen diferencias significativas en demoras de los flujos vehiculares entre el modelo y el comportamiento real del sistema de regulación de tráfico vehicular en el Centro Histórico.
 - H_1 : Existen diferencias significativas en demoras de los flujos vehiculares entre el modelo y el comportamiento real del sistema de regulación de tráfico vehicular en el Centro Histórico.
2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95 %)
3. Se realizó la prueba de normalidad, para una muestra menor a 30 datos se escoge la prueba de Shapiro Wilk (ver tabla 4.2), no cumpliéndose la normalidad para ambos casos.
4. Como no se cumplió con la prueba de normalidad, no se pudo realizar la prueba de T de Student, Luego se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas para la verificación de la significancia (ver la tabla 4.3).

Cuadro 4.2: Prueba de normalidad Shapiro-Wilk del modelo y el registro de campo

Variable	p valor	α	Aceptación
Modelo	0.027	< 0.05	Ho no se acepta
Campo	0.200	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.3: Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo y el registro de campo

p valor	α	Aceptación
0.683	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

Luego de analizar la prueba de comparación en tabla 4.3 para ambas muestras, se optó por aceptar la hipótesis nula establecida en el paso 1, por tanto no hay diferencia significativa entre el modelo y los valores tomado de campo, y concluimos que el modelo representa al comportamiento de la red central del Centro Histórico en tiempos de viaje.

4.1.2 Contrastación de la hipótesis específica 1

- Tras el planteamiento de nuevos escenarios de tráfico, con comparativa del antes y después, se identificarán deficiencias del tráfico.

Para esta hipótesis se plantearon cuatro supuestos de gestión vehicular que podría implantar la municipalidad de la ciudad:

- Gestión en semáforos
- Apertura de vías peatonales
- Restricción de vehículos menores
- Aplicación de carriles diferenciados

4.1.2.1 Gestión en semáforos

La propuesta semafórica consiste en tratar de mejorar el tiempo de viaje promedio que les tome a los vehículos recorrer una sección entre el Jr. Libertad y el Jr. F. Vivanco, desde la intersección del Jr. Libertad con el Jr. San Martín hasta arribar a la esquina del Jr. F. Vivanco y el Jr. 3 Máscaras, recorriendo un distancia promedio de 656 m, el recorrido se especifica mejor en la figura 4.2.

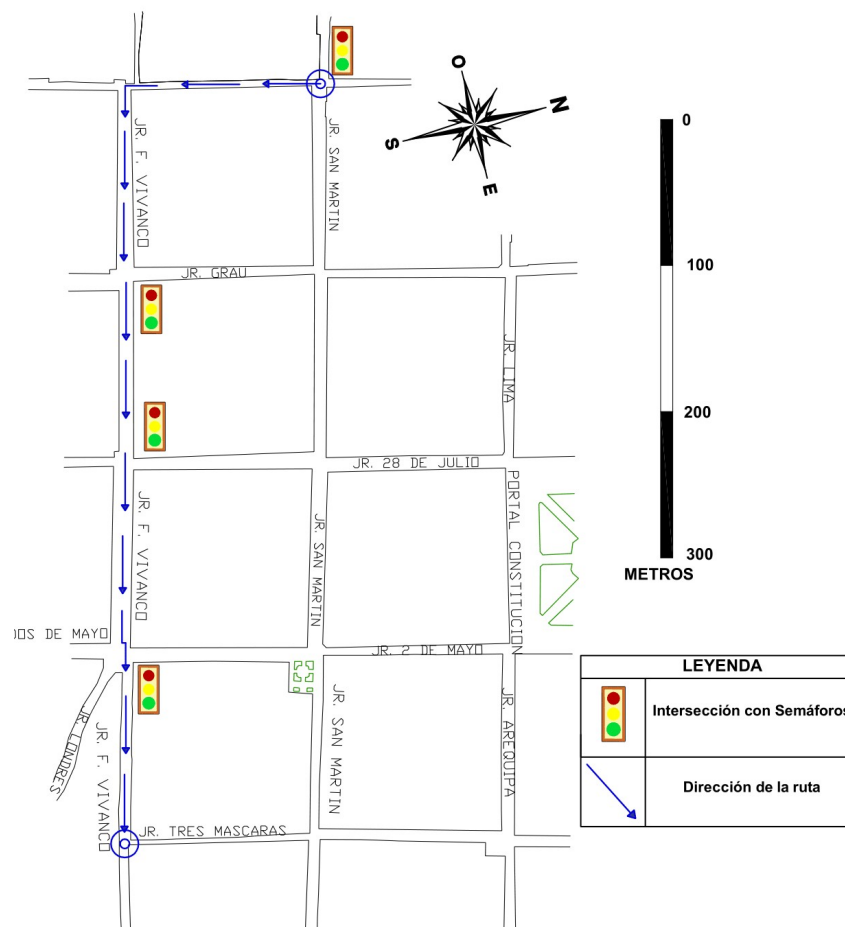


Figura 4.2: Tramo de prueba para semáforos sincronizados

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.4, se ven los tiempos de ciclo de los 4 semáforos presentes en el tramo, los ciclos que se muestran están indicados para la dirección de la calle indicada en la intersección. Con el modelamiento calibrado, se modificaron los tiempos de ciclo en

todos los semáforos del tramo, teniendo en cuenta que el promedio del ciclo de todos los semáforos es de 77 s, se decide optar por poner tiempos de ciclo de 80 s en cada semáforo a fin de tener tiempos sincronizados, para escoger los tiempos de sus fases, se decide estimarlos de acuerdo a la proporción que dan los flujos vehiculares que aporta las calles de ingreso.

Cuadro 4.4: Propuesta de tiempos para tiempos de ciclo de semáforos

N	Intersección (Av./Jr.) 1-2	Flujo hora pico		Duración de fases (s) - Dir1					
		Dir. 1	Dir. 2	Estado Actual			Propuesta		
				Verde	Rojo	Total	Verde	Rojo	Total
1	Libertad - San Martín	449	285	50	35	85	50	30	80
2	Grau - F. Vivanco	282	413	35	45	80	32	48	80
3	28 de Julio - F. Vivanco	-	873	15	50	65	18	62	80
4	F. Vivanco - 2 de Mayo	442	320	42	35	77	44	36	80

Fuente: Elaboración propia

Con estos valores se obtuvieron las demoras promedio del recorrido entre el modelo actual y la propuesta. Al realizar las corridas en el modelo actual y calibrado se obtuvo una media de 199 segundos de demora en todos los vehículos livianos que recorren este tramo. En la propuesta se obtuvo una media de 191 s para 150 vehículos que recorrieron este tramo según lo arrojado con el modelamiento.

Para ver si hay una mejora o no en el manejo de semáforos se realizó la prueba de hipótesis:

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alterna
 - H_0 : La demora con la nueva semaforización μ es igual al estado actual de la semaforización $\mu = 199$ s.
 - La demora con la nueva semaforización μ se reduce respecto estado actual de la semaforización H_1 : $\mu < 199$ s.
2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95 %)
3. Para 150 vehículos analizados con un valor crítico de $Z_c = -1,64$, una desviación

estándar de 46 s. Se usa la fórmula 4.1

$$Z_p = \frac{\bar{X} - \mu}{\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)} \quad (4.1)$$

$$Z_p = \frac{191 - 199}{\left(\frac{46}{\sqrt{150}}\right)}$$

$$Z_p = -2,13$$

4. Luego dado que $Z_p < Z_c$ se rechazó la hipótesis nula y se pudo afirmar que la demora promedio con el nuevo semaforizado es menor al estado funcional actual, por tanto el sistema el sistema actual es más deficiente por demoras de viaje que la propuesta.

4.1.2.2 Apertura de vías peatonales y modificación de vías

Actualmente dentro del sector central del Centro Histórico existen dos tramos de calles peatonales, las dos cuadras aledañas al parque central del el Jr. Asamblea y el Jr. 28 de Julio. La propuesta considera la reapertura de éstas calles, que funcionarían con un solo carril, similar al Jr. 9 de diciembre (3.70 m), además se mantendrá el semáforo en las esquinas del Jr. Asamblea y el Jr. Bellido; como en las del Jr. San Martín y el Jr. 28 de Julio, estos y los semáforos implicados al cambio tendrán un cambio de su ciclo semafórico de acuerdo al promedio de las calles más aledañas o de esquinas con similar característica.

Para la distribución vehicular se aplicó el mismo criterio a todas las esquinas afectadas, donde la distribución vehicular era similar o promedio de las intersecciones aledañas. En la figura 4.3 se indica la propuesta de rutas de acuerdo a la reapertura de vías.

La prueba de hipótesis se realizó con los resultados que están en la tabla 4.5, que

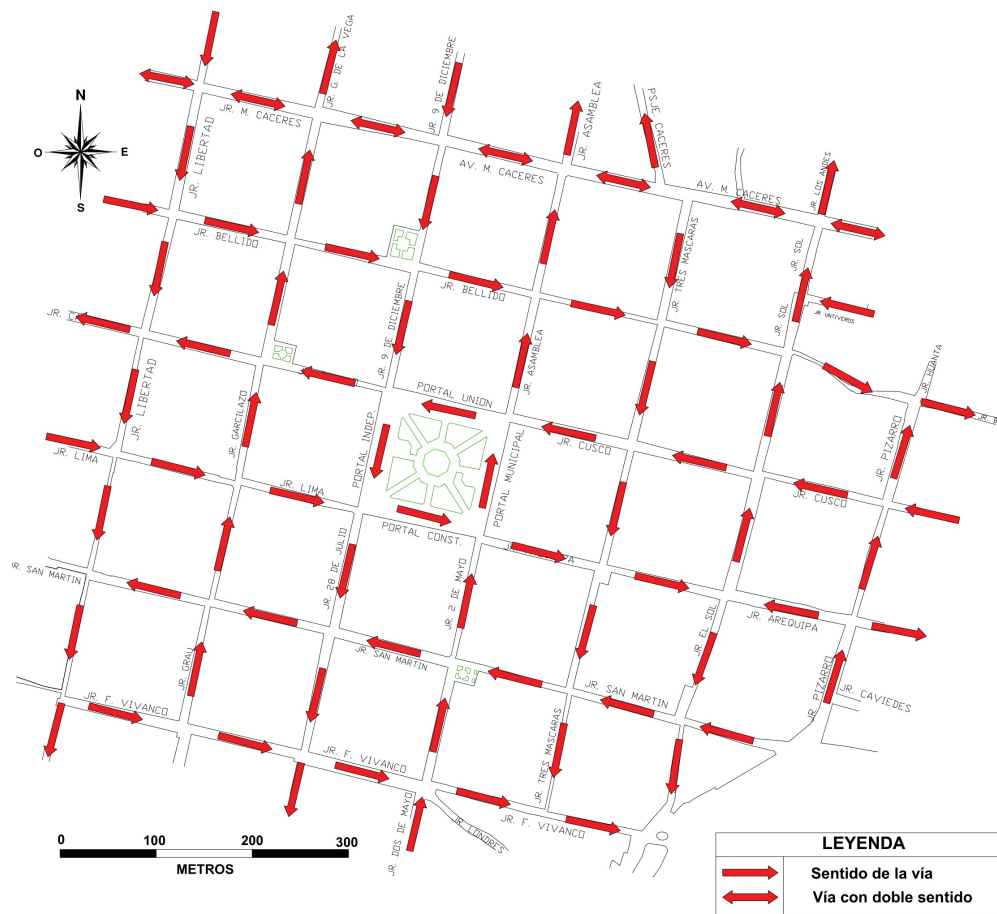


Figura 4.3: Propuesta de reapertura de vías peatonales

Fuente: Elaboración propia.

indica las demoras promedio de cada intersección de la red entre el caso de la propuesta de vías abiertas el sistema actual, entre estos dos se nota que las demoras en algunas intersecciones aumentan y en otras disminuyen, sin embargo en la demora promedio en la propuesta es menor al sistema actual, concluyéndose que la reapertura reduciría los tiempos de espera por intersección, la prueba de hipótesis sirve para ver si el cambio sería significativo.

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alternativa

- H_0 : Las demoras entre el habilitación de vías actual no tiene diferencia significativa entre el con la habilitación de vías propuesta.

Cuadro 4.5: Demoras promedio por intersección del sistema actual y la propuesta de apertura de vías peatonales

N	Intersección	Propuesta (s)	Sistema actual (s)
1	Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	14.7	14.3
2	Jr. Libertad - Jr. Bellido	11.4	13.0
3	Jr. Libertad - Jr. Callao	12.4	11.0
4	Jr. Libertad - Jr. Lima	12.4	12.2
5	Jr. Libertad - Jr. San Martín	20.9	23.2
6	Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	7.9	6.9
7	Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	9.1	8.9
8	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	5.0	6.3
9	Jr. Garcilaso de la V - Jr. Callao	14.7	13.6
10	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	11.9	12.0
11	Jr. Grau - Jr. San Martín	7.5	14.1
12	Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	35.3	29.1
13	Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	11.5	12.3
14	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	0.5	6.3
15	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	11.4	14.7
16	Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	12.1	8.9
17	Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	15.0	5.0
18	Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	23.9	12.0
19	Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	18.0	18.8
20	Jr. Asamblea - Jr. Bellido	20.9	14.3
21	Jr. Asamblea - Jr. Cusco	13.0	12.3
22	Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	34.9	44.8
23	Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	27.5	26.2
24	Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	31.3	37.2
25	Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	1.6	14.8
26	Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	15.1	31.1
27	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	27.0	37.9
28	Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	20.6	27.3
29	Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	24.9	31.6
30	Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	10.3	8.6
31	Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	9.3	11.2
32	Jr. Sol - Av. M. Cáceres	17.2	24.2
33	Jr. Sol - Jr. Untiveros	7.3	12.5
34	Jr. Sol - Jr. Bellido	5.4	5.9
35	Jr. Sol - Jr. Cusco	5.4	5.3
36	Jr. Sol - Jr. Arequipa	1.0	1.2
37	Jr. Sol - Jr. San Martín	19.0	19.5
38	Jr. Pizarro - Jr. Bellido	8.1	8.7
39	Jr. Pizarro - Jr. Cusco	4.9	4.1
40	Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	3.7	3.2
41	Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	2.5	2.1
Promedio		13.8	15.3

Fuente: Elaboración propia

- H_1 : Las demoras entre el habilitación de vías actual tiene diferencia significativa entre el con la habilitación de vías propuesta.
2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95 %)
 3. Se realizó la prueba de Normalidad, donde para una muestra mayor a los 30 datos se escogió la prueba de Kolmogorov-Smirnov (ver tabla 4.6).

