



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**DEPARTAMENTO DE POSGRADOS**

**MAESTRIA EN TRÁNSITO, TRANSPORTE Y  
SEGURIDAD VIAL**

Estimación de la contaminación del aire generada por efecto de la circulación vehicular motorizada en la Av. 10 de Agosto de la ciudad de Cuenca - Ecuador, usando la herramienta de micro simulación de tránsito Aimsun 8.1.

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN  
TRANSITO, TRANSPORTE Y SEGURIDAD VIAL

**AUTOR:** Ing. Christian Marcelo Moyano Tobar

**DIRECTOR:** Dr. Roberto Gamón Torres

Cuenca – Ecuador  
2017

## **DEDICATORIA**

A mis hijos José Andrés y Juan Francisco,  
quienes me motivan cada día a afrontar  
la vida con positivismo, confianza y  
deseos de superación continua.

A Andrea, quien supo brindar su apoyo  
incondicional en todo momento.

## **AGRADECIMIENTO**

En especial al Dr. Roberto Gamón Torres,  
por el aporte metodológico e investigativo  
en la dirección del presente trabajo.

A todo el talento humano que contribuyó  
de manera directa o indirecta en las  
distintas etapas del proyecto.

A la Universidad del Azuay por el  
apoyo en estos años.

**RESUMEN**

En la ciudad de Cuenca se evidencia en los últimos años que la contaminación del aire alcanza niveles significativos y que está en estrecha relación con los efectos del congestionamiento vehicular.

La presente investigación desarrolla un modelo matemático para la estimación de emisiones de dióxido de carbono y óxidos nitrosos producto del congestionamiento vehicular motorizado, correlacionando flujos vehiculares y velocidades en las principales intersecciones de la avenida Diez de Agosto entre la avenida Loja y la avenida del Paraíso de la ciudad de Cuenca, para ello se utilizó la herramienta informática de microsimulación de tránsito Aimsun 8.1, adicionalmente se establece una secuencia de actividades que servirán de guía para el desarrollo de futuros estudios que complementen lo realizado, con el propósito de establecer en un mediano plazo un modelo de comportamiento generalizado para la ciudad, permitiendo la toma de decisiones de gestión de tránsito enfocadas a limitar los valores permisibles de emisiones de contaminantes del aire.

**PALABRAS CLAVE**

Simulación, tránsito, contaminación aire, congestionamiento vehicular, Aimsun 8.1.

**ESTIMATION OF AIR POLLUTION GENERATED BY MOTORIZED  
VEHICULAR TRAFFIC ON 10 DE AGOSTO AVENUE, CUENCA - ECUADOR,  
USING THE AIMSUN 8.1 MICRO-TRAFFIC SIMULATION TOOL.**

**ABSTRACT**

In recent years, it has been evidenced in the city of Cuenca that air pollution reaches significant levels and that this is closely related to the effects of vehicular congestion. This research developed a mathematical model for the estimation of carbon dioxide and nitrous oxides emissions, resulting from motorized vehicular congestion. This was performed by correlating vehicular flows and speeds at the main intersections of *10 de Agosto* Avenue, between *Loja* Avenue and *Del Paraiso* Avenue in the city of Cuenca. For this purpose, the computerized micro-simulation Aimsun 8.1 traffic modeling software tool was used. In addition, a sequence of activities that will serve as a guide to complement the development of future studies was determined with the purpose of establishing, in a medium term, a generalized behavioral model for the city. This will allow traffic management decision making focused on limiting the permissible emission values of air pollutants.

**KEYWORDS:** simulation, transit, air pollution, vehicular congestion, Aimsun 8.1.



Hugo Andrade  
Lic. Tomas



Translated by,  
Lic. Lourdes Crespo

## TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
ALCANCE.....	4
JUSTIFICACIÓN .....	5
METODOLOGIA .....	8
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	10
ESTADO DEL ARTE.....	10
CAPITULO 1 .....	15
MARCO TEORICO.....	15
1. Conceptos Generales.....	15
1.1. Teoría de flujo de tráfico vehicular .....	15
1.1.1 Flujo (q).....	16
1.1.2 Densidad o concentración (k).....	16
1.1.3 Velocidad (v).....	17
1.1.4 Ecuación fundamental del flujo vehicular.....	17
1.2. Tráfico promedio diario anual (TPDA).....	19
1.2.1. Metodología de cálculo del Trafico Promedio Diario Anual.....	19
1.3. Volúmenes de Tránsito Horarios.....	22
1.3.1. Volumen horario máximo anual (VHMA).....	22
1.3.2. Volumen horario de máxima demanda (VHMD) .....	22
1.3.3. Factor hora de máxima demanda (FHMD) .....	23
1.4. Capacidad Vial .....	23
1.5. Grado de Saturación .....	24
1.6. Congestión Vehicular .....	24
1.7. Teoría de colas.....	25
1.8. Niveles de servicio .....	25
1.8.1. Demoras .....	27
1.8.2. Nivel de Servicio para intersecciones SemafORIZADAS.....	27
1.8.3. Nivel de Servicio para intersecciones No SemafORIZADAS.....	27
1.8.4. Nivel de Servicio para Redondeles .....	28
1.9. Parámetros Especiales de Ingeniería de Transito .....	28
1.9.1. Velocidad de recorrido.....	29
1.9.2. Velocidad de marcha.....	29
1.9.3. Velocidad de punto o instantánea .....	29
1.9.4. Velocidad media temporal (Vt).....	29

1.9.5.	Velocidad media espacial (Ve) .....	30
1.9.6.	Determinación de la Hora de Máxima Demanda.....	30
1.9.7.	Estadística de validación GEH.....	31
1.10.	Metodología para determinación de Velocidades y demoras .....	31
1.10.1.	Método del Vehículo Flotante.....	31
1.10.2.	Recorridos y Tamaño de la Muestra .....	33
1.10.3.	Equipos de medición para levantamiento de información primaria.....	34
1.11.	Emisiones de contaminación del aire por efecto de tráfico vehicular .....	35
1.11.1.	Monóxido de carbono (CO) .....	36
1.11.2.	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	36
1.11.3.	Hidrocarburos (HC) .....	36
1.11.4.	Óxido de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) .....	36
1.11.5.	Material Particulado en suspensión (MP) .....	36
1.11.6.	Modelos de Estimación de Emisiones de Contaminantes.....	37
1.11.6.1.	Modelo de Emisiones Instantáneas por influencia de velocidad..	37
1.12.	Software de microsimulación Aimsun 8.1 expert.....	44
CAPITULO 2 .....		46
CONDICIONES OPERACIONALES Y ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL AIRE CASO DE ESTUDIO N° 1 AV. 10 DE AGOSTO DE LA CIUDAD DE CUENCA.....		46
2.1	Calidad del aire en Cuenca relacionada a la movilidad .....	46
2.2.	Antecedentes del área de estudio.....	48
2.2.1.	Definición del area de estudio.....	48
2.3.	Levantamiento de información primaria .....	49
2.3.1.	Aforos direccionales clasificados de tráfico observado.....	49
2.3.2.	Velocidades de marcha, recorrido y demoras .....	50
2.3.3.	Velocidades instantáneas .....	58
2.3.4.	Aforos vehiculares direccionales en intersecciones.....	63
2.3.4.1.	Intersección 1: Av. 10 de Agosto y Av. Loja .....	63
2.3.4.2.	Intersección 2: Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha.....	65
2.3.4.3.	Intersección 3: Av. 10 de Agosto y Av. Ricardo Muñoz Dávila..	67
2.3.4.4.	Intersección 4: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero .....	68
2.3.4.5.	Intersección 5: Av. 10 de Agosto y Av. Fray Vicente Solano.....	70
2.3.4.6.	Intersección 6: Av. 10 de Agosto y Av. Roberto Crespo Toral....	71
2.3.4.7.	Intersección 7: Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso.....	73
2.3.4.8.	Intersección 8: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero .....	74
2.3.4.9.	Intersección 9: Av. 10 de Agosto y Calle de las Herrerías.....	76
2.3.4.10.	Intersección 10: Av. 10 de Agosto y Av. del Paraíso .....	77

2.4.	Levantamiento de información secundaria.....	79
2.4.1.	Planimetría y topografía de la Av. 10 de Agosto.....	79
2.4.2.	Características del Parque Automotor de Cuenca.....	79
2.5.	Construcción y calibración del modelo de microsimulación en Aimsun ....	82
2.5.1.	Creación de la red.....	82
2.5.2.	Calibración del modelo de microsimulación.....	83
2.5.3.	Características mecánicas de los vehículos tipo a Aimsun 8.1 .....	87
2.6.	Parámetros operacionales de las intersecciones en estudio.....	89
2.6.1.	Intersección 1: Av. 10 de Agosto y Av. Loja.....	89
2.6.2.	Intersección 2: Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha .....	91
2.6.3.	Intersección 3: Av. 10 de Agosto y Av. Ricardo Muñoz Dávila .....	92
2.6.4.	Intersección 4: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero.....	94
2.6.5.	Intersección 5: Av. 10 de Agosto y Av. Fray Vicente Solano .....	95
2.6.6.	Intersección 6: Av. 10 de Agosto y Av. Roberto Crespo Toral .....	97
2.6.7.	Intersección 7: Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso.....	98
2.6.8.	Intersección 8: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero.....	100
2.6.9.	Intersección 9: Av. 10 de Agosto y Calle de las Herrerías .....	101
2.6.10.	Intersección 10: Av. 10 de Agosto y Av. del Paraíso .....	103
2.6.11.	Resultados de modelación de la Red Vial completa.....	104
2.7.	Emisiones de contaminantes del aire en las intersecciones en estudio .....	106
2.8.	Validación de los resultados de Emisiones con IVE.....	109
2.8.1.	Ingreso de información en el IVE.....	109
2.8.2.	Análisis comparativo de emisiones entre Aimsun e IVE.....	112
CAPITULO 3.....		118
DETERMINACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y METODOLOGÍA PROPUESTA PARA ESTUDIOS DE IMPACTO SOBRE LA RED VIAL.....		118
3.1.	Modelo Matemático de estimación de emisiones a partir de Aimsun.....	118
3.1.1.	Información base.....	119
3.1.2.	Análisis de la información .....	120
3.1.3.	Ecuaciones matemáticas para estimación de emisiones.....	123
3.1.4.	Estimación de contaminantes totales en una intersección.....	124
3.2.	Metodología propuesta para EIRV que incluyan estimación de emisiones de contaminantes.....	125
3.2.1.	Levantamiento de información .....	127
3.2.2.	Procesamiento de información.....	128
3.2.3.	Microsimulaciones .....	129
3.2.3.1.	Información de entrada.....	129