Cuadro 4.6: Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta

Variable	p valor	α	Aceptación
Sist. Actual	0.000	< 0.05	Ho no se acepta
Propuesta	0.097	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

4. Al realizar la prueba solo uno de ambos cumplió con la prueba de normalidad, por tanto no se pudo realizar la prueba de T de Student, en lugar de eso, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas para la verificación de la significancia (ver la tabla 4.7).

Cuadro 4.7: Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta

p valor	α	Aceptación
0.197	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

5. Luego se aceptó la hipótesis nula donde no hay diferencia significativa en las demoras ocasionadas en las intersecciones tras la nueva habilitación de vías al reaperturar el Jr. Asamblea y el Jr. 28 de Julio, por lo cual se concluyó que la habilitación de vías con la reapertura de ambos jirones no tiene diferencias significativos al estado actual, a pesar de la reducción de la media de las demoras se reduzca.

4.1.2.3 Restricción de vehículos menores

El centro histórico, restringe su paso a vehículos pesados, pero son los vehículos menores los hipotéticamente ocasionarían mayor congestión. El Centro Histórico permite el paso de motocicletas sin ninguna restricción y las mototaxis tienen también acceso pero solo en algunos tramos. La prueba que se realizó corresponde a eliminar los flujos de vehículos menores, por otro lado, también se realizó esta prueba reemplazando el flujo de vehículos menores por vehículos equivalentes.

Se muestra en la tabla 4.8 la comparación de resultados entre las demoras producidas por el sistema actual y dos casos correspondientes a la restricción de vehículos livianos, siendo para el caso 1, solo la eliminación de los vehículos menores, conservando el mismo volumen de flujo en otros tipos de vehículos; para el caso 2 sin embargo, se reemplazaron a los vehículos menores por su equivalente en vehículos livianos



Figura 4.4: Presencia de vehículos menores en el Centro Histórico

Fuente: Elaboración propia.

Se plantearon entonces las hipótesis nula y alterna de comparación estadística entre el sistema actual con cada caso para evaluar la significancia en cuanto a la reducción en demora por vehículo en cada intersección

Cuadro 4.8: Demoras promedio por intersección del sistema actual y las propuestas de restricción de vehículos menores

N	Intersección	Sistema actual	Caso 1	Caso 2
1	Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	14.3	13.5	15.2
2	Jr. Libertad - Jr. Bellido	13.0	7.9	12.9
3	Jr. Libertad - Jr. Callao	11.0	9.7	10.7
4	Jr. Libertad - Jr. Lima	12.2	8.9	11.5
5	Jr. Libertad - Jr. San Martín	23.2	14.9	18.0
6	Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	6.9	7.7	12.7
7	Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	8.9	7.1	10.6
8	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	6.3	4.6	6.5
9	Jr. Garcilaso de la V - Jr. Callao	13.6	14.4	14.9
10	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	12.0	11.7	14.3
11	Jr. Grau - Jr. San Martín	14.1	4.6	7.5
12	Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	29.1	31.3	36.2
13	Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	12.3	12.4	13.3
14	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	6.3	2.5	3.6
15	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	14.7	12.9	20.2
16	Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	8.9	10.7	10.0
17	Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	5.0	4.6	4.6
18	Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	12.0	7.2	18.3
19	Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	18.8	15.0	22.7
20	Jr. Asamblea - Jr. Bellido	14.3	6.1	7.9
21	Jr. Asamblea - Jr. Cusco	12.3	12.2	15.4
22	Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	44.8	22.1	51.3
23	Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	26.2	11.5	31.8
24	Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	37.2	23.6	44.4
25	Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	14.8	5.6	13.9
26	Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	31.1	14.0	27.8
27	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	37.9	14.3	25.1
28	Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	27.3	8.2	21.0
29	Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	31.6	15.5	28.1
30	Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	8.6	3.6	16.5
31	Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	11.2	4.0	5.6
32	Jr. Sol - Av. M. Cáceres	24.2	15.3	27.6
33	Jr. Sol - Jr. Untiveros	12.5	2.3	12.6
34	Jr. Sol - Jr. Bellido	5.9	4.4	7.3
35	Jr. Sol - Jr. Cusco	5.3	5.1	7.9
36	Jr. Sol - Jr. Arequipa	1.2	1.9	3.0
37	Jr. Sol - Jr. San Martín	19.5	20.1	24.9
38	Jr. Pizarro - Jr. Bellido	8.7	4.2	9.7
39	Jr. Pizarro - Jr. Cusco	4.1	1.4	3.4
40	Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	3.2	1.7	2.9
41	Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	2.1	0.8	1.7
Media		15.3	9.7	15.9

Fuente: Elaboración propia

Caso 1

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alternativa

- H_0 : Las demoras en las intersecciones no tiene diferencia significativa entre el modelo actual y el caso 1 que elimina la presencia de vehículos menores.
- H_1 : Las demoras por vehículo en las intersecciones tiene diferencia significativa entre el modelo actual y el caso 1 que elimina la presencia de vehículos menores.

2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95 %)

3. Se realizó la prueba de Normalidad, donde para una muestra mayor a los 30 datos se escogió la prueba de Kolmogorov-Smirnov (ver tabla 4.9).

Cuadro 4.9: Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta (caso 1)

Variable	p valor	α	Aceptación
Sist. Actual	0.000	< 0.05	Ho no se acepta
Propuesta	0.200	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

4. Al realizar la prueba solo uno de ambos cumplió con la prueba de normalidad, por tanto no se pudo realizar la prueba de T de Student, en lugar de eso, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas, para la verificación de la significancia (ver la tabla 4.10).

Cuadro 4.10: Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta (caso 1)

p valor	α	Aceptación
0.000	< 0.05	Ho no se acepta

Fuente: Elaboración propia

5. Luego se aceptó la hipótesis alterna, donde se prueba que hay diferencia significativa en la reducción de demoras ocasionadas en las intersecciones tras restringir completamente el paso de vehículos menores. Como dato adicional en ambos casos la media de demoras se reduce de 15.3 s a 9.7 s.

Caso 2

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alternativa
 - H_0 : Las demoras por vehículo en las intersecciones no tiene diferencia significativa entre el modelo actual y el caso 2 propuesto con el reemplazo de los vehículos menores con vehículos equivalentes.
 - H_1 : Las demoras por vehículo en las intersecciones tiene diferencia significativa entre el modelo actual y el caso 2 propuesto con el reemplazo de los vehículos menores con vehículos equivalentes.
2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95 %)
3. Se realizó la prueba de normalidad, donde para una muestra mayor a los 30 datos se escogió la prueba de Kolmogorov-Smirnov (ver tabla 4.11).

Cuadro 4.11: Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta (caso 2)

Variable	p valor	α	Aceptación
Sist. Actual	0.000	< 0.05	Ho no se acepta
Propuesta	0.017	< 0.05	Ho no se acepta

Fuente: Elaboración propia

4. Al realizar la prueba no se cumplió con la prueba de normalidad, por tanto no se pudo realizar la prueba de T de Student, en lugar de eso, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas, para la verificación de la significancia (ver la tabla 4.12).

Cuadro 4.12: Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta (caso 2)

p valor	α	Aceptación
0.168	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

5. Luego se aceptó la hipótesis nula, donde se afirma que no hay diferencia significativa en la reducción de demoras ocasionadas en las intersecciones tras reemplazar el flujo de vehículos menores con su equivalente en vehículos livianos. Como dato adicional en ambos casos la media de demoras se incrementa de 15.3 s a 15.9 s.

Entonces de ambas pruebas se ve claramente el beneficio de la eliminación del tránsito de los vehículos menores en la zona central del Centro Histórico, teniendo para el caso 1 una importante reducción en las demoras por intersección, y para el caso 2, hay un incremento de receptibilidad en vehículos livianos en aproximadamente 40 % más de los que hay actualmente tras el reemplazo de vehículos menores.

4.1.2.4 Aplicación de carriles diferenciados

El uso de carriles diferenciados significa un ordenamiento en el tráfico a través de sus vías, ajustándose para incrementar su capacidad.

Para dar efecto a que el tráfico se acomode al uso y respeto de carriles diferenciados hay varios métodos desde resaltar las señales de tránsito al uso de delimitadores como hitos o conos de separación.

Las demoras promedio en las intersecciones entre el estado actual y el que se obtendría de usar los carriles diferenciados se muestran en la tabla 4.13.

Se plantearon entonces las hipótesis nula y alterna de comparación estadística entre el sistema actual con la propuesta de uso de carriles diferenciados en cuanto a la reducción en demora por vehículo en cada intersección



(a) Agosto 2018



(b) Marzo 2019

Figura 4.5: Efecto del uso de carriles diferenciados

Fuente: Elaboración propia.

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alternativa
 - H_0 : Las demoras por vehículo en las intersecciones no tienen diferencias significativas entre el modelo actual y la propuesta de uso de carriles diferenciados.
 - H_1 : Las demoras por vehículo en las intersecciones tienen diferencias significativas entre el modelo actual y la propuesta de uso de carriles diferenciados.
2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95 %)
3. Se realizó la prueba de Normalidad, donde para una muestra mayor a los 30 datos se escogió la prueba de Kolmogorov-Smirnov (ver tabla 4.14).
4. Al realizar la prueba no se cumplió con la prueba de normalidad, por tanto no se pudo realizar la prueba de T de Student, en lugar de eso, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas, para la verificación de la significancia (ver la tabla 4.15).



Figura 4.6: Separadores de tránsito en el Centro histórico

Fuente: Elaboración propia.

5. Luego se aceptó la hipótesis alterna, donde se prueba que hay diferencia significativa en la reducción de demoras ocasionadas en las intersecciones tras el uso de carriles diferenciados. Como dato adicional en ambos casos la media de demoras se reduce de 15.3 s a 14.1 s.

4.1.3 Contrastación de la hipótesis específica 2

- El crecimiento del flujo vehicular incrementa la congestión vehicular en el Centro Histórico.

Para esta hipótesis se probó el efecto del incremento del parque vehicular en la ciudad con los años para la hora pico, incrementando los flujos vehiculares en los ingresos a la red, cada uno de éstos corresponden a los flujos estimados con los índices de crecimiento poblacional del distrito de Ayacucho (2,5 % según el INEI (2018)) para todos los tipos

Cuadro 4.13: Demoras promedio por intersección del sistema actual y la propuesta con carriles diferenciados

N	Intersección	Sistema actual	Propuesta 1
1	Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	14.3	14.4
2	Jr. Libertad - Jr. Bellido	13.0	10.5
3	Jr. Libertad - Jr. Callao	11.0	10.4
4	Jr. Libertad - Jr. Lima	12.2	12.6
5	Jr. Libertad - Jr. San Martín	23.2	20.8
6	Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	6.9	2.8
7	Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	8.9	8.3
8	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	6.3	2.6
9	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Callao	13.6	12.2
10	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	12.0	10.9
11	Jr. Grau - Jr. San Martín	14.1	21.1
12	Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	29.1	13.9
13	Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	12.3	13.7
14	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	6.3	3.9
15	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	14.7	49.6
16	Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	8.9	10.3
17	Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	5.0	3.5
18	Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	12.0	6.2
19	Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	18.8	18.1
20	Jr. Asamblea - Jr. Bellido	14.3	5.6
21	Jr. Asamblea - Jr. Cusco	12.3	16.2
22	Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	44.8	65.3
23	Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	26.2	32.1
24	Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	37.2	30.8
25	Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	14.8	7.3
26	Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	31.1	19.3
27	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	37.9	14.9
28	Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	27.3	11.8
29	Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	31.6	25.8
30	Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	8.6	3.1
31	Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	11.2	13.5
32	Jr. Sol - Av. M. Cáceres	24.2	23.2
33	Jr. Sol - Jr. Untiveros	12.5	12.7
34	Jr. Sol - Jr. Bellido	5.9	4.6
35	Jr. Sol - Jr. Cusco	5.3	2.8
36	Jr. Sol - Jr. Arequipa	1.2	0.6
37	Jr. Sol - Jr. San Martín	19.5	19.0
38	Jr. Pizarro - Jr. Bellido	8.7	14.5
39	Jr. Pizarro - Jr. Cusco	4.1	3.7
40	Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	3.2	3.8
41	Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	2.1	2.5
Media		15.3	14.1

Fuente: Elaboración propia

de vehículos a excepción del de los vehículos pesados, donde su índice de crecimiento es de acuerdo al crecimiento del producto bruto interno (3.9% promedio de los últimos 9 años). Los volúmenes máximos horarios registrados se ajustaron de acuerdo al factor de

Cuadro 4.14: Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov del sistema actual y la propuesta

Variable	p valor	α	Aceptación
Sist. Actual	0.000	< 0.05	Ho no se acepta
Propuesta	0.001	< 0.05	Ho no se acepta

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.15: Prueba de Wilcoxon entre las demoras del modelo actual y la propuesta

p valor	α	Aceptación
0.036	< 0.05	Ho no se acepta

Fuente: Elaboración propia

ajuste mensual para luego estimar de volúmenes horarios futuros de acuerdo la fórmula 4.2.

$$Vol_y = Vol_{año\ inicial} \left(1 + \frac{p}{100}\right)^{(y-1)} \quad (4.2)$$

donde:

Vol_y : volumen medio horario del año y .

$Vol_{año\ inicial}$: volumen medio horario en el año inicial (vehículos por hora)

p : porcentaje anual de crecimiento de la IMD (%)

y : número de años

Luego de corrido el modelo, para los nuevos flujos en 5 años, se identificó que las zonas críticas de alimentación a la red se encontraron en el Jr. Libertad, el Jr. Asamblea, el Jr. Pizarro y el Jr. 2 de Mayo. A los 10 años el Jr. Untiveros se añadiría a éstos como zona crítica de abastecimiento de vehículos en la red. En el caso de 20 años, la situación no mejoraría, de incrementarse los flujos vehiculares con las tasas de crecimiento actual, los ingresos a la red que colapsarían serían el Jr. Pizarro, el Jr. Asamblea, el Jr. Libertad, el Jr. Untiveros, el Jr. 2 de mayo, la Av. Mariscal Cáceres ingreso Oeste, el Jr. Cusco,

el Jr. Caviedes, el Jr. San Martín ingresos Este y Oeste, el Jr. Lima y el Jr. Bellido, resultando casi todos los ingresos a la red, esto implicaría que la red del Centro Histórico no abastecería la demanda del parque vehicular en 20 años en la hora pico.

Las demoras promedio que se presentarían en las intersecciones para los 5, 10 y 20 años comparadas con lo actual se ven en la tabla 4.16.

Para estimar la significancia de sus efectos en las demoras en cada intersección del sector central, se realizó la prueba de Friedman para más de 2 muestras relacionadas, entre las demoras del estado actual y los proyectados en 5, 10 y 20 años.

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alternativa

- H_0 : No existirán diferencias significativas entre las demoras del modelo actual y las proyectadas en 5, 10 y 20 años con incremento de flujo vehicular.
- H_1 : Habrá diferencias significativas entre las demoras del modelo actual y las proyectadas en 5, 10 y 20 años con incremento de flujo vehicular.

2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, (nivel de confianza del 95 %)
3. Se realizó la prueba de normalidad con la prueba de Kolmogorov-Smirnov (ver tabla 4.17) para muestras mayores a 30 datos, donde se observó que ambas listas de datos se comportaron normalmente. Existe también un incremento de las medias de las demoras en intersecciones de 15.6 s en el estado actual a 17.8 s en 5 años, 24.4 s en 10 años y 39.5 s en 20 años como se ve en la tabla 4.16.
4. Al realizar la prueba solo uno de ambos cumplió con la prueba de normalidad, por tanto no se pudo realizar la prueba de T de Student, en lugar de eso, se utilizó la prueba no paramétrica de Friedman para más de dos muestras relacionadas (ver la tabla 4.19).
5. Luego no se aceptó la hipótesis nula, afirmando que hay suficiente diferencia significativa entre cada muestra de demoras para decir que el crecimiento del flujo

Cuadro 4.16: Demoras promedio en segundos por intersección del sistema actual y tráfico proyectados a los 5, 10 y 20 años

N	Intersección	Demoras actuales	En 05 años	En 10 años	En 20 años
1	Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	14.3	14.2	16.5	27.7
2	Jr. Libertad - Jr. Bellido	13.0	12.8	17.9	28.5
3	Jr. Libertad - Jr. Callao	11.0	12.9	13.3	17.0
4	Jr. Libertad - Jr. Lima	12.2	12.9	15.5	29.0
5	Jr. Libertad - Jr. San Martín	23.2	25.3	30.9	53.0
6	Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	6.9	9.2	20.3	33.6
7	Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	8.9	7.7	10.2	15.4
8	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	6.3	4.8	9.2	20.1
9	Jr. Garcilaso de la V - Jr. Callao	13.6	13.8	14.0	19.3
10	Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	12.0	12.3	14.3	16.0
11	Jr. Grau - Jr. San Martín	14.1	16.5	28.6	52.8
12	Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	29.1	36.8	46.7	52.8
13	Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	12.3	12.2	13.1	14.6
14	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	6.3	8.1	10.1	29.7
15	Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	14.7	15.1	19.1	26.4
16	Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	8.9	9.3	9.5	10.5
17	Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	5.0	5.7	7.9	35.2
18	Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	12.0	13.0	25.7	42.2
19	Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	18.8	24.3	34.9	79.3
20	Jr. Asamblea - Jr. Bellido	14.3	11.1	38.6	94.7
21	Jr. Asamblea - Jr. Cusco	12.3	12.4	12.3	14.8
22	Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	44.8	62.5	63.6	100.3
23	Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	26.2	34.6	35.1	49.7
24	Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	37.2	40.8	53.5	78.5
25	Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	14.8	21.5	33.1	52.1
26	Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	31.1	36.7	56.9	67.9
27	Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	37.9	42.4	64.7	92.2
28	Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	27.3	24.7	34.2	48.2
29	Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	31.6	35.8	36.5	46.2
30	Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	8.6	15.6	20.6	45.7
31	Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	11.2	17.0	15.1	31.2
32	Jr. Sol - Av. M. Cáceres	24.2	28.2	50.9	62.2
33	Jr. Sol - Jr. Untiveros	12.5	23.1	45.2	96.4
34	Jr. Sol - Jr. Bellido	5.9	7.1	15.3	32.0
35	Jr. Sol - Jr. Cusco	5.3	6.1	10.3	17.3
36	Jr. Sol - Jr. Arequipa	1.2	1.3	4.6	12.7
37	Jr. Sol - Jr. San Martín	19.5	20.6	28.1	42.3
38	Jr. Pizarro - Jr. Bellido	8.7	9.8	11.3	11.4
39	Jr. Pizarro - Jr. Cusco	4.1	4.0	5.1	8.6
40	Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	3.2	3.6	4.6	6.8
41	Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	2.1	2.3	3.2	5.3
Promedio		15.3	17.8	24.4	39.5

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.17: Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov entre demoras proyectadas a 5, 10 y 20 años

	p valor	α	Aceptación
S. Actual	0.000	< 0.05	Ho no se acepta
5 años	0.002	< 0.05	Ho no se acepta
10 años	0.003	< 0.05	Ho no se acepta
20 años	0.100	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.18: Rangos de la Prueba de Friedman

Muestra	Rango prom.
S. Actual	1.280
5 años	1.800
10 años	2.910
20 años	4.000

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.19: Prueba de Friedman entre demoras proyectadas a 5, 10 y 20 años

p valor	α	Aceptación
0.00	< 0.05	Ho no se acepta

Fuente: Elaboración propia

vehicular incrementa las demoras en las intersecciones dentro de la red del Centro Histórico de la ciudad. Los rangos promedio de la tabla 4.18 indica el crecimiento que existiría año tras año de las demoras en la red.

4.1.4 Contrastación de la hipótesis específica 3

- Si el modelo predice los flujos actuales en cada intersección también puede estimar las dimensiones de la congestión dentro del sistema actual.

La hipótesis establece que el modelo calibrado tiene la capacidad de predecir las máximas longitudes de cola que se generan en las intersecciones, con el modelo de seguimiento de Mahut, para comprobar la hipótesis se recurre a las grabaciones aéreas a fin de registrar los momentos los puntos y la longitudes de colas máximas que se

generan dentro de la red del centro histórico.

Las colas que se registraron tienen la característica de no mantenerse en larga duración dado que el sistema analiza el tráfico en la hora pico, significando que los volúmenes fluyen continuamente en cada intersección, de esta manera las longitudes de cola máximas captadas por los videos aéreos fácilmente se descongestionaron y en varias ocasiones no tenían larga duraciones.

Las longitudes máximas de cola en metros los registros de campo y los que generó el modelo se aprecian en la tabla 4.20, con estos datos se realizará la prueba de hipótesis.

1. Planteamiento de la hipótesis nula y la alterna
 - H_0 : No existen suficientes diferencias significativas entre las dimensiones de congestión del modelo y las obtenidas en campo.
 - H_1 : Existen suficientes diferencias significativas entre las dimensiones de congestión del modelo y las obtenidas en campo.
2. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (nivel de confianza del 95 %)
3. Se realizó la prueba de Normalidad, donde para una muestra mayor a los 30 datos se escogió la prueba de Kolmogorov-Smirnov (ver tabla 4.21).
4. Al realizar la prueba solo uno de ambas listas de datos cumplió con la prueba de normalidad, por tanto no se pudo realizar la prueba de T de Student, en lugar de eso se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas para la verificación de la significancia (ver la tabla 4.22).
5. Luego se aceptó la hipótesis nula donde no hay diferencia significativa para que el modelamiento no pueda generar longitudes de cola máximas. Por tanto el modelo de redes de transporte vehicular está en la capacidad de predecir las dimensiones de congestión expresadas en máximas longitudes de cola para un sistema de regulación planteado.

Cuadro 4.20: Máximas longitudes de cola en algunas intersecciones (metros)

Intersección	Cuadra	Long de cola registrados	Long de cola generados
Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-E	85	67
Jr. Libertad - Jr. Bellido	Jr. Libertad	92	94
Jr. Libertad - Jr. Callao	Jr. Callao	104	81
Jr. Libertad - Jr. Lima	Jr. Libertad	69	67
Jr. Libertad - Jr. San Martín	Jr. San Martín-E	60	133
Jr. Garcilaso - Av. M. Cáceres	Jr. Garcilaso de la V.	74	67
Jr. Garcilaso - Jr. Bellido	Jr. Garcilaso de la V.	104	29
Jr. Garcilaso - Jr. Bellido	Jr. Bellido	53	7
Jr. Garcilaso - Jr. Callao	Jr. Garcilaso de la V.	90	63
Jr. Garcilaso - Jr. Lima	Jr. Lima	120	57
Jr. Grau - Jr. San Martín	Jr. Grau	17	12
Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	80	132
Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-E	60	64
Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	Jr. 9 de diciembre	93	69
Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	Portal Unión	42	65
Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	Portal Independencia	30	21
Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	Jr. San Martín	105	45
Jr. Asamblea - Jr. Bellido	Jr. Bellido	50	49
Jr. Asamblea - Jr. Cusco	Portal Municipal	32	32
Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	Jr. 2 de Mayo	61	159
Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	Portal Constitucional	26	47
Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	Jr. 2 de Mayo	75	117
Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	124	123
Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-E	50	138
Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	Jr. 3 Máscaras	100	124
Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	Jr. Cusco	55	60
Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Jr. 3 Máscaras	104	139
Jr. Sol - Av. M. Cáceres	Jr. Sol	60	83
Jr. Sol - Jr. Bellido	Jr. Sol	57	53
Jr. Sol - Jr. Cusco	Jr. Cusco	15	15
Jr. Sol - Jr. San Martín	Jr. Sol	88	107
Jr. Sol - Jr. San Martín	Jr. San Martín	107	59
Jr. Pizarro - Jr. Bellido	Jr. Bellido	22	62
Jr. Pizarro - Jr. Cusco	Jr. Pizarro	26	25

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis e interpretación

El modelo obtenido ha reflejado el comportamiento vehicular en un periodo propenso a la formación de congestión en el Centro Histórico de Ayacucho durante la hora pico, la verificación del modelo se ajusta a las restricciones estadísticas para que validan el

Cuadro 4.21: Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov de los datos registrados y generados

Muestra	p valor	α	Aceptación
Datos registrados	0.200	> 0.05	Ho se acepta
Datos generados	0.006	< 0.05	Ho no se acepta

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.22: Prueba de Wilcoxon entre los datos registrados y generados

p valor	α	Aceptación
0.751	> 0.05	Ho se acepta

Fuente: Elaboración propia

funcionamiento, también se realizó la validación en contraste a los aforos vehiculares que determinaron la calibración del sistema, con estos procedimientos se obtuvieron los parámetros del comportamiento vehicular dentro de la red que se presentan en esta sección.

4.2.1 Análisis del flujo vehicular en el sistema

El flujo vehicular durante la hora pico es continuo, no produciéndose casos colas de duraciones largas según a los resultados de la investigación, sin embargo existe congestión vehicular en otras horas causadas por el incremento de la densidad dentro de la red y que requieren un estudio más específico. En esta sección se establecen algunos parámetros obtenidos de esta investigación para caracterizar el comportamiento vehicular dentro del sistema.

4.2.1.1 Densidad y composición del flujo vehicular

La densidad de la hora pico que se obtuvo del modelo, se obtuvo con la calibración del sistema alcanzando su estabilidad 56 veh./km (ver sección 3.9.5.9) sin considerar a los vehículos estacionados, sin embargo la densidad del sistema es inestable, con el pasar de las horas los vehículos ingresan y salen en cantidades distintas, llegando para

el caso del mediodía y la noche a saturar las vías de tránsito.

A partir de el gráfico en la figura 3.36 se promedió la composición vehicular en toda la zona central del centro histórico. El centro histórico tiene un amplio dominio de vehículos livianos seguidos de las motocicletas, en menor volumen están las mototaxis y los buses, y más resegados aún están los camiones. De acuerdo al modelo realizado, la composición vehicular queda establecida en el gráfico de la figura 4.7 (La composición vehicular en cada intersección se encuentra en el anexo A-1 y A-2).

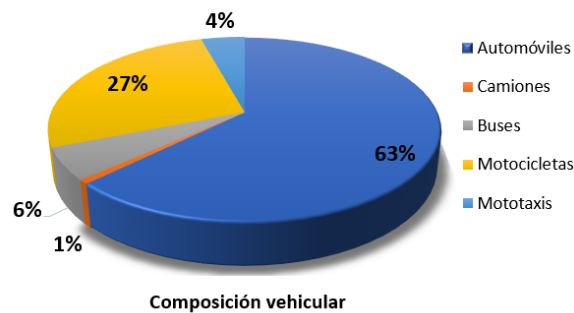


Figura 4.7: Composición vehicular en el sector central del Centro Histórico

Fuente: Elaboración propia.

La densidad para cada vehículo de acuerdo a las corridas con el modelo calibrado para la hora pico se ve en la tabla 4.23, esta densidad representa a todos los vehículos en movimiento (no se considera a los vehículos en estacionamiento).

Cuadro 4.23: Densidad vehicular durante la hora pico veh./km

Vehículo	Promedio
Automóviles	29.71
Camiones	0.41
Buses	3.34
Motocicletas	19.15
Mototaxis	3.06
Total	55.67

Fuente: Elaboración propia

En promedio el parque vehicular que compone la zona central del Centro Histórico de Ayacucho abarcó una cantidad de 465 vehículos, durante una hora pico.

4.2.1.2 Velocidades promedio

Otros resultados que se obtuvieron son las velocidades promedio que adoptan los vehículos en la red, afectados por el tráfico vehicular, tenemos un promedio de 11.16 km/h como velocidad general en el que transcurren los vehículos.

Cuadro 4.24: Velocidades promedio

Vehículo	Velocidad promedio(km/h)
Autos	12.74
Camión	12.39
Bus	11.10
Motocicletas	13.70
Mototaxis	13.04

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados de Vissim

La tabla 4.24 muestra las velocidades de acuerdo al tipo de vehículos, los automóviles en este caso se ven afectados más a la menor velocidad, debido a que representan la mayor cantidad de vehículos dentro de la red, los buses conservan una velocidad media por contar con rutas definidas y las motocicletas tienen una velocidad mayor por su facilidad de desplazamiento en zonas de congestión.

4.2.2 Evaluación

Para evaluar el sistema de regulación, se obtuvo parámetros de tránsito que permiten establecer las condiciones de movilidad en las intersecciones de la red, entre los que tenemos:

- Demora promedio por vehículo
- Densidades de flujo vehicular
- Longitudes de cola

De acuerdo a esto y con la tabla 4.25, se asociaron los niveles de servicio a las intersecciones de acuerdo a los valores de demora obtenidos en el modelamiento.