---

3.2.3.2. Validación y calibración:.....	130
3.2.3.3. Resultados Operacionales:.....	131
3.2.3.4. Estimación de emisiones instantáneas "IEM" .....	131
CONCLUSIONES .....	131
RECOMENDACIONES .....	134
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	135
GLOSARIO DE TERMINOS.....	138

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Niveles de Servicio Intersecciones Semaforizadas .....	27
Tabla 1-2 Niveles de Servicio Intersecciones No semaforizadas .....	28
Tabla 1-3 Niveles de Servicio Redondeles .....	28
Tabla 1-4 Factores de Vehículos Livianos Equivalentes.....	30
Tabla 1-5 Tamaño mínimo de muestra con nivel de confianza del 95% .....	34
Tabla 2-1 Intersecciones del área de estudio .....	48
Tabla 2-2 Determinación del número de recorridos .....	50
Tabla 2-3 Velocidades de marcha y recorrido .....	52
Tabla 2-4 Variación horaria de los aforos automáticos clasificados .....	59
Tabla 2-5 Variación aforos automáticos clasificados en HMD .....	61
Tabla 2-6 Variación horaria intervalo de frecuencias de velocidades instantáneas... 61	61
Tabla 2-7 Intervalo de frecuencias de velocidades instantáneas en HDM .....	62
Tabla 2-8 Hora Máximo Movimiento de la intersección 1 .....	64
Tabla 2-9 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 1 .....	64
Tabla 2-10 Hora Máximo Movimiento de la intersección 2.....	66
Tabla 2-11 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 2 .....	66
Tabla 2-12 Hora Máximo Movimiento de la intersección 3.....	67
Tabla 2-13 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 3 .....	68
Tabla 2-14 Hora Máximo Movimiento de la intersección 4.....	69
Tabla 2-15 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 4 .....	69
Tabla 2-16 Hora Máximo Movimiento de la intersección 5.....	70
Tabla 2-17 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 5 .....	71
Tabla 2-18 Hora Máximo Movimiento de la intersección 6.....	72
Tabla 2-19 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 6 .....	72
Tabla 2-20 Hora Máximo Movimiento de la intersección 7.....	73
Tabla 2-21 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 7 .....	74
Tabla 2-22 Hora Máximo Movimiento de la intersección 8.....	75
Tabla 2-23 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 8 .....	75
Tabla 2-24 Hora Máximo Movimiento de la intersección 9.....	76
Tabla 2-25 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 9 .....	77
Tabla 2-26 Hora Máximo Movimiento de la intersección 10.....	78
Tabla 2-27 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 10 .....	78

---

Tabla 2-28 Composición del parque automotor de Cuenca de Vehículos a Gasolina	80
Tabla 2-29 Composición del parque automotor de Cuenca de Vehículos a Diésel...	81
Tabla 2-30 Estadística GEH entre flujos reales y simuladas .....	85
Tabla 2-31 Estadística GEH entre velocidades reales y simuladas.....	86
Tabla 2-32 Porcentaje de Combustible en los grupos de vehículos.....	87
Tabla 2-33 Resultados de modelación de la Red Vial completa.....	104
Tabla 2-34 Resultados de por acceso de cada intersección.....	107
Tabla 3-1 Estadísticas de Regresión para estimación de CO <sub>2</sub> .....	123
Tabla 3-2 Estadísticas de Regresión para estimación de NO <sub>x</sub> .....	124

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Relación entre flujo y densidad.....	18
Figura 1-2 Relación entre velocidad y densidad.....	18
Figura 1-3 Relación entre velocidad y flujo.....	19
Figura 1-4 Formulario para levantamiento de tráfico observado.....	22
Figura 1-5 Formato de estudio de velocidades y demoras.....	32
Figura 1-6 Cámara modelo Virb Elite de Garmin.....	34
Figura 1-7 Contador automático Modelo Picocount 4500.....	35
Figura 1-8 Emisión CO <sub>2</sub> correlacionada con velocidad y aceleración.....	42
Figura 1-9 Variaciones de emisiones usando ISA .....	43
Figura 1-10 Niveles de Simulación de Aimsun .....	44
Figura 2-1 Fuentes de contaminación en la ciudad de Cuenca .....	47
Figura 2-2 Emisiones de CO <sub>2</sub> en comparación con ciudades ICES y otras regiones	47
Figura 2-3 Porcentaje de contaminación por tráfico vehicular .....	48
Figura 2-4 Intersecciones de área de estudio .....	49
Figura 2-5 Velocidades de marcha y de recorrido por este - oeste .....	51
Figura 2-6 Velocidades de marcha y de recorrido por oeste – este .....	51
Figura 2-7 Ubicación de la estación de aforo automático.....	58
Figura 2-8 Ubicación de la estación de aforo automático.....	59
Figura 2-9 Variación horaria de flujos vehiculares clasificados.....	60
Figura 2-10 Variación horaria de intervalo de frecuencias velocidades instantáneas	62
Figura 2-11 Esquema de flujos en intersección 1 .....	63
Figura 2-12 Esquema de flujos en intersección 2 .....	65
Figura 2-13 Esquema de flujos en intersección 3 .....	67
Figura 2-14 Esquema de flujos en intersección 4 .....	68
Figura 2-15 Esquema de flujos en intersección 5 .....	70
Figura 2-16 Esquema de flujos en intersección 6 .....	71
Figura 2-17 Esquema de flujos en intersección 7 .....	73
Figura 2-18 Esquema de flujos en intersección 8 .....	74
Figura 2-19 Esquema de flujos en intersección 9 .....	76
Figura 2-20 Esquema de flujos en intersección 10 .....	77
Figura 2-21 Topografía del Viario principal de parroquia Sucre – Huayna Cápac ...	79
Figura 2-22 Creación de Red vial en Aimsun.....	83

Figura 2-23 Validación datos reales vs datos simulados para flujo y velocidad .....	84
Figura 2-24 Regresión lineal para calibración de flujos y velocidades .....	84
Figura 2-25 Ingreso de características mecánicas del vehículo tipo liviano (car) ...	88
Figura 2-26 Ingreso de tipo de combustible de cada grupo de vehículos .....	88
Figura 2-27 Parámetros operacionales Intersección 1 .....	90
Figura 2-28 Parámetros operacionales Intersección 2 .....	92
Figura 2-29 Parámetros operacionales Intersección 3 .....	93
Figura 2-30 Parámetros operacionales Intersección 4 .....	95
Figura 2-31 Parámetros operacionales Intersección 5 .....	96
Figura 2-32 Parámetros operacionales Intersección 6 .....	98
Figura 2-33 Parámetros operacionales Intersección 7 .....	99
Figura 2-34 Parámetros operacionales Intersección 8 .....	101
Figura 2-35 Parámetros operacionales Intersección 9 .....	102
Figura 2-36 Parámetros operacionales Intersección 10 .....	104
Figura 2-37 Base de datos para IVE .....	109
Figura 2-38 Información ingresada para vehículos livianos .....	110
Figura 2-39 Información ingresada para vehículos pesados .....	110
Figura 2-40 Información ingresada para Buses .....	111
Figura 2-41 Resultados obtenidos de NO <sub>x</sub> y CO <sub>2</sub> .....	111
Figura 2-42 Comparación de CO <sub>2</sub> promedio de la red entre Aimsun e IVE.....	112
Figura 2-43 Comparación de CO <sub>2</sub> Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha.....	112
Figura 2-44 Comparación de NO <sub>x</sub> promedio de la red entre Aimsun e IVE .....	113
Figura 2-45 Comparación de NO <sub>x</sub> Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha.....	113
Figura 2-46 Comparación de NO <sub>x</sub> Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso.....	114
Figura 2-47 Comparación de CO <sub>2</sub> Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso.....	114
Figura 2-48 Representación Horas de Máxima Demanda en toda la Red .....	115
Figura 2-49 Representación Horas de Máxima Demanda en toda la Red .....	115
Figura 2-50 Representación Velocidades en toda la Red.....	116
Figura 2-51 Representación Colas en toda la Red .....	116
Figura 2-52 Representación Emisiones CO <sub>2</sub> en toda la Red.....	117

---

Figura 2-53 Representación Emisiones NO <sub>x</sub> en toda la Red.....	117
Figura 3-1 Relación espacial entre variables CO <sub>2</sub> .....	119
Figura 3-2 Relación espacial entre variables NO <sub>x</sub> .....	120
Figura 3-3 Relación entre Flujo y CO <sub>2</sub> .....	121
Figura 3-4 Relación entre Velocidad y CO <sub>2</sub> .....	121
Figura 3-5 Relación entre Flujo y NO <sub>x</sub> .....	122
Figura 3-6 Relación entre Velocidad y NO <sub>x</sub> .....	122
Figura 3-7 Metodología propuesta para EIRV con cálculo de Emisiones de contaminantes del aire.....	126

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la mayoría de ciudades de población media del mundo, ha traído como consecuencia a sus habitantes la necesidad de movilizarse largas distancias, priorizando el uso de modos de transporte motorizados; influyendo así en el incremento de la contaminación ambiental y fundamentalmente la del aire. Es por ello que dentro de los criterios de planificación de la movilidad se ha iniciado un proceso de concientización sobre la importancia de estudiar el impacto que tiene sobre la red vial (EIRV) y el espacio público, el emplazamiento de equipamientos públicos y privados que generan y atraen viajes en gran escala; lastimosamente la normativa vigente solo considera los análisis tradicionales de velocidad, capacidad vial y nivel de servicio, sin tener en cuenta un tema de gran importancia como es la repercusión que tiene el congestionamiento vehicular sobre la calidad del aire.

Muchas acciones han sido ejecutadas en las últimas décadas, los primeros pasos para lograr una movilidad sustentable se dieron en 1999 con el proyecto denominado “Desarrollo de un Plan para Sistema de Tráfico Sustentable para una ciudad piloto, Cuenca - Ecuador PADECO” financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo – BID; realizándose estudios adicionales y complementarios en los años 2006, 2010, 2011 y 2012. Pero no es hasta el año 2014 que se tomó la decisión de desarrollar el primer Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca con proyección al año 2025, donde una conceptualización vanguardista equilibra los conceptos urbanos con los de movilidad sustentable para establecer un modelo de ciudad pensada y planificada para favorecer las actividades cotidianas del ser humano; esta concepción seguramente traerá repercusiones favorables para el mejoramiento de la calidad de vida de los cuencanos, equilibrando el reparto del espacio público, favoreciendo a los modos de transporte más vulnerables como los peatones y ciclistas, estableciendo una nueva jerarquía vial en la red vehicular y peatonal, fomentando el uso de sistemas de transporte público masivo de buses y el tranvía, no obstante, es necesario enfatizar que las acciones de implementación del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca no son inmediatas y que los resultados se los podrá evidenciar en un mediano plazo; hasta que ello suceda hay que dar solución a los graves problemas de congestionamiento y contaminación vehicular que se tiene en el área urbana. (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca, 2015).

En virtud de la relevancia de contar con modelos matemáticos adaptados a la realidad local que permitan estimar el impacto que tiene el congestionamiento vehicular en la contaminación del aire por efecto de la circulación vehicular, se fundamenta la necesidad de realizar el presente trabajo de investigación, con el propósito de que sus resultados sirvan de guía e incentiven estudios complementarios que permitan en el mediano plazo establecer un comportamiento generalizado de la contaminación en la urbe, y así poder incluir este tipo de análisis en el alcance de los EIRV que exige el GAD de Cuenca, emulando la actuación de varias ciudades pioneras en el mundo que han tomado muy en serio el monitoreo en tiempo real de la calidad de aire debido al congestionamiento vehicular; proponiendo medidas de gestión de tránsito enfocadas a limitar los valores permisibles de contaminación entre las que se destaca Leicester City, ciudad que posee la peor calidad de aire en el Reino Unido y se ubica en la novena posición de la Unión Europea, pero que con la implementación de este tipo de políticas espera convertirse en una ciudad con los mejores indicadores ambientales del mundo. (Christopher Kettell, TRL; Mark Brackstone, Jordi Casas and Josep Maria Aymami, TSS-Transport Simulation Systems; Roland Leigh and Ed Lamb, University of Leicester, 2015).

Para cumplir con este propósito se ha tomado como caso de estudio N°1, la evaluación del comportamiento operativo de un eje vial colector representativo de la ciudad como es la avenida Diez de Agosto entre la avenida Loja y la avenida del Paraíso, en la cual se han analizado las diez intersecciones más importantes que la conforman; mismas que incluyen intersecciones semaforizadas y redondeles en las cuales se levantó información de campo relacionada a volúmenes de circulación y su composición vehicular, características geométricas y topográficas, velocidades de marcha, recorrido e instantáneas, planes semaforicos, características mecánicas de los vehículos que mejor representan al parque automotor de la ciudad según su tipo; insumos necesarios para las microsimulaciones de tráfico usando la herramienta informática Aimsun 8.1 versión expert, sus resultados sirven para determinar las características operacionales del corredor en estudio, entre las que se destacan la capacidad vial, los niveles de servicio, las longitudes de cola, densidad, flujos y velocidades simuladas. Por otro lado gracias a la incorporación en la plataforma informática del módulo ambiental de emisión instantánea de contaminantes desarrollado con fundamento en el estudio “*Modelling instantaneous traffic emission*

*and the influence of traffic speed limits*” (Luc Int Panis, Steven Broekx, Ronghui Liu, 2006), se estimaron las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en los accesos de las intersecciones, realizándose una especial atención al efecto que producen las continuas aceleraciones y desaceleraciones de los vehículos cuando presentan en condiciones de altas densidades de circulación.

Las emisiones obtenidas fueron correlacionadas matemáticamente con flujos y velocidades para obtener un modelo matemático básico que representa de la mejor manera el fenómeno estudiado, proponiendo una metodología que permita a profesionales o instituciones poder estimar las emisiones de este tipo de contaminantes en vías e intersecciones de características similares a la de estudio sin la necesidad de disponer de un microsimulador de tránsito avanzado, puedan realizar la estimación, iniciando así una base de datos que faculte en el mediano plazo disponer de un modelo generalizado de comportamiento para toda la ciudad.

Para garantizar la validez de los resultados, las emisiones determinadas en este estudio han sido comparadas con las obtenidas mediante la aplicación de un modelo computacional para estimar las emisiones de vehículos a motor denominado “IVE” (*International Vehicle Emissions*) – Bogotá DF, los resultados producto de este análisis fueron satisfactorios.

## **OBJETIVO GENERAL**

Establecer un modelo matemático de comportamiento para estimar la contaminación del aire (CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) por efecto de la circulación vehicular motorizada en un caso de estudio N°1 Av. 10 de Agosto de la ciudad de Cuenca - Ecuador, mediante microsimulaciones de tránsito aplicando el software informático Aimsun 8.1, sus resultados permitirán proponer a mediano plazo una ampliación al alcance de los estudios de impacto sobre la red vial establecidos en la ciudad de Cuenca.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Levantar y recopilar los parámetros operacionales de la zona de estudio entre los que se destacan datos de flujos vehiculares, velocidades de marcha, recorrido e instantáneas, composición del tráfico vehicular, información

mecánicas de los vehículos tipo representativos del parque automotor de Cuenca.

- Realizar microsimulaciones de tráfico vehicular en el área de estudio, donde se establezcan los parámetros fundamentales que describen el comportamiento del tráfico (flujo, velocidad, demoras, niveles de servicio, capacidad vial) que sirvan como datos de entrada para estimar los valores de contaminación del aire (CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) en la hora de máxima demanda, usando la herramienta informática Aimsun versión 8.1 *expert*.
- Determinar una ecuación matemática correlacionando los parámetros más importantes de ingeniería de tránsito (flujo y velocidad) con las estimaciones de emisiones de contaminantes de aire (CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), con el propósito de proponer su aplicación en los estudios de impacto sobre la red vial que se realizan en la ciudad.
- Iniciar una base de datos que permita en el mediano plazo establecer un modelo matemático de comportamiento generalizado que describa la relación entre congestionamiento vehicular y contaminación del aire, para el desarrollo de estrategias de gestión de tránsito en tiempo real que minimicen la contaminación del aire en la ciudad.

## **ALCANCE**

El alcance de la presente investigación se establece en virtud de los objetivos planteados, detallándose a continuación:

En primer lugar se presenta una introducción al proyecto de investigación, estableciéndose claramente la necesidad y pertinencia del mismo, se plantea directamente el problema a solucionar, se proponen una serie de objetivos y una metodología para cumplirlos; finalmente se efectúa un análisis del estado del arte y se expone una síntesis de investigaciones y trabajos llevados a cabo en ciudades de países latinoamericanos y europeos.

En el capítulo uno, se detallan los conceptos de ingeniería de tránsito más relevantes que se aplican en el presente estudio, tomando como fuente de consulta la bibliografía y normas técnicas más reconocidas a nivel internacional; complementándose con conceptos y directrices de normas nacionales y publicaciones locales con el fin de contextualizarlo a la realidad local. Por otro lado se realiza una descripción de las características y especificaciones técnicas de los instrumentos de medición con los cuales se procedió a levantar la información primaria, se hace una descripción general de las ventajas del uso y las principales aplicaciones de la herramienta informática de microsimulación usada y se finaliza con un análisis del fundamento teórico del modelo de emisiones instantáneas de contaminantes aplicado.

En el capítulo dos, se detalla la línea base del proyecto y se muestran los resultados obtenidos luego del procesamiento de la información primaria y secundaria, se establece con claridad las características operativas del viario en estudio producto de las microsimulaciones realizadas, se realiza las estimaciones de las emisiones de los contaminantes y se validan los resultados con un software alterno.

En el capítulo tres; se determinan los modelos matemáticos que sirven para la estimación de las emisiones de los contaminantes del aire estudiados y se finaliza el estudio proponiendo una metodología de actividades para la complementación con futuros estudios, que sirvan para la generación de un modelo generalizado en la ciudad de Cuenca.

Finalmente en la última sección se realizan conclusiones sobre el desarrollo del trabajo, se analiza el cumplimiento de los objetivos propuestos se dan respuesta a las preguntas de investigación y se plantean recomendaciones para futuros estudios que complementen esta investigación.

## **JUSTIFICACIÓN**

En la ciudad de Cuenca existe una Red de Monitoreo de la Calidad del Aire que cuenta con 20 puntos de control localizados en diferentes zonas de la ciudad, estos puntos de control básicamente analizan muestras de concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), material

particulado (MP), benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos y otros gases de efecto invernadero.

De acuerdo a la información publicada en el último inventario de emisiones de la ciudad de Cuenca realizada en el año 2014, se establece que el 91.9% de las emisiones de monóxido de carbono (CO), el 76.4% de Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el 34.4% de Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVNM), 30.2% de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), 42.7% de Material particulado fino (MP<sub>2.5</sub>) y 39.9% de material particulado fino (MP<sub>10</sub>), son consecuencia del tráfico vehicular motorizado (Empresa de Movilidad de Cuenca - EMOV -EP, 2015), por otro lado es relevante el destacar que las emisiones per cápita de gases efecto invernadero “GEI” en Cuenca presentan valores de 2,42 t de CO<sub>2</sub>/hab/año, donde el sector de la movilidad vehicular es el principal contribuyente con el aporte del 57% (Banco Interamericano de Desarrollo - BID, 2014).

El acelerado crecimiento del parque automotor de la ciudad ha dado como resultado que según datos de la Revisión Técnica Vehicular (RTV) del año 2014 exista un parque automotor de 147 484 vehículos, correspondiendo el 89.2% a los vehículos a gasolina y el 10.8% a los vehículos a diésel (Empresa de Movilidad de Cuenca - EMOV -EP, 2014), por lo que gran parte del viario del centro histórico y de múltiples arterias de la urbe presentan altos niveles de saturación; sobre todo en las horas de máxima demanda se evidencian grandes congestiones en las intersecciones más relevantes de la ciudad, tal es así que el 46% del viario básico del área urbana de la ciudad posee una capacidad inferior a los 2.000 veh/h, el 30% tiene una capacidad entre 2000 – 6000 veh/h y el 24 % del viario supera los 6.000 veh./h, dando como resultado que más del 14% del viario supere el 60% de grado de saturación; destacándose que las vías del centro histórico presenten un grado de saturación semejante al 100% y ejes viales fundamentales para la movilidad de la ciudad como son las avenidas 12 de abril, Ordoñez Lasso, Unidad Nacional, Primero de Mayo, 10 de Agosto, 24 de Mayo, evidencian grados de saturación cercanos al 40% (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca, 2015).

Estudios realizados por organismos internacionales concluyen que el congestionamiento vehicular trae como consecuencia densidades vehiculares altas en el viario y por supuesto bajas velocidades de circulación, indicando que el consumo

de combustibles aumenta drásticamente cuando la velocidad se reduce; para tener una idea más clara, un automóvil que circula a 10 km/hora emite casi 40 gr/ km de CO, 1.5 gr/km de NO<sub>x</sub>, y 4 gr/km de Hidrocarburos versus 20 gr / km de CO, 2 gr/km de NO<sub>x</sub> y 2 gr/km de hidrocarburos cuando circula a 30 Km/hora, para el caso de un autobús que circula a 10 km/hora emite casi 23 gramos / km de CO, 22 gr/km de NO<sub>x</sub> y 8 gr/km de hidrocarburos versus los 15 gr/km de CO, 18 gr/km de NO<sub>x</sub> y 5 gr/km de hidrocarburos que emite cuando circula a 30 Km/hora, por lo tanto se evidencia claramente la influencia del nivel de congestión en la contaminación del aire (Banco de Desarrollo de America Latina - CAF, 2010).