Cuadro 4.25: Niveles de servicio en intersecciones

Nivel de Servicio	Sin semáforo (seg./V)	Con semáforo (seg./V)
A	0 - 10	0 -10
B	>10 - 15	>10 -20
C	>15 - 25	>20 - 35
D	>25 - 35	>35 - 55
E	>35 - 50	>55 - 80
F	>50	>80

Fuente: Manual de Capacidad de Carreteras HCM (2000)

Los resultados basados en las demoras promedio de acuerdo al modelamiento realizado en Vissim están en las tablas 4.26, 4.27, 4.28 y 4.29 (Resumen completo en el Anexo E-1), la tabla tiene la calificación que tiene una intersección de acuerdo a la demora que tienen los vehículos al pasar por ésta, además se arroja la calificación general de la intersección de acuerdo a la máxima demora ocurrida en esta intersección.

Entre las intersecciones que tuvieron un peor desempeño están: el Jr. 3 Máscaras y el Jr. Cusco; el Jr. 2 de Mayo y el Jr. San Martín; el Jr. 2 de Mayo y el Jr. Arequipa, todas éstas con el nivel de servicio en D.

En resumen tabla 4.30 muestra la cantidad de intersecciones para cada nivel de servicio durante la hora pico, predominando el nivel de servicio “B”.

La figura 4.8 nos muestra cómo se distribuyen las demoras a lo largo de todas las intersecciones, con la densidad que se identificó durante la hora pico.

Cuadro 4.26: Evaluación de intersecciones

Intersección	Ingreso	Salida	Demora (s)	Nivel de Servicio	Demora prom (s)	Nivel de Servicio
Jr. Libertad - Av. M. Cáceres	Jr. Libertad	Av. M. Cáceres-E	8	A	15	B
	Jr. Libertad	Av. M. Cáceres-O	8	A		
	Av. M. Cáceres-E	Jr. Libertad	25	C		
	Av. M. Cáceres-E	Av. M. Cáceres-O	21	C		
	Av. M. Cáceres-O	Jr. Libertad	25	C		
Jr. Libertad - Jr. Bellido	Av. M. Cáceres-O	Av. M. Cáceres-E	16	B	13	B
	Jr. Libertad	Jr. Bellido	12	B		
	Jr. Libertad	Jr. Libertad	14	B		
	Jr. Bellido	Jr. Bellido	11	B		
Jr. Libertad - Jr. Callao	Jr. Bellido	Jr. Libertad	10	A	12	B
	Jr. Libertad	Jr. Libertad	7	A		
	Jr. Libertad	Jr. Callao	6	A		
Jr. Libertad - Jr. Lima	Jr. Callao	Jr. Libertad	21	C	12	B
	Jr. Callao	Jr. Callao	21	C		
	Jr. Callao	Jr. Callao	21	C		
Jr. Libertad - Jr. Lima	Jr. Libertad	Jr. Libertad	8	A	12	B
	Jr. Libertad	Jr. Lima	8	A		
	Jr. Lima	Jr. Libertad	22	C		
Jr. Libertad - Jr. San Martín	Jr. Lima	Jr. Lima	25	C	22	C
	Jr. San Martín-O	Jr. Libertad	19	B		
	Jr. Libertad	Jr. Libertad	15	B		
	Jr. Libertad	Jr. San Martín-O	14	B		
Jr. Libertad - Jr. F. Vivanco	Jr. San Martín-E	Jr. Libertad	34	C	6	A
	Jr. San Martín-E	Jr. San Martín-O	37	D		
	Jr. Libertad	Jr. Libertad	6	A		
	Jr. Libertad	Jr. F. Vivanco	6	A		
Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	Jr. San Martín-E	Jr. San Martín-O	37	D	9	A
	Jr. Garcilaso de la V.	Jr. Garcilaso de la V.	8	A		
	Jr. Garcilaso de la V.	Av. M. Cáceres-O	9	A		
	Jr. Garcilaso de la V.	Av. M. Cáceres-E	7	A		
	Av. M. Cáceres-O	Jr. Garcilaso de la V.	7	A		
	Av. M. Cáceres-O	Av. M. Cáceres-E	5	A		
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	Av. M. Cáceres-E	Jr. Garcilaso de la V.	10	A	5	A
	Av. M. Cáceres-E	Av. M. Cáceres-O	12	B		
	Jr. Garcilaso de la V.	Jr. Garcilaso de la V.	5	A		
	Jr. Garcilaso de la V.	Jr. Bellido	4	A		
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Callao	Jr. Bellido	Jr. Garcilaso de la V.	3	A	13	B
	Jr. Bellido	Jr. Bellido	4	A		
	Jr. Garcilaso de la V.	Jr. Garcilaso de la V.	9	A		
	Jr. Garcilaso de la V.	Jr. Callao	10	B		
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	Jr. Callao	Jr. Garcilaso de la V.	18	B	12	B
	Jr. Callao	Jr. Callao	20	C		
	Jr. Grau	Jr. Garcilaso de la V.	7	A		
	Jr. Grau	Jr. Lima	8	A		
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	Jr. Lima	Jr. Garcilaso de la V.	22	C	12	B
	Jr. Lima	Jr. Lima	20	C		
	Jr. Lima	Jr. Lima	20	C		

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Vissim

Cuadro 4.27: Evaluación de intersecciones

Intersección	Ingreso	Salida	Demora (s)	Nivel de Servicio	Demora prom (s)	Nivel de Servicio
Jr. Grau - Jr. San Martín	Jr. Grau	Jr. Grau	8	A	12	B
	Jr. Grau	Jr. San Martín	8	A		
	Jr. San Martín	Jr. Grau	13	B		
	Jr. San Martín	Jr. San Martín	17	C		
Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	Jr. Grau	Jr. Grau	17	B	33	C
	Jr. Grau	Jr. F. Vivanco	17	B		
	Jr. F. Vivanco	Jr. Grau	43	D		
	Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	43	D		
Jr. 9 de Diciembre - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-E	Jr. 9 de diciembre	15	B	12	B
	Av. M. Cáceres-E	Av. M. Cáceres-O	13	B		
	Av. M. Cáceres-O	Jr. 9 de diciembre	13	B		
	Av. M. Cáceres-O	Av. M. Cáceres-E	10	B		
	Jr. 9 de diciembre	Jr. 9 de diciembre	12	B		
	Jr. 9 de diciembre	Av. M. Cáceres-E	12	B		
Jr. 9 de Diciembre - Jr. Bellido	Jr. 9 de diciembre	Jr. Bellido	7	A	6	A
	Jr. 9 de diciembre	Jr. 9 de diciembre	8	A		
	Jr. Bellido	Jr. Bellido	4	A		
	Jr. Bellido	Jr. 9 de diciembre	5	A		
Jr. 9 de Diciembre - Jr. Callao	Portal Unión	Portal Independencia	11	B	14	B
	Portal Unión	Jr. 9 de diciembre	15	B		
	Portal Unión	Jr. Callao	15	B		
Jr. 28 de Julio - Jr. Lima	Portal Independencia	Portal Constitucional	18	B	9	A
	Jr. Lima	Portal Constitucional	5	A		
Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	Jr. San Martín	Jr. San Martín	4	A	4	A
Jr. 28 de Julio - Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	Jr. 28 de Julio	0	A	10	B
	Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	10	B		
Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	Jr. Asamblea	Av. M. Cáceres-E	25	C	21	C
	Jr. Asamblea	Av. M. Cáceres-O	19	B		
	Av. M. Cáceres-E	Av. M. Cáceres-O	15	B		
	Av. M. Cáceres-O	Av. M. Cáceres-E	20	C		
Jr. Asamblea - Jr. Bellido	Jr. Bellido	Jr. Bellido	8	A	8	A
Jr. Asamblea - Jr. Cusco	Portal Municipal	Portal Unión	7	A	12	B
	Jr. Cusco	Portal Unión	22	C		
Jr. 2 de Mayo - Jr. Arequipa	Jr. 2 de Mayo	Portal Municipal	49	D	47	D
	Jr. 2 de Mayo	Jr. Arequipa	49	D		
	Portal Constitucional	Portal Municipal	32	C		
	Portal Constitucional	Jr. Arequipa	50	D		
Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	Jr. 2 de Mayo	Jr. 2 de Mayo	42	E	28	D
	Jr. 2 de Mayo	Jr. San Martín	39	E		
	Jr. San Martín	Jr. 2 de Mayo	22	C		
	Jr. San Martín	Jr. San Martín	21	C		

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Vissim

Cuadro 4.28: Evaluación de intersecciones

Intersección	Ingreso	Salida	Demora (s)	Nivel de Servicio	Demora prom (s)	Nivel de Servicio
Jr. 2 de Mayo - Jr. F. Vivanco	Jr. 2 de Mayo	Jr. 2 de Mayo	32	C	34	C
	Jr. 2 de Mayo	Jr. F. Vivanco	26	C		
	Jr. F. Vivanco	Jr. 2 de Mayo	40	D		
	Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	35	C		
Pje. Cáceres - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-E	Psje. Cáceres	0	A	19	C
	Av. M. Cáceres-E	Av. M. Cáceres-O	0	A		
	Av. M. Cáceres-O	Psje. Cáceres	32	D		
	Av. M. Cáceres-O	Av. M. Cáceres-E	31	D		
Jr. 3 Máscaras - Av. M. Cáceres	Av. M. Cáceres-O	Jr. 3 Máscaras	16	B	33	C
	Av. M. Cáceres-O	Av. M. Cáceres-E	13	B		
	Av. M. Cáceres-E	Jr. 3 Máscaras	66	E		
	Av. M. Cáceres-E	Av. M. Cáceres-O	54	D		
Jr. 3 Máscaras - Jr. Bellido	Jr. 3 Máscaras	Jr. 3 Máscaras	26	C	38	D
	Jr. 3 Máscaras	Jr. Bellido	22	C		
	Jr. Bellido	Jr. 3 Máscaras	61	E		
	Jr. Bellido	Jr. Bellido	55	D		
Jr. 3 Máscaras - Jr. Cusco	Jr. 3 Máscaras	Jr. 3 Máscaras	27	D	29	D
	Jr. 3 Máscaras	Jr. Cusco	26	D		
	Jr. Cusco	Jr. 3 Máscaras	26	D		
	Jr. Cusco	Jr. Cusco	38	E		
Jr. 3 Máscaras - Jr. Arequipa	Jr. 3 Máscaras	Jr. 3 Máscaras	16	C	34	D
	Jr. 3 Máscaras	Jr. Arequipa	15	C		
	Jr. Arequipa	Jr. 3 Máscaras	57	F		
	Jr. Arequipa	Jr. Arequipa	64	F		
Jr. 3 Máscaras - Jr. San Martín	Jr. 3 Máscaras	Jr. 3 Máscaras	15	B	10	A
	Jr. 3 Máscaras	Jr. San Martín	16	C		
	Jr. San Martín	Jr. 3 Máscaras	2	A		
	Jr. San Martín	Jr. San Martín	6	A		
Jr. 3 Máscaras - Jr. F. Vivanco	Jr. 3 Máscaras	Jr. F. Vivanco	10	A	12	B
	Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	13	B		
Jr. Sol - Av. M. Cáceres	Jr. Sol	Av. M. Cáceres-E	26	C	25	C
	Jr. Sol	Los Andes	28	C		
	Jr. Sol	Av. M. Cáceres-O	38	D		
	Av. M. Cáceres-E	Los Andes	19	B		
	Av. M. Cáceres-E	Av. M. Cáceres-O	26	C		
	Av. M. Cáceres-O	Los Andes	11	B		
Jr. Sol - Jr. Untiveros	Jr. Sol	Jr. Sol	19	C	18	C
	Jr. Untiveros	Jr. Sol	17	C		
Jr. Sol - Jr. Bellido	Jr. Bellido	Jr. Sol	6	A	8	A
	Jr. Bellido	Jr. Bellido	6	A		
	Jr. Sol	Jr. Sol	9	A		
	Jr. Sol	Jr. Bellido	8	A		

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Vissim

Cuadro 4.29: Evaluación de intersecciones

Jr. Sol - Jr. Cusco	Jr. Sol	Jr. Sol	5	A	5	A
	Jr. Sol	Jr. Cusco	4	A		
	Jr. Cusco	Jr. Sol	7	A		
	Jr. Cusco	Jr. Cusco	6	A		
Jr. Sol - Jr. Arequipa	Jr. Arequipa-O	Jr. Sol-S	1	A	1	A
	Jr. Arequipa-O	Jr. Sol-N	1	A		
	Jr. Arequipa-E	Jr. Sol-S	1	A		
	Jr. Arequipa-E	Jr. Sol-N	0	A		
Jr. Sol - Jr. San Martín	Jr. Sol	Jr. Sol	22	C	19	C
	Jr. Sol	Jr. San Martín	22	C		
	Jr. San Martín	Jr. Sol	16	C		
	Jr. San Martín	Jr. San Martín	16	C		
Jr. Pizarro - Jr. Bellido	Jr. Bellido	Jr. Huanta	29	D	8	A
	Jr. Bellido	Jr. Bellido	40	E		
	Jr. Pizarro	Jr. Huanta	1	A		
	Jr. Pizarro	Jr. Bellido	1	A		
Jr. Pizarro - Jr. Cusco	Jr. Cusco	Jr. Pizarro	17	C	4	A
	Jr. Cusco	Jr. Cusco	34	D		
	Jr. Pizarro	Jr. Pizarro	2	A		
	Jr. Pizarro	Jr. Cusco	2	A		
Jr. Pizarro - Jr. Arequipa	Jr. Pizarro	Jr. Arequipa-E	4	A	4	A
	Jr. Pizarro	Jr. Pizarro	3	A		
	Jr. Pizarro	Jr. Arequipa-O	3	A		
Jr. Pizarro - Jr. Caviedes	Jr. Caviedes	Jr. Pizarro-N	2	A	2	A
	Jr. Caviedes	Jr. Pizarro-S	1	A		
	Jr. Pizarro	Jr. Pizarro	3	A		