Adicionalmente investigaciones confirman que tanto el consumo de combustible como los contaminantes generados dependen de manera directa del conductor del vehículo, si se trata de un conductor con técnica de conducción agresiva, al acelerar más rápidamente se generan un mayor número de contaminantes en comparación a otros conductores con técnica de manejo a la defensiva, a tal punto que si las comparamos el consumo de combustible aumenta de 12 al 40%, las emisiones de CO aumentan en un factor de 1 a 8, para los VOC y NO<sub>x</sub> el aumento en las emisiones debido a la conducción agresiva varia de 15 al 400% y de 20 a 150%, respectivamente. (Luc Int Panis, Steven Broekx, Ronghui Liu, 2006).

A partir del año 2014 el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca solicita como requisito previo a la aprobación de planos, permisos de construcción y funcionamiento, se disponga por parte del proyectista de un Estudio de Impacto sobre la Red Vial "EIRV" para equipamientos públicos y privados que se conviertan en polos atractores y generadores de viaje masivos. Éstos estudios evalúan que la atracción de viajes no afecte de manera considerable la capacidad del viario existente y no se produzcan congestiones y demoras excesivas y de ser así, se propongan medidas de mitigación; lastimosamente a la fecha el alcance de estos estudios no contemplan un análisis del grado de contaminación del aire por efecto de la circulación de modos motorizados dando como resultado que cada vez se incremente la contaminación ambiental sin ser analizada y peor mitigada.

Por lo anteriormente expuesto y con el propósito de contribuir al mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad, se cree absolutamente pertinente el realizar el presente tema de investigación y así complementar el alcance de los EIRV permitiendo estimar

las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>; por efecto de la circulación vehicular mediante un modelo matemático que sirva para vías de características geométricas y operativas similares a la vía de estudio, marcando el inicio de una base de datos que en un mediano plazo permita establecer un comportamiento generalizado que facilite la toma de decisiones de gestión de tránsito oportunas para Cuenca y sus habitantes.

## **METODOLOGIA**

Debido a las características del presente estudio y con el afán de garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados y con la seguridad de que los resultados obtenidos sirvan de guía para futuros análisis y estudios complementarios, la metodología aplicada se fundamentó en un caso de estudio de tipo cuantitativo – correlacional, determinándose como área de análisis directa el viario de la avenida Diez de Agosto entre la avenida Loja y la avenida del Paraíso, dentro de la cual se evaluó las diez intersecciones más relevantes desde el punto de vista de jerarquía vial.

La metodología propuesta se dividió en tres grandes etapas, mismas que se detallan a continuación:

Levantamiento de información: se efectuaron mediciones controladas para el relevamiento de información primaria referente a las velocidades de marcha y recorrido de los vehículos motorizados que circulan por la zona de estudio; para lo cual se utilizó el método del vehículo flotante apoyado como instrumento de medición una cámara de video con gps, acelerómetro y altímetro incorporado “*modelo Virb Elite del fabricante Garmin*”, de manera simultánea se elaboró un análisis de velocidades instantáneas y conteo automático de tráfico de 24 horas consecutivas el día viernes 02 de junio de 2017, esto con el propósito de determinar los intervalos de frecuencias de velocidades de los distintos tipos de vehículos; el instrumento de medición fue un contador automático de tipo neumático modelo *PicoCount 4500*, dicha información fue fundamental como dato de entrada, validación y calibración del modelo de microsimulación de tráfico. En relación a la información secundaria, se recopiló datos de volúmenes de tráfico clasificado en las intersecciones en estudio; lo cual se determinó con el apoyo logístico de aproximadamente 150 estudiantes de los sextos y octavos ciclos de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay en el mes

de mayo del año 2016, en función de la información proporcionada por la Empresa de Movilidad EMOV – EP y en complemento con los anuarios de ventas de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador se estableció las características de vehículos representativos del parque automotor de la ciudad por tipo, para finalizar por intermedio de la Dirección Municipal de Transito del GAD de Cuenca se obtuvo la planimetría y taquimetría del viario en estudio y su área de influencia.

Procesamiento y análisis de información: con la información obtenida en la etapa anterior, se procedió a procesarla de acuerdo a las normas y parámetros establecidos desde el punto de vista de ingeniería de tránsito y se establecieron los valores de los volúmenes de máxima demanda que junto con la información secundaria recabada, sirvieron de datos de entrada para los modelos de microsimulación de tránsito aplicando la herramienta informática Aimsun 8.1 versión *expert* que posee la Universidad del Azuay a través de la Facultad de Ciencia y Tecnología, dichas microsimulaciones fueron calibradas y validadas de acuerdo a lo que recomienda el fabricante, aceptándose que la bondad de ajuste entre los flujos y velocidades medidos en campo versus los simuladas tengan un coeficiente de correlación  $R^2$  superior a 0.90 y un estadístico GEH inferior a 10% (SIT, 2013); esto para un escenario dinámico con 5 replicaciones de tipo estocástico, con ello se determinó con un grado de precisión absoluta las características operacionales de capacidad y niveles de servicio del viario en estudio, luego con ayuda del modelo de emisiones de contaminantes del aire (Panis et al, 2006) se estimaron los valores de concentración de ( $CO_2$  y  $NO_x$ ) en los accesos a las intersecciones que conforman la red vial estudiada, dicha información fue validada con la aplicación del software IVE (*International Vehicle Emissions*), aplicando los indicadores de contaminación de la Ciudad de Bogotá DF.

Determinación de modelo matemático y metodología: luego de obtener las estimaciones de los contaminantes, se inició un proceso matemático-estadístico de correlación, estableciendo como variables independientes al flujo vehicular y velocidad de circulación y como variable dependiente a las concentraciones de  $CO_2$  y  $NO_x$  por separado, luego de varios procesos de análisis y aplicando técnicas estadísticas de regresión lineal multivariable y con ayuda de herramientas matemáticas como el *Matlab* y el *Excel*, se determinó dos ecuaciones generales que describieron la

interrelación de las variables con una bondad de ajuste muy buena, en los dos casos el  $R^2$  fue superior a 0.90, adicionalmente se establece una metodología que considera una serie de actividades dentro de las etapas de levantamiento, procesamiento, y microsimulaciones para que sean consideradas para futuros estudios, adaptada a lo requerido en los Estudios de Impacto sobre la Red Vial requeridos en Cuenca.

Finalmente se estableció una serie de recomendaciones producto del proceso de levantamiento y procesamiento de información, para que sean consideradas en futuros estudios que complementen lo realizado en esta investigación.

## **PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

¿En qué medida el desarrollo de un modelo matemático que relacione los flujos y velocidades vehiculares con las emisiones de  $CO_2$  y  $NO_x$ , puede contribuir a la toma de decisiones en la planificación y gestión de tránsito que mejoren la calidad del aire en la ciudad de Cuenca?

¿Cómo representan los resultados obtenidos el comportamiento general de las emisiones de contaminantes en las vías colectoras de la ciudad de Cuenca?

## **ESTADO DEL ARTE**

“Los Estudios de Impacto sobre la Red Vial” (EIRV) son de aplicación generalizada en varios países a nivel mundial como requisito para evaluar los cambios en el comportamiento vehicular que se tendrá en los viarios que sirven de acceso a equipamientos públicos y privados con gran potencial atractor y generador de viajes, tanto en el área industrial, residencial, comercial y de espectáculos masivos. Por conceptualización un EIRV sirve para evaluar y cuantificar las necesidades de movilidad que surgen como la implementación o ampliación de infraestructura urbana, con el propósito de concientizar a los propietarios sobre el impacto que tendrá su funcionamiento sobre la red vial circundante y el área de influencia media del proyecto; además de garantizar una adecuada accesibilidad a las edificaciones, las etapas fundamentales que generalmente están incluidas en las diversas normas se relacionan con: el levantamiento y recolección de datos de los elementos del contexto urbano, la generación de viajes, la aplicación del nuevo elemento sobre la red vial

existente, la evaluación de los impactos y la generación de Alternativas de solución. (Quintero Angel, Plamar Matilde, Andueza Pedro, Casanova Leonardo y Díaz Mary, 2008).

En la ciudad de Cuenca, la gestión de la movilidad se ha convertido en un problema de atención emergente, por ello desde el mes de agosto del año 2014 la Dirección Municipal de Tránsito y Transporte de Cuenca en amparo a la Resolución No. 114-B-DIR-2009-CNTTSV realizó los trámites administrativos para solicitar a la Dirección de Control Municipal del GAD de Cuenca, que previo a la aprobación de planos y permisos de construcción y funcionamiento se exija al proyectista un estudio de impacto sobre la red vial en proyectos para equipamientos públicos y privados que se conviertan en polos atractores y generadores de viaje masivos, con lo cual se dio un gran primer paso en beneficio de la movilidad y el espacio público, lastimosamente en este tipo de estudios no se contempla en su alcance una evaluación de la contaminación del aire por efecto del congestionamiento vehicular, lo que sería muy favorable desde el punto de vista ambiental para la ciudad y sus habitantes.

Con el propósito de entender la evolución y el alcance que tienen otros países de realidades semejantes y otros más desarrollados, a continuación se presenta un breve resumen de lo que se exige en las normas de Perú, Chile, México, un caso especial de Medellín y *Leicester City* en el Reino Unido.

Tanto la normativa chilena (Metodología Normalizada para Estudios de Impacto en el Sistema de Transporte Urbano - EI/ST, publicada en 1998 por el Ministerio de Planificación y Cooperación – SECTRA), como la norma peruana (Guía Metodológica de contenidos de los Estudios de Impacto Vial- D.S. N° 037-2007-MTC, publicada en 2007 por Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC), analizan los impactos causados en el tránsito y transporte, pero no realiza una evaluación de los efectos ambientales generados por la implementación del nuevo proyecto y el congestionamiento vehicular; la normativa chilena lo realiza en tres etapas, en la primera revisa la caracterización de la localización a estudiar y se incluye una estimación preliminar de la demanda de transporte asociada al proyecto, cumplimiento de normas mínimas asociadas a impactos locales del emplazamiento: estacionamientos, señales, accesos y la determinación del área de influencia, en la segunda etapa se cuantifica los impactos en el sistema de transporte, se considera la

estimación de la demanda potencial con la elaboración de los escenarios de oferta y demanda en los cuales se analizará el impacto del nuevo desarrollo, el análisis de la situación con proyecto a través de la simulación del sistema de transporte en los escenarios antes descritos, donde se supone que el nuevo desarrollo estará presente y en operación, cuantifica los impactos producidos a través del cumplimiento de indicadores y normas previamente definidas, como parte de esta metodología, valoriza el impacto en términos económicos; la tercera etapa corresponde a las externalidades producidas en las negociaciones entre entidades involucradas (administrativas), se establecen estrategias para enfrentar el problema como tipos de cobro y mitigaciones. Por otra parte, la normativa peruana realiza el análisis de una manera muy similar, únicamente se centra en el estudio de tránsito y transporte evaluando los principales indicadores de comportamiento en la red vial.

A diferencia de las anteriores, la normativa mexicana (Manual de Impacto Ambiental en Estudios de Transporte Urbano, publicado en 2002 por la Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio – SEDESOL), revisa tanto las consideraciones de tránsito como las de medio ambiente, en el tomo 8 de la norma mexicana se analiza cinco secciones, el capítulo uno revisa la situación actual, la identificación de posibles impactos, medidas del impacto e interpretación de datos, el capítulo dos se presenta el índice general de estudios de impacto en la calidad del aire y la imagen urbana por fuentes móviles y por ruido, el capítulo tres se toman en consideración los principales contaminantes emitidos por fuentes móviles que afectan la calidad del aire y las medidas de mitigación, en el capítulo cuatro se revisa las variables generadoras de ruido, sus efectos, límites temporales y espaciales, efectos secundarios, casos especiales y mitigación; para finalizar en el capítulo cinco se revisan los efectos, variables, evaluación del paisaje, condiciones especiales y mitigación, es importante mencionar que en todas las etapas en donde se evalúan los impactos se realicen en base a métodos cuantitativos, además, se deben presentar los métodos de control para las medidas mitigaciones para lo cual en el tomo 9 presenta la guía de muestreo, monitoreo y análisis de contaminación del aire por fuentes normales y por ruido en estudios de transporte.

Otro caso de estudio es el realizado en la ciudad de Medellín, donde se elaboró el cálculo de emisión vehicular de contaminantes atmosféricos del parque automotor compuesto por 499 460 vehículos. El estudio se basó en el método europeo

CORINAIR, para ello necesitó la determinación del área de influencia que en este caso fue de 360 km<sup>2</sup>, las características de la red vial, clasificación de la flota vehicular categorizada por el cilindraje de los vehículos, las intensidades de tránsito horario y el flujo vehicular, hasta aquí se han realizado los mismos procesos que en las normas antes estudiadas, la diferencia radica en el cálculo de los factores de emisión, los cuales utilizan una ecuación compleja que considera todos los aspectos mencionados anteriormente. Los resultados del estudio indican que los principales contaminantes son el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, además es importante mencionar que los vehículos contaminan menos cuando van a velocidades altas sin paradas y aumentan cuando se encuentran detenidos por el tráfico.

En *Leicester city* (Reino Unido, se está desarrollando el proyecto *uTRAQ* que utiliza datos atmosféricos generados por satélite para ayudar a las autoridades locales a idear estrategias y reducir los niveles de polución generados por el tránsito vehicular. El proyecto integra un sistema de control de tráfico adaptivo para optimizar los tiempos de las señales de tráfico considerando tanto la calidad del aire como el flujo óptimo de circulación vehicular. Una clave para el éxito del proyecto es fusionar un software de modelación para probar estrategias en tiempo real para lo cual se usó Aimsun conjuntamente con el módulo de calidad de aire provisto por la universidad de Leicester y así generar simulaciones en tiempo real, es importante destacar que la polución de una ciudad no solo se debe al tráfico vehicular si no existen otras fuentes contaminantes como fábricas y la polución regional por lo que se tomó en consideración de manera conjunta los datos de monitoreo de la composición atmosférica y de clima a más de los efectos del viento, temperatura, presión y ozono; esta información fue de vital importancia en especial en ciudades medias para cuantificar la polución de una manera real. El proyecto *uTRAQ* recomienda la opción óptima y presenta otras viables, acompañadas del índice de desempeño para que el controlador decida cuál es la solución a adoptar, además es importante mencionar que el software puede trabajar de manera autónoma con modelos y redes como el *SCOOT*.

Para finalizar esta sección, la normativa local en la ciudad de Cuenca para EIRV considera una primera etapa de levantamiento y recolección de datos de los elementos del tejido urbano, se incluye la elaboración de planos arquitectónicos, antecedentes, descripción del proyecto, uso de suelo, etc., en la segunda etapa referida a la generación de viajes, la norma es muy exigente ya que incluye el análisis de la

accesibilidad y movilidad, características de las vías en el área de influencia media del proyecto, por otro lado se solicita realizar estudios de estacionamientos al interior del predio y determinar su rotatividad, requiere incluir modos de transporte no motorizados y solicita se realice la determinación del Trafico Promedio Diario Anual de en 1, 3 o 7 días de la semana en un período de 8 o 12 horas consecutivas según el tipo de equipamiento, la tercera etapa es la aplicación del nuevo elemento sobre la red vial existente, analiza cual es el verdadero incremento de flujos vehiculares y los posibles conflictos que se ocasionen entre todos los modos de transporte por la implementación del proyecto, en este sentido la norma no es muy clara ya que no se establece por ejemplo cuáles serán los mecanismos para calcular el incremento de demanda vehicular y peatonal en la red, tal como lo realiza la norma chilena y peruana, en la cuarta etapa de evaluación de los impactos, se asumen que con los nuevos valores de flujos incrementados y los posibles conflictos entre los modos del transporte se tendrá que determinar la capacidad y nivel de servicio de la red y de las intersecciones afectadas por el desarrollo del proyecto, para concluir la quinta etapa de generación de alternativas de solución, analiza las posibles remediaciones a la red vial por el impacto de la construcción y funcionamiento del proyecto como reformas geométricas, semaforización o nueva infraestructura vial, es decir, todo el estudio se lo realiza desde el punto de vista de ingeniería de tránsito, sin considerar los impactos causados en el medio ambiente.

Todo lo anteriormente expuesto ha abierto un amplio panorama sobre las realidades de países y ciudades referentes en América Latina y en Europa con respecto a la conservación y mejoramiento de la calidad del aire, por lo que se considera pertinente el realizar este trabajo de investigación, permitiendo en un futuro inmediato disponer de información generalizada que faculte la inclusión de este tipo de estudios en los alcances de los EIRV, colocándonos como ciudad a la vanguardia de la planificación y gestión del tránsito desde el punto de vista ambiental en el país.

## CAPITULO 1

### MARCO TEORICO

El fundamento teórico en el cual se basa la presente investigación es producto de un exhaustivo análisis de múltiple bibliografía internacionalmente reconocida, al igual que publicaciones y normativas locales y nacionales entre las que se destacan: "Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones" de Rafael Cal y Mayor Reyes Spíndola y James Cárdenas Grisales "Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte" de la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá D.C, "*Highway Capacity Manual - HCM 2010*" publicado por *The Transportation Research Board of the National Academies of the United States*, "*Transport Planning and Traffic Engineering*", de CA O'Flaherty, "*Traffic & Highway Engineering*" de Nicholas J. Garber, "*Modelling Transport*", de Juan de Dios Ortuzar y Luis G. Willumsen, "Norma Ecuatoriana de Diseño Vial – NEVI 2012" publicado por el Ministerio de Transporte y Obras Publicas del Ecuador, "Reglamento Técnico Ecuatoriano 004 de Señalización Vial" publicado por el Ministerio de Transporte y Obras Publicas y la Agencia Nacional de Transito del Ecuador, "Informe de la calidad del aire de Cuenca -2015", "Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca – 2014" publicado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca a través de su empresa EMOV-EP, "Metodología Normalizada para Estudio de Impacto en el Sistema de Transporte Urbano EI/ST" publicada en 1998 por el Ministerio de Planificación y Cooperación – SECTRA de Chile, "Guía metodológica de contenido de los estudios de impacto vial" publicada en 2007 por Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC del Perú, "Programa de Asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas" publicado en 2002 por la Subsecretaria de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio – SEDESOL.

#### 1. Conceptos Generales

##### 1.1. Teoría de flujo de tráfico vehicular

Fue establecida hace varias décadas por investigadores del Reino Unido, consiste en el establecimiento de relaciones matemáticas entre los principales elementos que intervienen en el flujo vehicular: flujo, densidad y velocidad.

Su aplicación generalmente se enfoca en el diseño y optimización de infraestructura vial (carriles de almacenamiento de giros, rampas, viaductos, puentes), en dispositivos de control y gestión de tránsito (semáforos, pasos a desnivel, distribuidores), micro simulaciones que usan algoritmos matemáticos para estudiar las interrelaciones que existen entre los elementos del flujo vehicular y para estimar el efecto de los cambios en el flujo de tránsito, estudios de impacto vial que analicen contaminación del aire, consumo de combustibles y accidentabilidad.

Existen dos tipos principales de flujo vehicular, el primero es denominado “flujo ininterrumpido”, es regulado por las interacciones entre vehículo-vehículo y entre los vehículos y la vía, dicho de otra manera a modalidad de ejemplo, los vehículos que circulan en una autopista están haciéndolo bajo flujo ininterrumpido; el segundo tipo es llamado “flujo interrumpido”, este es regulado por un medio externo, como un semáforo u otro dispositivo de control, en él las interacciones vehículo-vehículo y vehículo-vía presentan un rol secundario. Para la presente investigación las condiciones operativas del viario en estudio están bajo el segundo régimen de flujo vehicular.