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Vissim

Cuadro 4.30: Resumen de la evaluación de intersecciones

Nivel de Servicio	Cantidad de intersecciones
A	14
B	16
C	5
D	6
E	0
F	0

Fuente: Elaboración propia

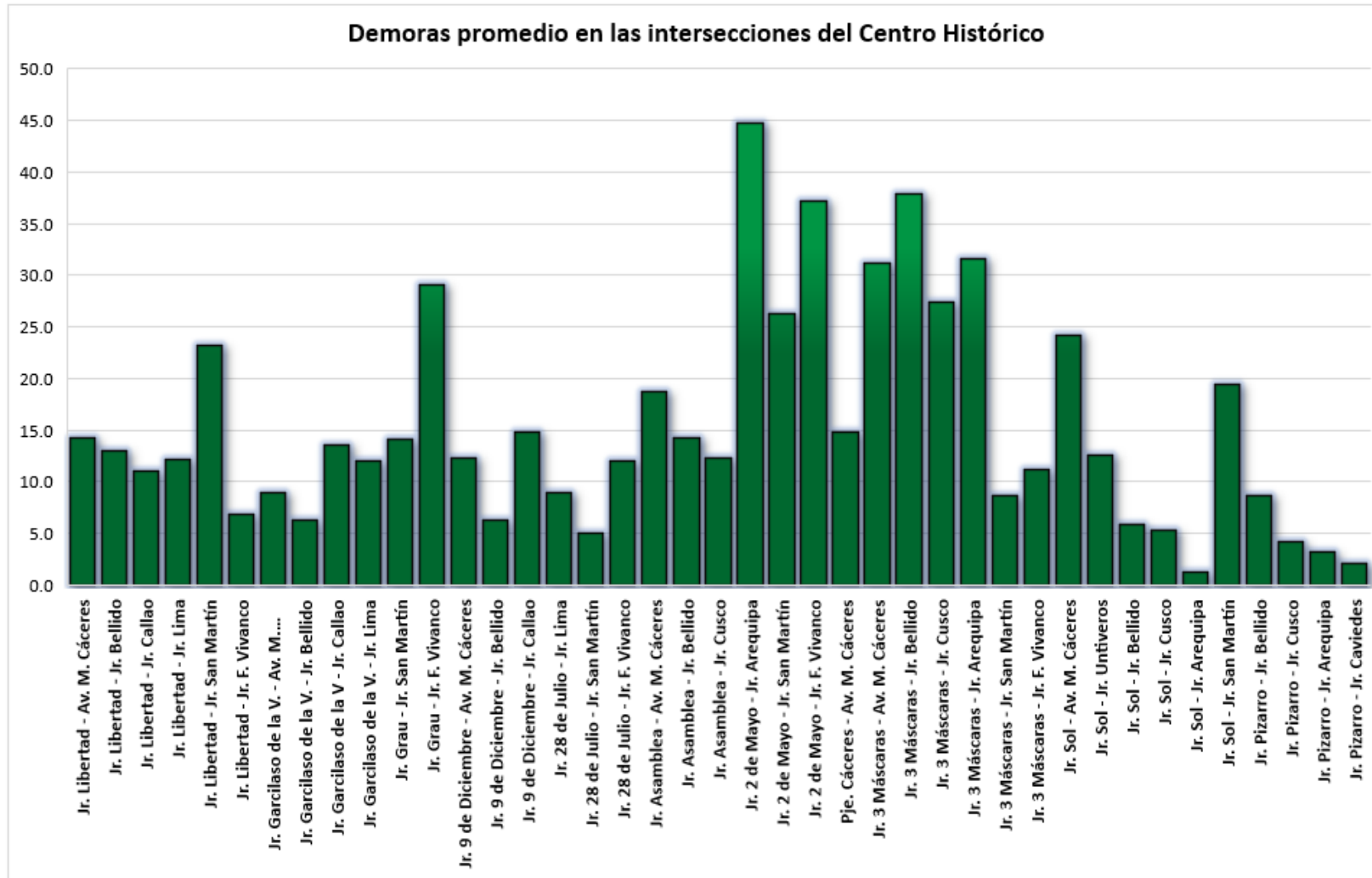


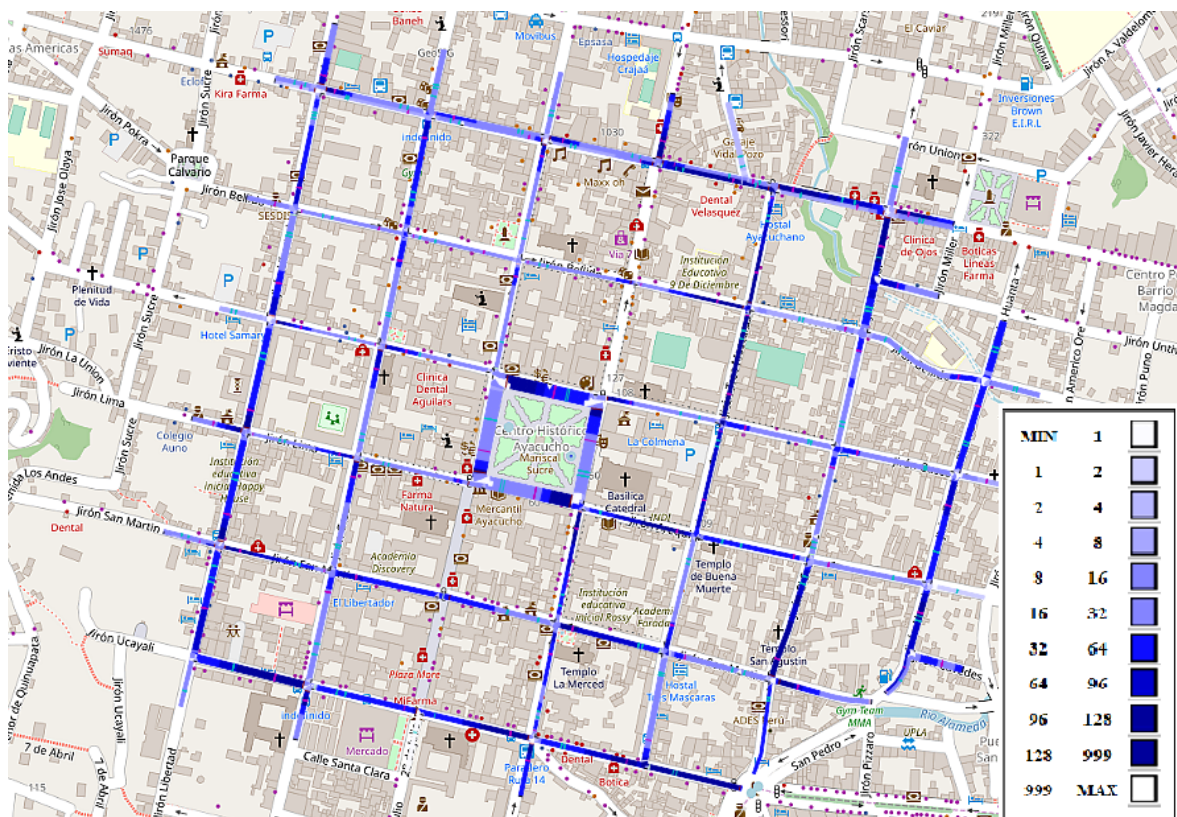
Figura 4.8: Demoras en las intersecciones analizadas (s/veh.)

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Identificación de zonas de congestión

Existen diversas maneras de predecir o identificar posibles puntos de congestión, puede ser basado en la concentración de mayores densidades vehiculares, concentración de menores velocidades de los vehículos, o por mayores demoras registradas en una intersección.

La densidades vehiculares representadas como acumulación de vehículos en lo largo de cada cuadra que contiene la red durante el periodo que dura la hora pico se muestran en la figura 4.9 a un nivel mesoscópico, esta representación ubica los puntos de congestión en las zonas que más vehículos han contenido para el periodo de análisis, de esta manera las zonas donde se formaría la congestión corresponden a las que mayores densidades contengan en este caso las densidades críticas superan los 128 veh./km.



Las velocidades a las que circulan los vehículos han sido establecidas de acuerdo al promedio calculado en toda la red, pero de acuerdo al modelo de seguimiento de Mahut, estas se van alterando a su paso por el tráfico, en la figura 4.10 se ven las zonas críticas de velocidades, en esta representación los puntos de congestión se darían donde las velocidades son mínimas, en la representación las zonas de congestión se ubican en las zonas donde las velocidades son menores a los 10 km/h.

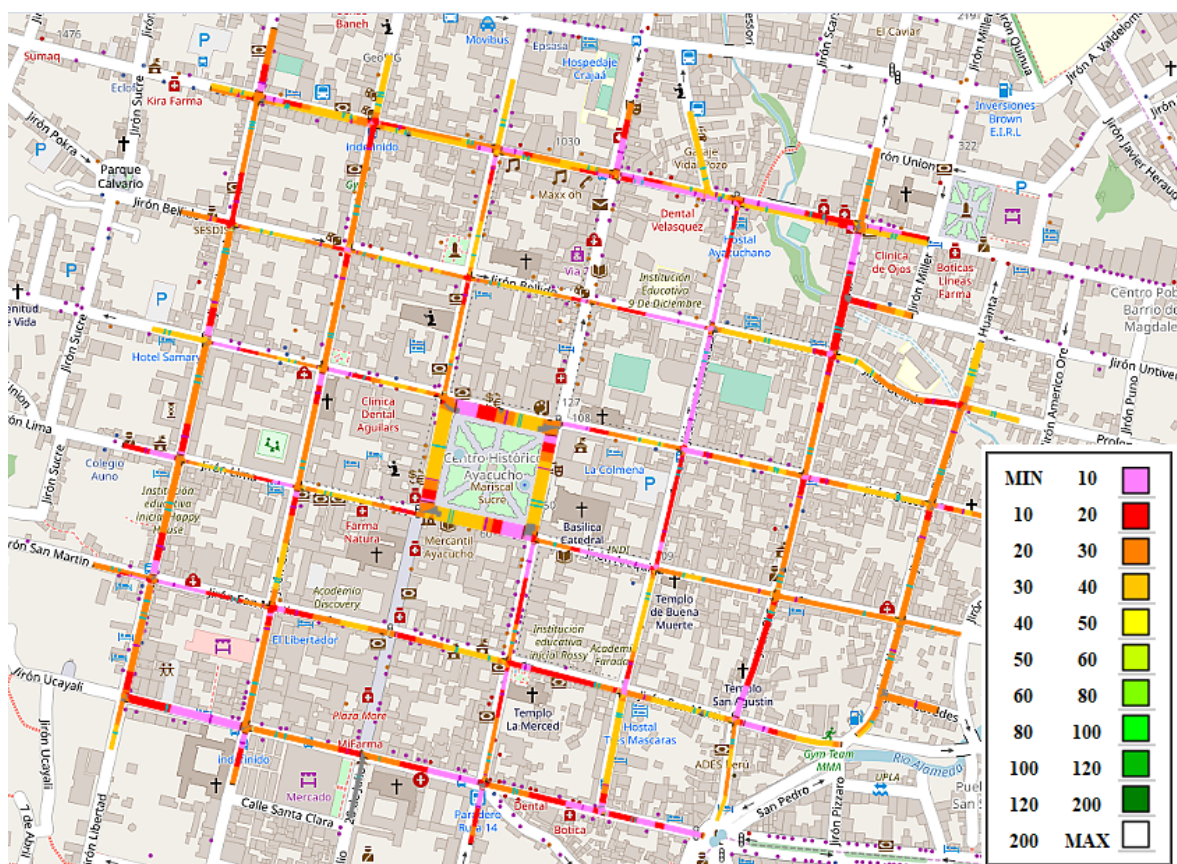


Figura 4.10: Zonas de congestión de acuerdo a la velocidad (km/h) en la zona central del Centro Histórico

Fuente: Resultados de Vissim.

Las demoras que incurren a tener los vehículos en su tránsito para pasar una intersección se representan en la figura 4.11, este gráfico muestra como las demoras se concentran más en la cercanía a la intersección, sin embargo solo para algunas cuadras esta demora se prolonga aún más a lo largo de la cuadra, generalmente en calles que

a comprender esta etapa de congestión en que incurre la red de análisis, partiendo del modelo calibrado, se incrementó la densidad vehicular para cada cuadra con la misma proporción que se tiene en la hora pico de la mañana, de esta manera para cada densidad de trabajo se obtuvieron los niveles de servicio en la red, el flujo vehicular en cada intersección y la demora promedio presente en ellas.

Todo el análisis del efecto de la densidad se da partiendo de la hora pico, que tiene una densidad aproximada de 56 veh./km. Para todos los otros casos de análisis se realizan los incrementos de densidad sin considerar un incremento continuo al valor de ésta y cada resultado corresponde al promedio de 10 corridas con números de semilla distintos.

El aumento de la densidad afectó provocando un incremento casi exponencial de las demoras de las intersecciones como se ve en el gráfico de la figura 4.12, las intersecciones que son más afectadas son que ya previamente tenían un menor nivel de servicio o grandes demoras (en la hora pico con densidad de 56 veh/km), mientras que el efecto en las intersecciones con buen nivel de servicio es casi inapreciable. En comparación a la tabla 4.16 donde la demora promedio a 20 años de 39.5 s para ese periodo no alcanzaría los 97 veh./km, pudiendo ser aún viable el tránsito a pesar de disminuirse el nivel de servicio.

La variación de los flujos vehiculares que se dieron paso por las intersecciones, se pueden ver en la figura 4.13, de esta manera entender el comportamiento del flujo vehicular con el aumento de la densidad, pasada la hora pico.