### 1.1.1 Flujo (q)

Es el número de vehículos que pasan por un punto específico de un tramo vial en una unidad de tiempo.

$$q = \frac{N}{t} \quad (1.1)$$

q= flujo

N= número de vehículos

T= intervalo de tiempo específico

### 1.1.2 Densidad o concentración (k)

Es la cantidad de vehículos que ocupan un tramo de una vía (generalmente es el kilómetro) en un instante dado, altas densidades significan que los vehículos individuales se encuentran muy juntos entre sí, mientras que bajas densidades implican grandes distancias entre vehículos.

$$k = \frac{N}{d} \quad (1.2)$$

k= densidad

N=número de vehículos

d=longitud de la vía (km)

### 1.1.3 Velocidad (v)

Está definida como la distancia por unidad de tiempo, en ingeniería de tránsito existen varios tipos de velocidad que se analizarán más adelante, ya que cada vehículo circula por la vía a una velocidad que es un tanto distinta del resto. En la cuantificación del flujo de tráfico, el promedio de velocidad del tráfico es una variable significativa.

$$v = \frac{d}{t} \quad (1.3)$$

v= velocidad

d=distancia recorrida

t=tiempo de recorrido

### 1.1.4 Ecuación fundamental del flujo vehicular

La velocidad, el flujo y la densidad están relacionados entre sí, dichas relaciones no son difíciles de observar en el mundo real, bajo condiciones de flujo ininterrumpido, la velocidad, la densidad y el flujo se relacionan por la siguiente ecuación fundamental del flujo vehicular:

$$q = v \cdot k \quad (1.4)$$

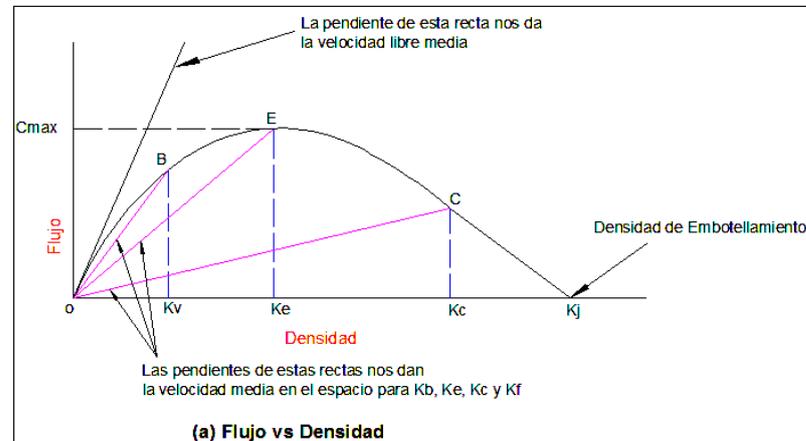
q=flujo

v=velocidad

k=densidad

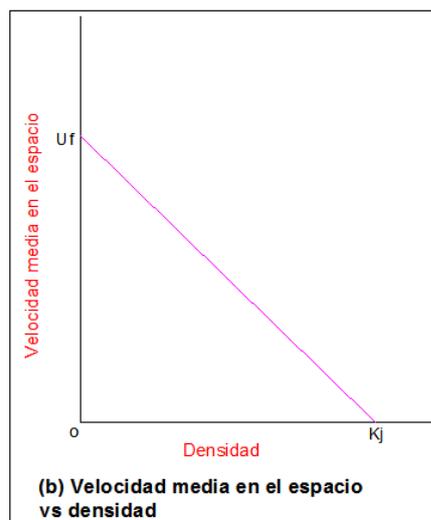
Una representación gráfica de estas relaciones se observa en las siguientes figuras que se conocen como los diagramas fundamentales de flujo de tránsito vehicular. La siguiente figura expresa que cuando la densidad de la vía es cero, el flujo también es cero porque no existen vehículos en la vía, luego a medida que aumenta la densidad, el flujo también aumenta paulatinamente, pero cuando la densidad alcanza su valor máximo llamado “densidad de embotellamiento (kj)”, el flujo debe ser cero porque los vehículos tenderán a alinearse unos a otros extremo con extremo, un incremento

continuo de la densidad, conducirá a una reducción continua del flujo, el cual finalmente será cero cuando la densidad sea igual a la de embotellamiento.



*Figura 1-1 Relación entre flujo y densidad*  
Fuente: Traffic & Highway Engineering

A continuación la figura muestra que cuando existen muy pocos vehículos en la vía, la libertad de maniobra es la máxima, permitiendo que se puedan desplazar a la máxima velocidad posible, pero un incremento continuo de la densidad trae como resultado directo una disminución de la velocidad, alcanzando un punto en el cual se llega a la densidad de embotellamiento donde la velocidad es nula.



*Figura 1-2 Relación entre velocidad y densidad*  
Fuente: Traffic & Highway Engineering

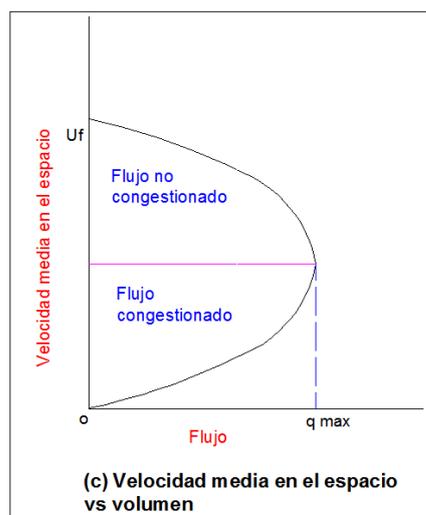


Figura 1-3 Relación entre velocidad y flujo  
Fuente: Traffic & Highway Engineering

De manera evidente se puede apreciar en la figura que antecede, que cuando el flujo es muy bajo existe poca interrelación entre los vehículos, los vehículos puedan viajar a la máxima velocidad posible, pero un incremento continuo del flujo tendrá como resultado un decremento continuo de la velocidad, alcanzando un punto en el cual un mayor número de vehículos ocasionará una reducción en la libre circulación de vehículos que transitan, es decir una reducción del flujo vehicular, conduciendo a un congestionamiento lo que llevaría que tanto la velocidad como el flujo sean cero.

## 1.2. Tráfico promedio diario anual (TPDA)

Se define el volumen de tránsito promedio diario anual, cómo el número de vehículos que circulan por una sección de una vía en un día, mismo que es representativo de todo el año, la formulación matemática para su cálculo se la describe en la siguiente ecuación.

$$TPDA = \frac{TA}{365} \quad (1.5)$$

TA: Tráfico Anual (sumatoria del tráfico de todos los días del año)

### 1.2.1. Metodología de cálculo del Tráfico Promedio Diario Anual

Existen metodologías que sirven para poder estimar el TPDA mediante procesos estadísticos, para el desarrollo de análisis del presente estudio se utilizó el método de

los factores, reconocido y avalado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, en el Capítulo 3 – Tráfico de las Normas de Diseño Geométrico de Carreteras NEVI 2012.

Para su determinación es necesario:

- I. Disponer de un conteo automático de 24 horas consecutivas diarias por un mes y mínimo una semana de una vía de características geométricas y operativas semejantes a la de estudio, como parte de la información secundaria recabada se utilizó un conteo automático de tráfico de la Av. Remigio Crespo Toral.
- II. Conteo manual del tráfico observado en zona de estudio (mínimo 12 horas consecutivas).
- III. Consumo de combustibles de la provincia del Azuay del año inmediatamente inferior al del conteo, en este caso del año 2015, publicados por la Secretaría de Hidrocarburos del Ecuador.

Los derivados que se consideraron para el consumo de combustibles son: gasolina extra, gasolina súper, diesel 2 y diesel Premium, ya que éstos son los que utilizan los diferentes componentes motorizados del tráfico observado, ya sean vehículos livianos, camiones, buses, trailers o motocicletas.

El método de los factores consiste en calcular un factor de expansión con el cual se afecta al tráfico observado, obteniendo de esta forma el TPDA. A su vez, el factor de expansión es el producto de los factores de corrección del tráfico que se describen a continuación.

$$TPDA = TO \times Fe \quad (1.6)$$

TO = Tráfico observado

Fe = Factor de expansión

A continuación se describe el procedimiento para el cálculo del factor de expansión:

$$Fe = fh \times fd \times fs \times fm \quad (1.7)$$

Factor horario (fh) = El factor horario permite llevar el tráfico observado (de 12 horas consecutivas) a un valor de tráfico diario, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_h = \frac{\text{Total tráfico del conteo automático del día correspondiente conteo manual}}{\text{Tráfico de conteo automático correspondiente a las horas conteo manual}} \quad (1.8)$$

Factor diario (fd) = El factor diario permite llevar el tráfico diario (obtenido con el factor horario) a un valor de tráfico semanal, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_d = \frac{\text{Promedio diario semanal de conteo automático}}{\text{Tráfico del conteo automático del día correspondiente al conteo manual}} \quad (1.9)$$

Factor semanal (fs) = El factor semanal permite llevar el tráfico semanal (obtenido con el factor diario) a un valor de tráfico mensual, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_s = \frac{\text{Promedio del tráfico semanal del conteo automático}}{\text{Tráfico de la semana que contiene el día del conteo manual}} \quad (1.10)$$

Factor mensual (fm)= El factor mensual permite llevar el tráfico mensual (obtenido con el factor semanal) a un valor de tráfico anual, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{\text{Consumo promedio mensual de combustible}}{\text{Consumo de combustibles del mes que contiene el conteo manual}} \quad (1.11)$$

Para el levantamiento de información primaria referente al tráfico vehicular observado de la presente investigación, se usan hojas de registro que consideran la clasificación de los vehículos en cuatro grandes grupos: livianos, buses, camiones y dos ruedas, el registro se lo realiza en el horario de 07H00 hasta las 19H00 en intervalos de 15 minutos y por pantalla de acceso a cada intersección, se colocan datos generales como fecha, estado del clima, nombre del encuestador, supervisor, etc. En la siguiente figura se detalla un modelo del formulario de registro.

ANÁLISIS OPERATIVO VEHICULAR DE LA AVENIDA 10. DE AGOSTO DE LA CIUDAD DE CUENCA - ECUADOR																						
CONTEO MANUAL DE TRAFICO MOTORIZADO																						
N° INTERSECCION:					INSTITUCION ACADEMICA: UNIVERSIDAD DEL AZUAY					SECTOR:												
N° PANTALLA:					PROVINCIA: AZUAY																	
FECHA:					PARALELO:																	
DIA DE LA SEMANA:					DIRECTOR DE PROYECTO: ING. CHRISTIAN MOYANO TOBAR																	
ENCUESTADOR:					SUPERVISOR CAMPO:																	
ESTADO DEL TIEMPO:					OBSERVACIONES:																	
HORAS	MAÑANA:			TARDE:			CAMION C2			CAMION C3			CAMION C4			CAMION C5 O MÁS			DOS RUEDAS			TOTAL
	LIVIANOS			BUSES			CAMION C2			CAMION C3			CAMION C4			CAMION C5 O MÁS			DOS RUEDAS			
	↑	↶	↷	↑	↶	↷	↑	↶	↷	↑	↶	↷	↑	↶	↷	↑	↶	↷	↑	↶	↷	
7h00-7h15																					0	
7h15-7h30																						0
7h30-7h45																						0
7h45-8h00																						0
8h00-8h15																						0
8h15-8h30																						0
8h30-8h45																						0
8h45-9h00																						0
9h00-9h15																						0
9h15-9h30																						0
9h30-9h45																						0
9h45-10h00																						0
10h00-10h15																						0
10h15-10h30																						0
10h30-10h45																						0
10h45-11h00																						0
11h00-11h15																						0
11h15-11h30																						0
11h30-11h45																						0
11h45-12h00																						0

Figura 1-4 Formulario para levantamiento de tráfico observado  
Fuente: Autor

### 1.3. Volúmenes de Tránsito Horarios

A continuación se define los siguientes volúmenes de tránsito horarios, dados en vehículos por hora.

#### 1.3.1. Volumen horario máximo anual (VHMA)

Es el máximo volumen horario que se da en un punto o sección de una calzada durante un año determinado.

#### 1.3.2. Volumen horario de máxima demanda (VHMD)

Es el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de una calzada durante 60min consecutivos.

### 1.3.3. Factor hora de máxima demanda (FHMD)

Este factor nos indica el grado de uniformidad que tiene el tráfico en la hora de máxima demanda y se expresa como la relación que existe, entre el volumen de tráfico durante la hora pico y 4 veces el mayor volumen registrado durante el lapso de quince minutos dentro de dicha hora pico, y debe ser menor o igual que uno.

$$fhp = \frac{q_{60}}{4 \times q_{15}} \quad (1.12)$$

$$fhp = \frac{q_{60}}{12 \times q_{15}} \quad (1.13)$$

$q_{60}$  = Flujo horario máximo en el periodo de conteo

$q_{15}$  = Flujo máximo en los periodos de 15 minutos correspondientes  $q_{60}$

$q_5$  = Flujo máximo en los periodos de 5 minutos correspondientes  $q_{60}$

En función al valor obtenido, se puede establecer como es la distribución de los flujos de 15 minutos durante la hora de máxima demanda, teniendo como particular que un factor de hora pico mayor a 0.90 indica una distribución uniforme, entre 0.80 y 0.90 la distribución es poco uniforme, entre 0.70 y 0.80 una distribución muy mala, y menor a 0.60 se considera una distribución nada uniforme.

### 1.4. Capacidad Vial

Se define como el máximo número de vehículos que pueden pasar por un punto de un carril durante un intervalo de tiempo dado, el intervalo de tiempo utilizado en la mayoría de análisis es de 15 minutos.

Un sistema vial funciona cuando la magnitud del flujo, circulando a una velocidad razonable, es menor que la capacidad del sistema. Para determinar la capacidad de un sistema vial, es necesario realizar un estudio cuantitativo y cualitativo, el cual permite evaluar la suficiencia (cuantitativo) y la calidad (cualitativo) del servicio ofrecido por el sistema (oferta) a los usuarios (demanda).

La capacidad se puede referir no solamente a vehículos, sino también a usuarios, bien sean peatones, pasajeros o conductores.

El procedimiento, que sigue la filosofía del *Highway Capacity Manual HCM 2010*, empieza por establecer la capacidad para condiciones básicas o ideales y luego la afecta con factores menores que la unidad para reducir su magnitud en razón a las condiciones reales que se presentan en la parte operativa de la vía. Los requisitos que definen las condiciones básicas o ideales son: repartición del tránsito por igual en ambos sentidos, distribución de giros solo frontales, terreno plano y rasante horizontal, carriles de no menos de 3.65m de ancho, bermas de no menos de 1.80m de ancho, ausencia de vehículos pesados, superficie de rodadura en condiciones óptimas, alineamiento recto, presencia de peatones y ciclistas, etc. En la presente investigación se ha utilizado esta metodología para vías urbanas, pero por su extensión no se describirá en el presente documento, por lo que se recomienda ante cualquier duda consultar los capítulos 15, 16 y 17 del citado documento.

### 1.5. Grado de Saturación

El grado de saturación es una forma de evaluar el funcionamiento de las vías, éste se realiza asignando el tráfico que soporta y la cantidad de vehículos que es capaz de absorber, esta información indica el grado de aprovechamiento que está teniendo la vía. Se puede identificar si el viario tiene una capacidad muy baja para albergar a todos los vehículos que recibe diariamente, o por el contrario, se trata de una vía sobredimensionada que permanece desaprovechada puesto que el porcentaje de espacio destinado al vehículo es excesivo.

La relación volumen/capacidad nos indica el grado de saturación, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i} \quad (1.14)$$

$X_i$  = Relación volumen/ capacidad para el grupo de carriles  $i$ .

$v_i$  = Tasa de flujo de demanda actual o proyectada del grupo de carriles  $i$ .

$c_i$  = Capacidad del flujo de carriles  $i$ .

### 1.6. Congestión Vehicular

En los períodos de máxima demanda, el movimiento vehicular se va tornando deficiente con pérdidas de velocidad, lo que hace que el sistema tienda a saturarse, hasta llegar a funcionar a niveles de congestionamiento. Las demoras y colas, son un

fenómeno de espera, comúnmente asociado a muchos problemas de tránsito, ocasionados por la variabilidad del flujo del mismo, pues hay períodos en que la demanda puede llegar a ser muy grande, o porque la capacidad del sistema vial varíe con el tiempo.

La congestión ocurre porque el sistema vial tiene una capacidad limitada y porque la demanda colocada tiene un carácter aleatorio.

### 1.7. Teoría de colas

La teoría de colas es una herramienta importante para el análisis del congestionamiento, mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos. Una cola se genera cuando los vehículos llegan a una estación de servicio (un estacionamiento, una intersección con semáforo, un enlace de entrada a una autopista, un carril especial, etc.), se define a la cola, como el número de vehículos que esperan ser servidos, sin incluir aquellos que actualmente están siendo atendidos.

La intersección con semáforos es uno de los ejemplos más típicos de un fenómeno de espera, puesto que, por la presencia de la luz roja siempre existirá la formación de colas de vehículos. Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos a través de la línea de alto se incrementa rápidamente a una tasa equivalente al flujo de saturación, que es la tasa máxima de salidas que se puede obtener cuando existen colas, el cual se mantiene constante hasta que la cola se disipe o hasta que termina el verde. La longitud de cola ( $Q$ ) en cualquier instante es igual a la demanda menos el servicio y la longitud máxima de cola ( $Q_m$ ) ocurre al final del rojo, donde el servicio aún es cero:

$$Q_m = \lambda * r \quad (1.15)$$

$\lambda$ : tasa de llegada de los vehículos

$r$ : rojo efectivo

### 1.8. Niveles de servicio

Se define al nivel de servicio como una medida cualitativa que describe el comportamiento operacional de un flujo vehicular y de su percepción por el conductor o pasajeros, se caracteriza por la velocidad, el tiempo de recorrido, la libertad de

maniobra, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial. Existen dos factores que lo afectan, los internos que varían con la velocidad, el volumen, la composición del tránsito, etc. y en los externos están las características físicas, ancho de carril, pendientes, etc.

Internacionalmente se han establecido seis niveles de servicios para las diferentes condiciones operacionales, los cuales se detallan a continuación:

**Nivel de servicio A:** representa circulación a flujo libre. Se tiene una libertad para seleccionar la velocidad deseada y maniobras dentro del tránsito. Es el nivel con mayor comodidad y conveniencia adecuado para la circulación del motorista, pasajero o peatón.

**Nivel de servicio B:** está dentro del rango de flujo libre. La selección de velocidad deseada sigue inafectada, pero disminuye un poco la libertad de maniobra.

**Nivel de servicio C:** pertenece al rango de flujo estable. La selección de velocidad se ve afectada por la presencia de otros y la libertad de maniobrar comienza a ser restringida.

**Nivel de servicio D:** representa una circulación de densidad elevada, pero estable. La velocidad y libertad de maniobra quedan restringidas y el conductor y peatón tienen comodidad y conveniencia bajo.

**Nivel de servicio E:** el funcionamiento está cerca del límite de su capacidad. La velocidad de todos se ve reducida, se vuelve uniforme, la libertad para maniobrar es muy difícil, por lo que el vehículo o peatón tiene que ceder el paso.

**Nivel de servicio F:** representa condiciones de flujo forzado. Se produce cuando la cantidad de tránsito, excede la cantidad que puede pasar por él.

La metodología del *Highway Capacity Manual HCM 2010* evalúa la calidad de operación vehicular a través de la determinación del nivel de servicio de cada acceso y de toda la intersección globalmente, en la presente investigación se han tomado en cuenta los fundamentos teóricos para la determinación de los niveles de servicio de intersecciones semaforizadas, no semaforizadas y redondeles, las cuales se basan en un rango de demora en toda la intersección, al igual que con el concepto de capacidad

la descripción de la metodología no se realizará en el presente documento por lo que se recomienda ante cualquier duda consultar los capítulos 15, 16 y 17 de la norma antes mencionada.

### 1.8.1. Demoras

Se define como el tiempo total transcurrido desde cuando un vehículo se detiene al final de la cola hasta que el vehículo logra entrar en la intersección. Este tiempo incluye el tiempo requerido por el vehículo para pasar del extremo final de la cola a la primera posición. La demora total promedio para cualquier movimiento está en función de la capacidad del acceso y del grado de saturación. En situaciones donde el grado de saturación es mayor de 0.9, la magnitud de la demora promedio por vehículo depende además de la duración del período de análisis.

### 1.8.2. Nivel de Servicio para intersecciones Semaforzadas

El nivel de servicio para intersecciones semaforizadas está directamente relacionado con el control de demoras de tiempo parado por vehículo. Para determinar los niveles de servicio se siguen los siguientes criterios:

*Tabla 1-1 Niveles de Servicio Intersecciones Semaforzadas*

Niveles de Servicio	Demoras de tiempo parado por vehículo (s)
A	Menores de 10
B	Mayores de 10 y menores de 20
C	Mayores de 20 y menores de 35
D	Mayores de 35 y menores de 55
E	Mayores de 55 y menores de 80
F	Mayores de 80

*Fuente: HCM 2010*

### 1.8.3. Nivel de Servicio para intersecciones No Semaforzadas

El nivel de servicio para intersecciones no semaforizadas se relaciona con el control de demoras de tiempo parado por vehículo. Para determinar los niveles de servicio se siguen los siguientes criterios:

*Tabla 1-2 Niveles de Servicio Intersecciones No semaforizadas*

<b>Niveles de Servicio</b>	<b>de Demoras de tiempo parado por vehículo (s)</b>
A	Menores a 10
B	Mayores a 10 y Menores a 15
C	Mayores a 15 y Menores a 25
D	Mayores a 25 y Menores a 35
E	Mayores a 35 y Menores a 50
F	Mayores a 50

*Fuente: HCM 2010*

#### **1.8.4. Nivel de Servicio para Redondeles**

El nivel de servicio para redondeles se relaciona con el control de demoras de tiempo parado por vehículo, además se debe tener en cuenta la relación Volumen/Capacidad evaluando si esta relación es mayor a 1 entonces el nivel de servicio directamente es F, de lo contrario se establece según las demoras en el redondel. Para calcularlos se siguen los siguientes criterios:

*Tabla 1-3 Niveles de Servicio Redondeles*

<b>Niveles de Servicio</b>	<b>de Demoras de tiempo parado por vehículo (s)</b>
A	Menores a 10
B	Mayores a 10 y Menores a 15
C	Mayores a 15 y Menores a 25
D	Mayores a 25 y Menores a 35
E	Mayores a 35 y Menores a 50
F	Mayores a 50

*Fuente: HCM 2010*

#### **1.9. Parámetros Especiales de Ingeniería de Transito**

Con el propósito de complementar los conceptos anteriormente expuestos a continuación se detallan varios parámetros especiales de ingeniería de tránsito.