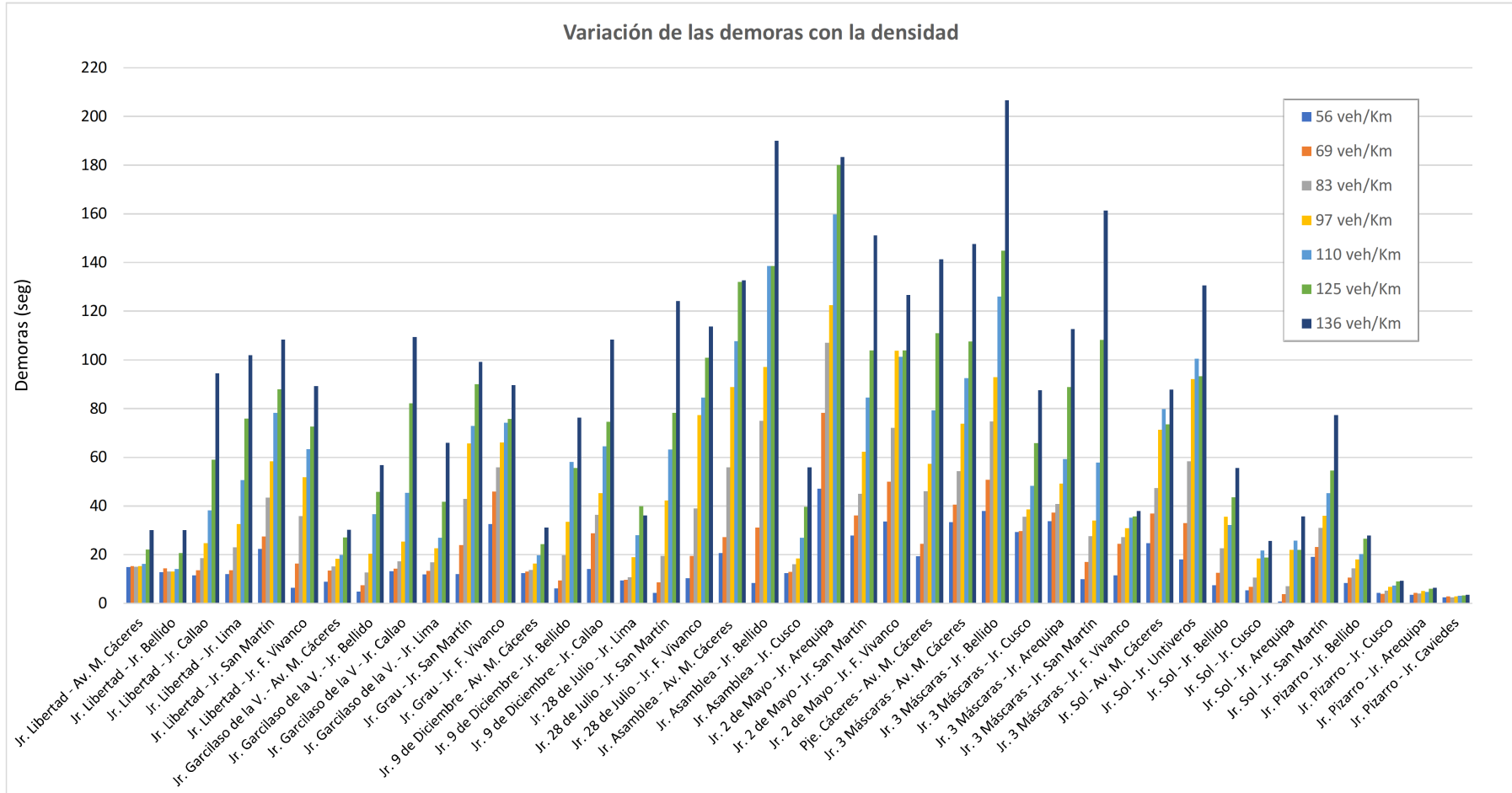


Figura 4.12: Variación de las demoras promedio por intersección a distintas densidades vehiculares

Fuente: Elaboración propia.

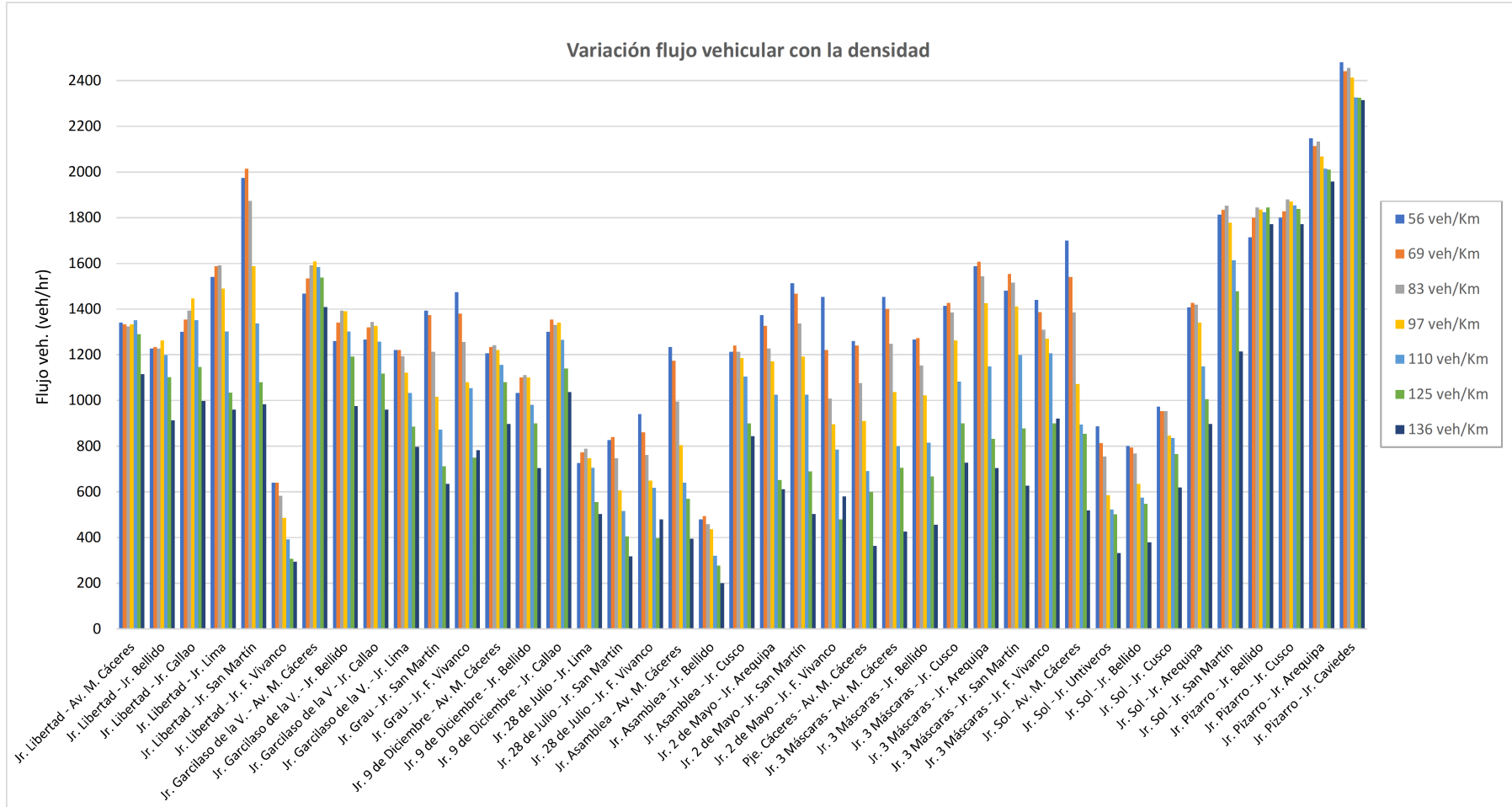


Figura 4.13: Variación del flujo vehicular en cada intersección a distintas densidades vehiculares

Fuente: Elaboración propia.

Durante la hora pico se ve que hay intersecciones que ya llegaron a su máxima capacidad, y que a partir de allí, el incremento de la densidad solo hace que el flujo en la intersección disminuya; pero también hay otras que aún no han logrado llegar a su máxima capacidad para acoger flujo vehicular, logrando llegar a este punto con densidades vehiculares mayores en el sistema, para luego permitir el decrecimiento del flujo vehicular. Esto explica que el comportamiento de las intersecciones varía de manera distinta y que sus capacidades no son homogéneas, por las distintas interacciones que tienen cada intersección con la otra.

Los niveles de servicio también fueron afectados por el incremento de la densidad. La hora pico tienen un buen número de intersecciones con niveles de servicio aceptable, sin ninguna intersección con NS en F, el incremento de densidad luego se mantiene en una zona estable, hasta llegar a los 97 veh./km, a partir de esta densidad el NS F se incrementa considerablemente, esto implica que a partir de esta densidad el sistema de regulación actual no es conveniente.

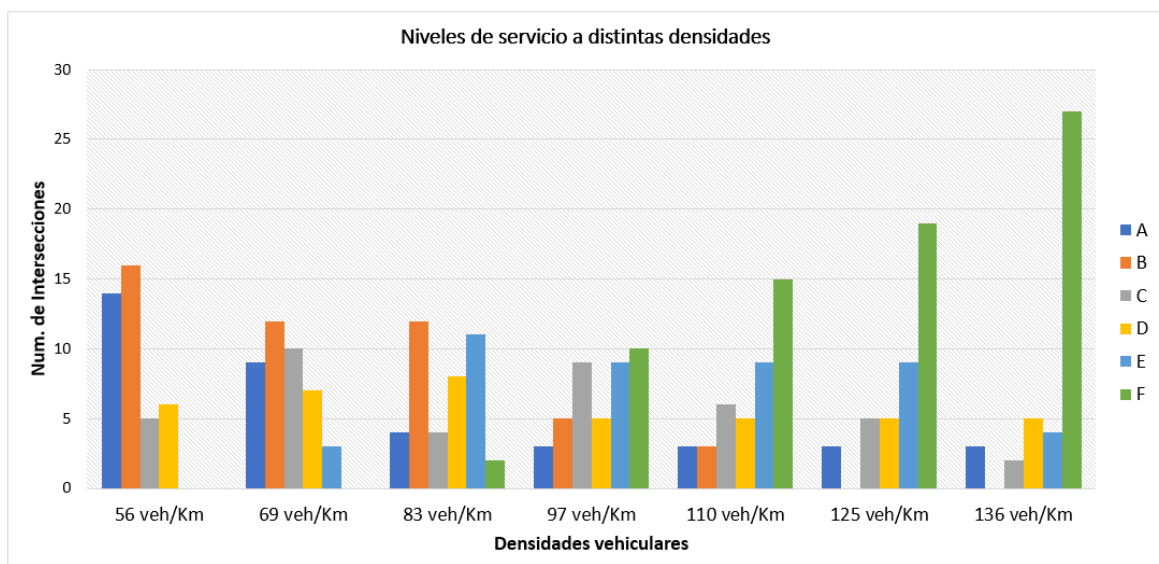


Figura 4.14: Efecto del incremento de densidad en los niveles de servicio de la red vial

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Otras aplicaciones

La funcionalidad y la aplicación del modelo vehicular es diverso y dinámico, al condicionar el estado de la red en el modelo y el comportamiento vehicular, basta con la variación de datos, para obtener resultados de acuerdo a la necesidad requerida.

Entre las aplicaciones que se puede dar al modelo tenemos la posibilidad de simular problemas tráfico, como son el bloqueo o cierre de algunas vías, que desvíen el flujo vehicular a las calles aledañas; pero de igual modo se puede emular experimentos que busquen mejorar la condición del tráfico.

Durante los primeros meses del 2019, la red central del centro histórico se vio afectada por dos sucesos: la primera fue el cierre del Jr. Sol por trabajos de mantenimiento, y lo segundo fue el colocado de hitos de tránsito en algunas vías a fin de separar y diferenciar los carriles, de esta manera mejorar las condiciones del tráfico en la ciudad.

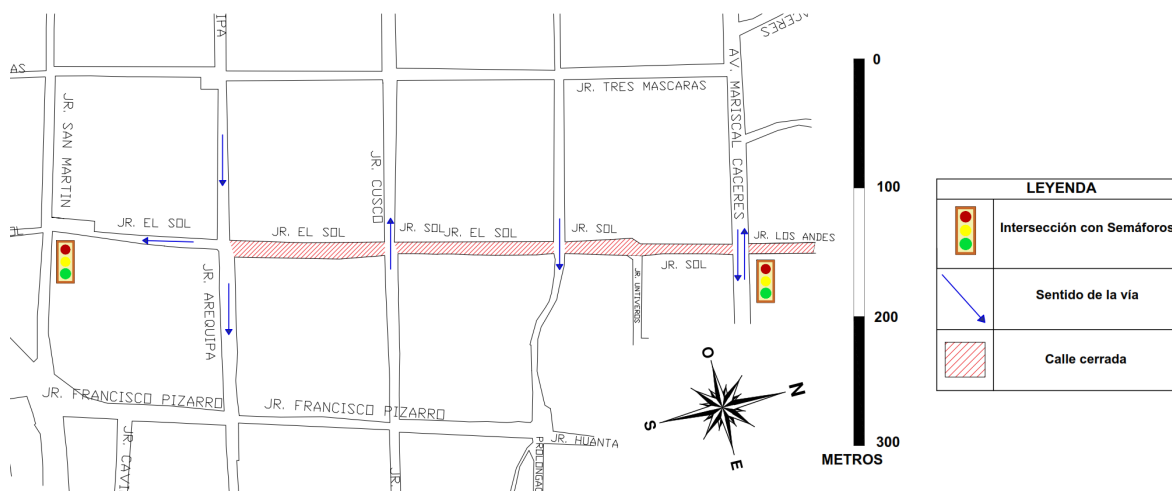


Figura 4.15: Tramos donde se cerró el Jr. Sol

Fuente: Elaboración propia.

Para modelar este estado del tráfico, fue necesario ajustar el modelo de acuerdo a las nuevas condicionantes que se generaron. El caso del cierre del Jr. Sol, significó, que una ruta principal para los buses desaparezca, desviando su ruta hacia otro una vía fuera de la red de trabajo, además este hecho ocasionó también que una cuadra del



Figura 4.16: Cierre del Jr. Sol por trabajos de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia.

Jr. Arequipa cambie de sentido. El caso de los hitos intermedios, hace que el tráfico vehicular adopte un comportamiento urbano, en la que no se permiten adelantamientos y el tránsito se realice con dos carriles diferenciados por los hitos. Las calles donde se colocaron hitos o conos viales fueron; Jr. Grau, Jr. Garcilaso de la Vega, Jr. San Martín, Jr. Asamblea y el Jr. F Vivanco dentro del a zona Central.

Con los trabajos de aforo que se realizaron en el mes de marzo de 2019, se vio un cambio significativo en el ingreso vehicular de algunas calles en comparación a los aforos realizados en septiembre de 2018, sin embargo la mayoría de vías no sufrió grandes cambios en sus flujos vehiculares (ver tablas 3.30 y 3.31)

El producto de los cambios que se realizaron durante el mes de marzo de 2019 y que se adaptó en un modelamiento, no significó mejoras en los niveles de servicio ni disminución de las demoras en las intersecciones en comparación al modelo del mes de septiembre de 2018. Sin embargo, las longitudes de cola sufrieron una mejora



Figura 4.17: Hitos y conos viales en el sector central del Centro Histórico

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.31: Comparación de longitudes de cola por efecto de la habilitación de hitos

Intersección	Cuadra	Long. de cola prom (m)	
		Sin hitos	Con hitos
Jr. Garcilaso de la V. - Av. M. Cáceres	Jr. Garcilaso de la V.	5.27	0.17
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Bellido	Jr. Garcilaso de la V.	1.33	0.22
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Callao	Jr. Garcilaso de la V.	8.38	6.42
Jr. Garcilaso de la V. - Jr. Lima	Jr. Grau	7.02	6.66
Jr. Grau - Jr. San Martín	Jr. Grau	0.39	0.03
Jr. Grau - Jr. San Martín	Jr. San Martín	6.99	5.98
Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	Jr. Grau	10.86	11.18
Jr. Grau - Jr. F. Vivanco	Jr. F. Vivanco	50.67	16.36
Jr. 28 de Julio - Jr. San Martín	Jr. San Martín	3.74	2.12
Jr. Asamblea - Av. M. Cáceres	Jr. Asamblea	15.94	23.21
Jr. 2 de Mayo - Jr. San Martín	Jr. San Martín	29.95	19.80

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Vissim

considerable, la tabla 4.31 compara las colas promedio que se presentaron en las calles directamente involucradas con los hitos viales, entre el modelo del mes de septiembre de 2018 (red original) y marzo de 2019 (red con propuesta de hitos viales y el Jr. Sol cerrado), casi en todos los casos las longitudes de cola se redujeron debido al

ordenamiento vehicular que ocasionó esta propuesta.

Otro ejemplo de una aplicación es la capacidad de predecir ciertos estados que pueden ocurrir en la zona central del centro histórico, como sería el caso de cerrar el parque central del centro histórico, este suceso, conllevaría cerrar los ingresos en las calles de afluente directo al parque. En un ejercicio realizado con el modelamiento calibrado, se puede ver las diferencias en basadas en las densidades vehiculares entre el estado normal y el caso supuesto de cierre del parque central, reflejadas en las calles circundantes como se ve en la figura 4.18

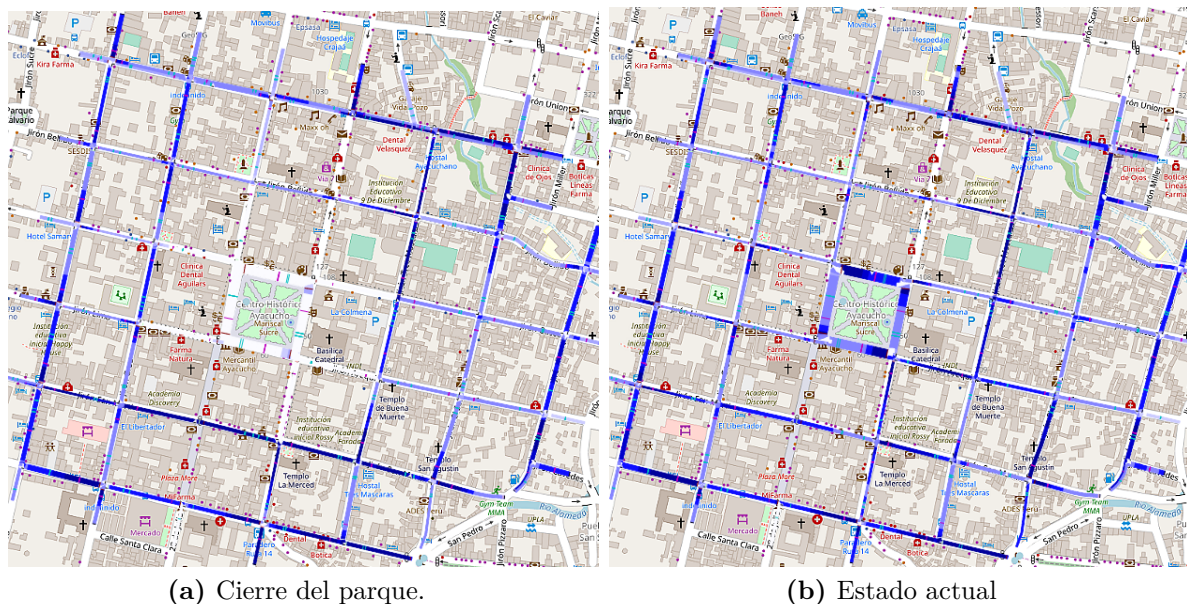


Figura 4.18: Supuesto de cierre del Parque Central

Fuente: Elaboración propia

Otras aplicaciones que no se han detallado es la calidad de emulación del movimiento del sistema de regulación de tráfico en el Centro Histórico desarrollado, el modelamiento a nivel mesoscópico permite, gracias al modelamiento híbrido, observar una red con el movimiento vehicular interactuando entre sí en cada calle dentro del centro histórico, esta emulación es fundamental para la elaboración del modelo, porque permitió identificar errores en el movimiento vehicular en el sistema, además muestra el movimiento vehicular

a tiempo real de la hora pico en este caso.

El funcionamiento de la simulación híbrida, se puede ver en la figura 4.19, donde el movimiento vehicular se ve en el modelo, esto ayudará a ver los efectos de las decisiones de control de tráfico en para una intersección y el efectos en sus alrededores, a partir de la observación del tráfico.

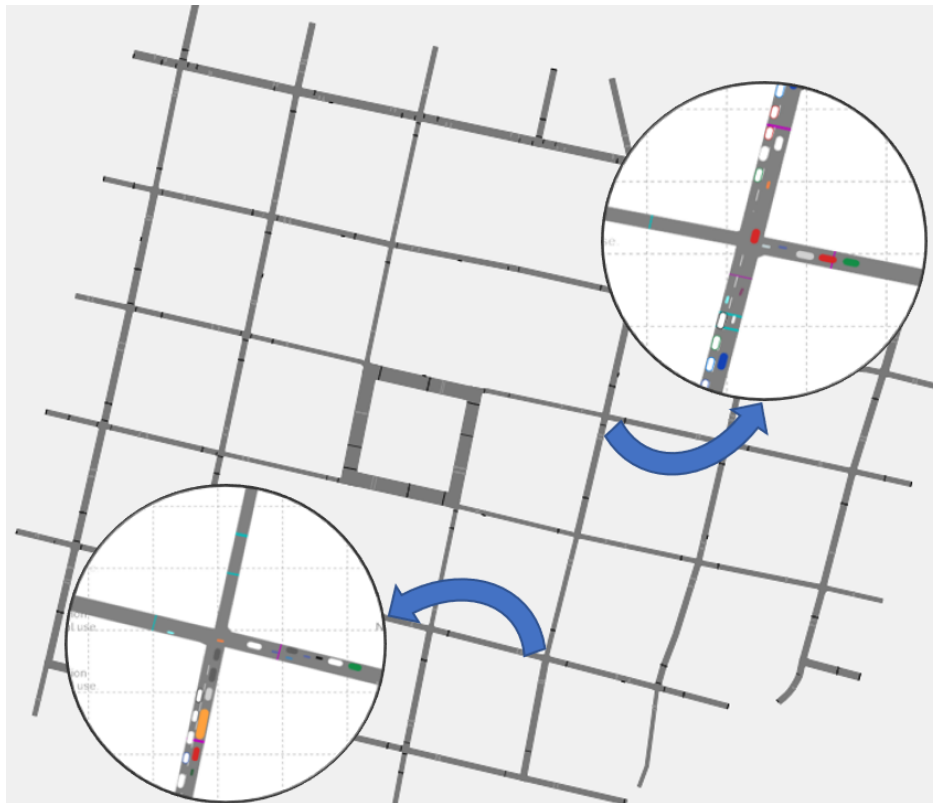


Figura 4.19: Visualización de la simulación del modelo

Fuente: Elaboración propia.

Con el establecimiento de la composición vehicular el modelo híbrido también puede detallar la interacción de los vehículos de diferentes tamaños en su paso por las vías, sin embargo requiere un mejor nivel de desarrollo (modelamiento microscópico), para mejorar la calidad.

5

Conclusiones

5.1 Discusión de resultados

- El uso de tramos donde se analizan los tiempos de viaje de vehículos y se comparan con los captados en campo, se realizó tomando en cuenta la práctica que se utiliza en el modelamiento microscópico, para la calibración del modelos de seguimiento de Wiedemann. En este caso fue suficiente la prueba de hipótesis para alcanzar los objetivos propuestos. La predicción de los tiempos de viaje en el modelo es una muestra que se puede estimar las demoras de las intersecciones y así evaluar en base a los niveles de servicio.
- Sobre las deficiencias, los escenarios fueron propuestos en base a criterio de lo que se pensaría fuesen las deficiencias en base a las características del Centro Histórico. En cuanto al modelo que simula la reapertura de vías y el cambio de rutas, se presentó a fin de darle simetría a la red, el modelo de la planteó a partir del modelo actual y el sentido de los tramos se basó en criterio para para mejorar el sistema actual.
- Sobre los resultados que se arrojan en los crecimientos vehiculares, y las grandes demoras que se generaron a los 10 y aún más a los 20 años, estaría en función al crecimiento vehicular, en este caso se usó la tasa de crecimiento poblacional del INEI para la provincia de Ayacucho, usado generalmente para predecir flujos futuros, sin embargo el tráfico vehicular que se analiza es a nivel horario (hora pico), el flujo horario es muy variable durante un día, por este motivo predecir el flujo horario futuro es complicado, sin embargo se presentan los resultados para

fines académicos.

- Se demostró como el modelo puede predecir longitudes máximas de colas en las intersecciones de la red, sin embargo los valores captados en campo y los que se generó en el modelamiento no son exactos en algunos casos, esto se debe a que la longitud máxima es muy variable y su medición en campo requiere bastantes recursos, la mediciones que se hicieron correspondieron de las que se captaron con grabaciones aéreas para una hora pico en las calles que se analizan.

5.2 Conclusiones

- De la elaboración del modelamiento de tráfico en el Centro Histórico de Ayacucho, se concluye que se pueden obtener resultados de demoras correctos y dinámicos, aplicables en la evaluación de un sistema de regulación de tránsito o una red de flujo vehicular. Por tanto se puede decir que a partir del modelamiento mesoscópico, calibrado principalmente en densidades y flujos vehiculares, se pueden simular correctamente el sistema de tráfico vehicular en las horas pico, describiendo las formaciones de congestión vehicular. Como se demostró en el contraste de la hipótesis general, los tiempos de viaje que se obtuvo en el modelamiento concuerdan con los obtenidos en campo, y por tanto la evaluación de demoras es factible. La evaluación del sistema de regulación de tráfico se hizo para cada intersección contenida en la red en base a las demoras (s/veh.) como propone el HCM, se trabajó con niveles de servicio en intersecciones con y sin control de tráfico (semáforos), en total hubo 6 intersección con nivel de servicio D, 5 con C, 16 con B y 14 con A (ver el gráfico 5.1), concluyéndose que el sistema de regulación es aceptable durante la hora pico en que existe mayor movimiento de flujo vehicular. Las zonas críticas basado en las demoras son las intersecciones del Jr. 2 de Mayo con el Jr. Arequipa, Jr. San Martín y el Jr. F. Vivanco; el Jr. 3

Máscaras con sus intersecciones en la Av. Mariscal Cáceres, Jr. Bellido, Jr. Cusco y el Jr. Arequipa; y el Jr. Grau con F. Vivanco.

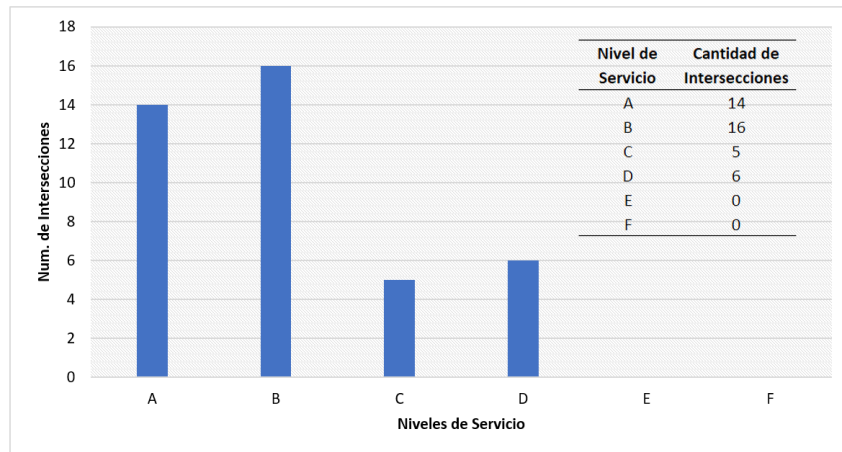


Figura 5.1: Resumen de la evaluación de intersecciones

Fuente: Elaboración propia.

- Del análisis de deficiencias se concluye que la regulación de semáforos, es una opción que puede tomar la gestión municipal para mejorar las deficiencias del sistema de regulación de tráfico vehicular, el cual puede ser mejorado a partir de técnicas que optimicen el paso del flujo. La reapertura de vías peatonales con la modificación de algunas vías (como se planteó), no mejoraría significativamente en reducir las demoras producidas en las intersecciones. La restricción de vehículos menores sería la mejor opción para reducir las demoras e incrementar las capacidades de los acceso de las intersecciones. También el ordenamiento vehicular a través de carriles diferenciados sería factible para la reducción de demoras y de las formaciones de longitudes de colas.
- Se concluyó que el crecimiento vehicular si ocasiona incrementos en las demoras de las intersecciones del Centro Histórico. Con el incremento de los flujos de ingreso a la red, producto de varias proyecciones al futuro de acuerdo a la tasa de crecimiento vehicular, se generó un incremento ininterrumpido de las demoras

promedio en las intersecciones (ver sección 4.1.3). Por otro lado el incremento de la densidad también perjudica el nivel de servicio de las intersecciones (ver sección 4.2.4), donde en los puntos más afectados se sufren un incremento en las demoras de forma casi exponencial, las calles más afectadas son el Jr. Bellido, el Jr. 3 Máscaras, el Jr. 2 de Mayo y el Jr. F. Vivanco. El incremento de la densidad vehicular también tiene un efecto sobre el flujo vehicular, provocando al principio que el flujo aumente, hasta llegar a una capacidad pico, a partir de la cual los flujos empezaron a decaer. Los niveles de servicio a diferentes densidades variaron como lo indica la gráfica 5.2.

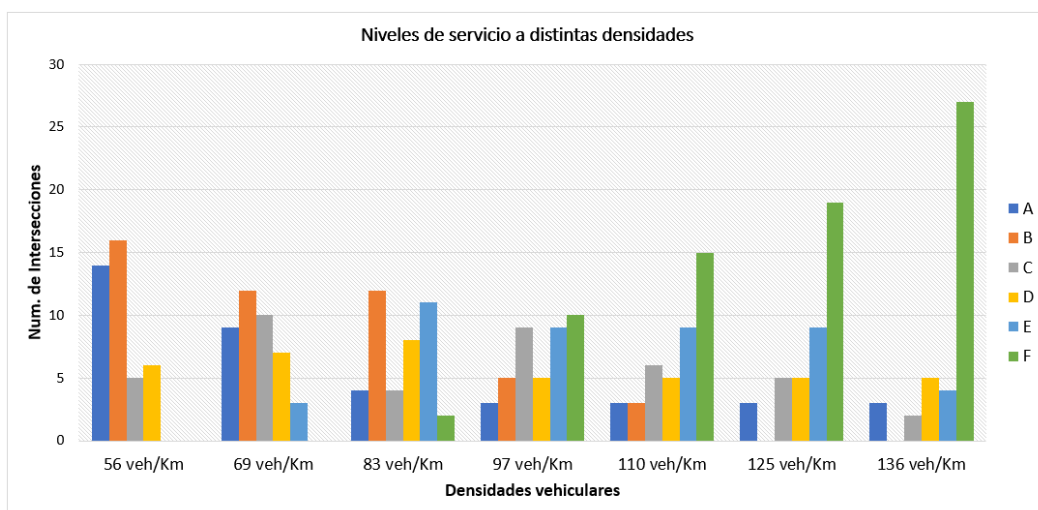


Figura 5.2: Efecto del incremento de densidad en los niveles de servicio de la red vial

Fuente: Elaboración propia.

- El modelamiento mesoscópico es una buena alternativa para evaluar y predecir el comportamiento vehicular, su manejo es moldeable y permite realizar diversos escenarios de análisis, como predecir los puntos de máxima congestión debido a las colas que producen el aglutinamiento de vehículos en los accesos de las intersecciones. Al realizar la comparación de las colas que se formaron durante la recolección de datos de campo con los generados por la simulación vehicular en la red, se obtuvo semejanzas aceptables para validar los valores del modelamiento.

5.3 Recomendaciones

- Un mejor nivel de detallado para la emulación y el modelamiento de tráfico requiere de la interacción del tránsito vehicular con el peatonal, que es significativo para evaluar el tráfico vehicular nocturno que es particularmente diferenciado al tráfico de la mañana y del mediodía.
- Con la investigación realizada, se verificó que no existe un sistema de tráfico vehicular regulado con semáforos sincronizados, que podría ayudar a mejorar los niveles de servicio de varias zonas dentro del Centro Histórico.
- El efecto del tráfico peatonal, generalmente está aplicado a solo la simulación microscópica, donde se ve su efecto sobre el movimiento vehicular, a nivel mesoscópico aún no se ha establecido el efecto que puede producir.
- En ámbito de esta tesis, se puede abrir también paso para otras investigaciones como las regulaciones de semáforos para mejorar los niveles de servicio, y propuestas de direcciones de las vías de la red, con cambios de rutas para los diferentes sistemas de transporte a fin de mejorar el tráfico vial.
- Se recomienda también otros estudios de investigación direccionados a el tiempo de servicio de carga y descarga de pasajeros que brindan los microbuses de transporte público, y su implemento en el modelo.

5.4 Trabajos futuros

- La primera opción a la continuación de este trabajo de investigación, que al haber demostrado de manera eficiente el comportamiento dentro de una red, es el mejoramiento del tráfico vehicular mediante ejercicios de optimización en el modelo.
- El modelamiento realizado puede ser adaptado con la relación velocidad-densidad,

para ajustar su comportamiento. Tanto las densidades como la velocidad se deben obtener de datos de campo de la misma zona.

- De igual forma se debe obtener la metodología para el cálculo de la oferta máxima de todas las calles dentro del sistema, a fin de reconocer las capacidades de las vías, de esta manera prever un mayor problema de congestión en el futuro.
- Por último, establecer nuevas rutas, y añadir la interacción del tráfico peatonal y definir puntos de paradas para los buses, que se puede resumir en aumentar el detallado de acuerdo al interés buscado.

Bibliografía

- Alcalá, M. A. (2016). Micro simulación del tráfico de la intersección de las avenidas bolivar, córdova y calle andalucía empleando el software vissim 6. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*.
- Alvarez, J. W. (2017). Micro-simulación intermodal en la ciudad del cusco empleando los software vissim 8 y viswalk 8. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*.
- Avilez, C. (2017). Microanálisis de los desplazamientos peatonales y vehiculares en las afueras del hospital del niño. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*.
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of traffic simulation*, volumen 145. Springer.
- Best, E. M. (1974). Huamanga: Una larga historia. *CONUP (Lima)*.
- Bú, R. C. (1996). *Simulación: un enfoque práctico*. Editorial Limusa.
- Bull, A. (2003). *Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo*. United Nations Publications.
- Bull, A. y Thomson, I. (2002). La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. *Revista de la CEPAL*, pp. 111–112.
- Cal, R., Reyes, M., y Cárdenas, J. (1994). *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones*. Alfaomega Grupo Editor,.
- Cárdenas, G. R. (1990). *La intendencia de Huamanga*. CONCYTEC.
- Cassani, M. (2014). Propuesta metodológica para determinar el costo social de la rehabilitación de vías urbanas en el transporte público urbano. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Cordero, M. S. M. (2012). Los vehículos motorizados privados y el problema de transporte público en los centros históricos: el caso de cuenca ecuador. *Estoa. Revista de la Facultad de arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 1(1).
- Cárdenas, D. H. (1998). Capacidad, niveles de servicio y congestión en vías urbanas. *Dip. XII Curso Internacional de Carreteras UPM*.
- Cristián, P. y Rey, J. (2016). Evaluación de los planes de operación de transantiago mediante simulación. *Universidad de Chile*.
- Daganzo, C. F. (1995). Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29(4):277–286.
- Dowling, R. (2007). Definition, interpretation, and calculation of traffic analysis tools measures of effectiveness. *Federal Highway Administration, Washington DC*.

- Ehlert, A., Schneck, A., y Chanchareon, N. (2017). Junction parameter calibration for mesoscopic simulation in vissim. *Transportation Research Procedia*, 21:216–226.
- Feldman, O. (2012). The geh measure and quality of the highway assignment models. *Association for European Transport and Contributors*, pp. 1–18.
- Fellendorf, M. y Vortisch, P. (2010). Microscopic traffic flow simulator vissim. En *Fundamentals of traffic simulation*, pp. 63–93. Springer.
- Fernández, R. (2011). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*. Universidad de Los Andes.
- FHWA (2004). Traffic analysis toolbox volume iii: guidelines for applying traffic microsimulation modeling software. Technical report.
- FHWA (2015). Highway history. *Extraído de <https://www.fhwa.dot.gov/highwayhistory/interstate.cfm>*.
- Gazis, D. C. (2002). The origins of traffic theory. *Operations Research*, 50(1):69–77.
- Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2):105–111.
- Gipps, P. G. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(5).
- González Carré, E., Gutiérrez, Y., y Ceruti, J. U. (1995). La ciudad de huamanga: espacio, historia y cultura. *Ayacucho, Concejo Provincial de Huamanga, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y Centro Peruano de Estudios Sociales*.
- Hammad, A. A. (1998). *Cellular automata models for traffic flow in urban networks*. Tesis doctoral, Dublin City University.
- HCM (2000). Highway capacity manual. *Transportation Research Board, Washington, DC*, 11.
- Huamani, B. G. (2018). *Determinación de zonas adecuadas de estacionamiento vehicular en el centro de la ciudad de Ayacucho*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- INEI (2018). *Perú perfil sociodemográfico, Informe Nacional*. Censos Nacionales 2017, Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Jiménez, M. (2011). Sistema adaptativo de control y optimización de tráfico de un corredor vial semaforizado, aplicación ciudad de medellin. *Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Ingeniería Civil, Medellín*.
- Lacerda, V. M. y Castro-Neto, M. (2014). Considerações sobre a calibração do modelo de car-following

- do vissim para vias arteriais urbanas. En *Anais do XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Curitiba*.
- Lazo, C. y Araujo, A. (2017). Micro-simulación de vehículos atípicos: el caso de las moto-taxis en villa maría del triunfo.
- Linauer, M. y Leihns, D. (2003). Generating floating car data by using gsm-network. En *Proceedings of the 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services (ITSS03)*.
- Llanos, J. M. (2018). Análisis del nivel de servicio de las intersecciones semaforizadas con mayor afluencia de la av. hoyos rubio. *Universidad Nacional de Cajamarca*.
- L.O.M. (2003). Ley n° 27972. *Lima, Perú, Ley Orgánica de Municipalidades: Publicado en el diario Oficial El Peruano*.
- Londoño, G. E. (2005). Métodos de asignación dinámica de tráfico. *Universidad Nacional Autónoma de Mexico*.
- Maerivoet, S. y De Moor, B. (2005). Traffic flow theory. *arXiv preprint physics/0507126*.
- Mahmud, K. y Town, G. E. (2016). A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks. *Applied Energy*, 172:337–359.
- MDT (2016). Vissim modeling guidance. *Maryland Department of Transportation, State Highway Administration, Travel Forecasting and Analysis Division*.
- MPDATT (2005). *Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte*. Bogotá (Colombia). Alcaldía Mayor. Secretaría de Tránsito y Transporte and Triana, William Fernando Camargo.
- MPH (2006). *Ordenanza Municipal que establece las zonas rígidas, zonas de parqueo vehicular y paraderos de transporte público en la ciudad de Ayacucho y distritos metropolitanos de la provincia de Huamanga*. Municipalidad Provincial de Huamanga, Ordenanza Municipal N OO2-2Q18-MPH/A.
- MPH (2008). *Reglamento para la gestión y administración del Centro Histórico de Ayacucho*. Municipalidad Provincial de Huamanga.
- MPH-AECID (2011). *Plan maestro de revitalización integral del centro histórico de Huamanga - Ayacucho - 2011-2021*. Municipalidad Provincial de Huamanga y la Agencia española de cooperación internacional para el desarrollo, Oficina Técnica del Centro Histórico.
- MTC (2006). *Clasificación Vehicular y Estandarización de Características Registrables Vehiculares*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Directiva 002-2006-MTC/15.

- Nagel, K. y Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, 2(12):2221–2229.
- Osores, V. O. (2016). Evaluación del nivel de servicio por análisis de tráfico en la intersección semaforizada mariscal castilla. *Universidad Nacional del Centro*.
- Paz, M. F. (1865). *Atlas geografico del Perú*. Libreria de Augusto Durand.
- Prigogine, I. (1961). A boltzmann-like approach to the statistical theory of traffic flow. *Theory of TRAFFIC FLOW, PROCEEDINGS*, pp. 158–164.
- PTV, A. (2013). Ptv vissim 6 user manual. *Karlsruhe, Germany*.
- Purizaga, M. (2005). *Las fundaciones españolas de Huamanga*. Edic. UNSCH,.
- RNE (2018). A.010, condiciones generales de diseño. *Reglamento Nacional de Edificaciones*.
- Robertson, H. D. (1994). *Manual of transportation engineering studies*. Prentice Hall.
- Ruiz, B. y Tacure, E. T. M. (2015). La congestión vehicular en la ciudad de piura.
- SEDESOL (1994). Manual de estudios de ingeniería de tránsito. *Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas*.
- SEDESOL (2000). *Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas: manual normativo*. Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas: manual normativo.
- Smith, J. y Blewitt, R. (2010). *Traffic Modelling Guidelines*. Transport for London.
- Smith, J. y Blewitt, R. (2016). *Traffic Modelling Guidelines, TfL Traffic Manager and Network Performance Best Practice*. Transport for London.
- Starfield, T. (2005). Discussion: Deterministic or stochastic. *The University of Vermont, Vermont*.
- Suarez, L. (2007). Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante microsimulación. *Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia*.
- Tamayo, G. (2000). Diseños muestrales en la investigación. *Semestre económico*.
- Torres, J. V. (2002). Simulación macroscópica del tráfico vehicular en el centro histórico de la ciudad de México, por medio de un sistema de información geográfica. *Universidad Nacional Autónoma de Mexico*.
- UKHA (2005). *Desing Manual for Roads and Bridges*. UK Highways Agency.
- UNESCO (1977). *Coloquio sobre la preservación de los Centros Históricos ante el crecimiento de*

- las ciudades contemporáneas*. Dirección Nacional de Patrimonio Artístico, Casa de la Cultura Ecuatoriana,.
- Valladares, A. D. J. (2016). Comparación de un enfoque macroscópico y otro microscópico al estimar las demoras por la congestión urbana. *Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*.
- VISSIM (2018). *Transportation Systems Simulation, A Tutorial for Multimodal Simulation Using VISSIM*. WIKIBOOKS.
- Vissim, P. (2011). Vissim 5.30-05 user manual. *Planung Transport Verkehr AG: Braunschweig, Germany*.
- Vortisch, P. (2014). History of vissim's development. *Traffic and Transportation Simulation*, p. 55.
- Wardrop, J. G. y Whitehead, J. (1952). Correspondence. some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1(5):767–768.
- WDT (2013). *Wisconsin DoT Microsimulation Guidelines*. Wisconsin Department of Transport.
- Whitham, G. (1955). On kinematic waves ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 229(1178):317–345.
- Whitham, G. (1974). Linear and nonlinear waves. *Google Scholar*.
- Wiedemann, R. (1974). Simulation des strassenverkehrsflusses.
- Wood, S. (2012). Traffic microsimulation—dispelling the myths. *Traffic Engineering and Control*, 53(9):339–344.
- Zapata, A., Rojas, R., y Chavez, P. (2008). *Historia y cultura de Ayacucho*. Lima, IEP-UNICEF,.