### 1.9.1. Velocidad de recorrido

La distancia de recorrido dividida por el tiempo de recorrido total, incluyendo el tiempo de recorrido y los tiempos de demora, para determinarla se utiliza el método del vehículo flotante, su ecuación se detalla a continuación:

$$v_v = \frac{d}{t_v} \quad (1.16)$$

$v_v$  = velocidad de recorrido

$d$  = distancia recorrida

$t_v$  = tiempo de recorrido

### 1.9.2. Velocidad de marcha

Se refiere a la distancia de recorrido dividida por el tiempo de marcha, este no incluye las demoras, para determinarla se utiliza el método del vehículo flotante, su ecuación se detalla a continuación:

$$v_r = \frac{d}{t_r} \quad (1.17)$$

$v_r$  = velocidad de marcha

$d$  = distancia recorrida

$t_r$  = tiempo de marcha

### 1.9.3. Velocidad de punto o instantánea

Es la velocidad en un lugar específico de una vía, sirve para evaluar las condiciones operacionales del tránsito, obteniendo así una distribución de velocidades por grupos de usuarios.

En la presente investigación se realizó en la avenida 10 de Agosto un estudio de detallado de los tres últimos tipos de velocidades descritos.

### 1.9.4. Velocidad media temporal (Vt)

Es la media aritmética de las velocidades de los vehículos que transitan por un punto de una vía durante un intervalo de tiempo. La velocidad media temporal se calcula mediante:

$$V_t = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (1.18)$$

$V_t$  = velocidad media temporal

$V_i$  = velocidad instantánea del vehículo  $i$

$n$  = número total de vehículos observados o tamaño de la muestra.

### 1.9.5. Velocidad media espacial ( $V_e$ )

Es la media aritmética de las velocidades de los vehículos que transitan por un punto de una vía durante un intervalo de tiempo. Se obtienen al dividir la distancia total recorrida por dos o más vehículos en un tramo de vía, entre el tiempo total requerido por esos vehículos para que recorran esa distancia. La velocidad media espacial se calcula mediante:

$$V_e = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{V_i}\right)} \quad (1.19)$$

$V_e$  = velocidad media espacial

$V_i$  = velocidad instantánea del vehículo  $i$

$n$  = número total de vehículos observados o tamaño de la muestra.

### 1.9.6. Determinación de la Hora de Máxima Demanda

Con el propósito de evaluar las condiciones operacionales más críticas del viario en estudio, se tiene que considerar los aforos vehiculares de toda la red convertidos a vehículos livianos equivalentes, para ello se usan los factores establecidos por el HCM 2010 para cada tipo de vehículo, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

*Tabla 1-4 Factores de Vehículos Livianos Equivalentes*

Tipo de vehículo	Vías Rurales	Vías Urbanas	Redondeles	Intersecciones semafóricas
Coches	1	1	1	1
Camiones medios	3	1.75	2.8	1.75
Camiones pesados	3	2.5	2.8	1.75
Autobuses	3	3	2.8	2.25
Motos	1	0.75	0.75	0.33
Bicicletas	0.5	0.33	0.5	0.2

*Fuente: Research on Road Traffic, Road Research Laboratory, Londres*

### 1.9.7. Estadística de validación GEH

Es una estadística que sirve para la validación entre los datos simulados y los datos medidos en campo, es llamada así por su inventor *Geoffrey E. Havers*, se caracteriza porque toma en cuenta el error relativo y su valor no depende de valores nulos que pueden aparecer, para un proceso de micro simulación generalmente se acepta que un modelo de asignación de tráfico estará satisfactoriamente calibrado si al menos el 60% de los arcos tienen un GEH inferior a 5.0 y el 95% de los arcos tienen un GEH inferior a 10.0, para su cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(w-v)^2}{w+v}} \quad (1.20)$$

GEH = Estadístico de validación

w = valores reales a ser validados

v = valores simulados a ser validados

### 1.10. Metodología para determinación de Velocidades y demoras

En la presente investigación se ha llevado a cabo un levantamiento de información primaria relacionada con las velocidades de marcha y de recorrido de los vehículos que circulan por el viario en estudio, ésta información se obtuvo aplicando el método del vehículo flotante.

#### 1.10.1. Método del Vehículo Flotante

Consiste en recorrer varias veces el tramo de vía en estudio, donde el conductor del vehículo trata de flotar en la corriente vehicular, procurando que el número de vehículos que adelante sea igual al que rebasen el vehículo flotante. Durante el recorrido se mide el tiempo que tarda el vehículo entre dos puntos que conforman un tramo, del cual se conoce previamente su longitud. El tiempo y la distancia recorrida, permiten determinar la velocidad de recorrido, de marcha y sus demoras en el tramo.

Los resultados son de utilidad en la evaluación general de movimientos de tránsito dentro de un área o a lo largo de una ruta seleccionada, proporcionando información al especialista de tránsito a definir las zonas con problemas operacionales y de diseño, para proponer soluciones que incrementen la movilidad y la seguridad, dentro de las



### 1.10.2. Recorridos y Tamaño de la Muestra

El tamaño de la muestra para estudios de velocidades de marcha y demoras depende de las necesidades específicas para las cuales la información haya sido recopilada, según El Manual Mexicano de Estudios de Ingeniería de Tránsito, se sugieren ciertos rangos para errores permitidos en el estimado de la velocidad media de marcha para diferentes tipos de estudios.

#### 1. Planeación de transporte y necesidades para los estudios en carreteras

$$\pm 5,0 \text{ a } \pm 8,0 \text{ km/h}$$

#### 2. Operaciones del tránsito, análisis de tendencias y evaluaciones económicas

$$\pm 3,5 \text{ a } \pm 6,5 \text{ km/h}$$

#### 3. Estudios de antes y después

$$\pm 2,0 \text{ a } \pm 5,0 \text{ km/h}$$

Para el presente estudio se eligió la opción Nro. 3, observando el menor margen de error y la mayor cantidad de muestras para el análisis.

Luego de tener claro el Margen de error de Muestreo  $\pm 2,0$  a  $\pm 5,0$  km/h, se debe encontrar el rango medio de velocidades de los viajes, según la siguiente fórmula;

$$R = \frac{\sum S}{N-1} \quad (1.21)$$

R = rango medio en velocidades de viaje (km/h)

S = sumatoria de los valores de las diferencias en velocidad

N = número de recorridos

El tamaño mínimo aproximado de la muestra se obtiene usando la siguiente tabla para el valor medio del rango de velocidades y el error permitido deseado, si el tamaño de la muestra requerido es mayor que el número inicial de recorridos, entonces se deben hacer recorridos adicionales bajo condiciones similares a las iniciales, por otro lado la tabla determina el tamaño aproximado del muestreo para cada dirección de viaje, después de haber determinado el error permitido de la muestra de acuerdo con el propósito del estudio.

Tabla 1-5 Tamaño mínimo de muestra con nivel de confianza del 95%

Rango medio de velocidades (R)	Numero mínimo del Muestreo para el error especificado				
	+/- 2,0 Km/h	+/- 3,5 Km/h	+/- 5,0 Km/h	+/- 6,5 Km/h	+/- 8,0 Km/h
5	4	3	2	2	2
10	8	4	3	3	2
15	14	7	5	3	3
20	21	9	6	5	4
25	28	13	8	6	5
30	38	16	10	7	6

Fuente: Manual Mexicano de Estudios de Ingeniería de Tránsito

### 1.10.3. Equipos de medición para levantamiento de información primaria

Para el levantamiento de información primaria relacionada a las velocidades de marcha, recorrido y demoras de la presente investigación se han utilizado equipos de última tecnología, entre los cuales destacamos el uso de una cámara de video del alta definición de 1080p con conectividad compatible con ANT+®, USB 2.0 y Wi-Fi 802.11 bgn, posee un GPS de alta precisión que trabaja en un rango de temperaturas de  $-15^{\circ}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ , cuenta con un acelerómetro y altímetro incorporado, estabilizador de imagen digital y corrección de distorsión del objetivo, los cuales se pueden apreciar en la siguiente figura.



Figura 1-6 Cámara modelo Virb Elite de Garmin  
Fuente: Garmin - España

Las velocidades instantáneas del viario en estudio fueron obtenidas con aporte de un contador automático modelo Picocount 4500 de la casa Vehicle Counts de procedencia norteamericana, este dispositivo es usado para recolectar datos de tráfico, clasificaciones y velocidades instantáneas de vehículos en las vías por medio de mangueras de goma sujetados y estirados que se colocan transversalmente al eje de la calzada.

Para el procesamiento de la información se usó el software “TrafficViewer Pro” del mismo fabricante de los equipos, el cual cuenta con esquemas de clasificación FHWA y AustRoads incorporados y permite la personalización completa de los esquemas o la creación de nuevos esquemas para adaptarlos a las realidades locales, dentro de las características principales del equipo están su material que es de Aluminio mecanizado Anodizado de Oro, el rango de temperatura de trabajo es (-40 ° C a 70 ° C), su sistema de alimentación es con una Batería de litio 3VDC 2 de una duración de 10 años, presenta 4 canales de registro de información y una Memoria de 250MB (2Gigabits) de Flash para registrar aproximadamente 20.000.000 vehículos, la interfaz de descarga es con cable de descarga USB personalizado a 921.600 Baud o cable de descarga RS-232 personalizado a 115.200 baudios, en la siguiente figura se ilustra el equipo.



*Figura 1-7 Contador automático Modelo Picocount 4500  
Fuente: Vehicle counts - USA*

### **1.11. Emisiones de contaminación del aire por efecto de tráfico vehicular**

Es importante destacar que los contaminantes del aire más importantes por efecto de la congestión vehicular son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), óxidos de nitrógeno(NO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos volátiles (VOC) e hidrocarburos (HC), y oxidantes fotoquímicos como el ozono, cuyos efectos adversos en la salud son numerosos y variados, manifestándose en diferentes partes del cuerpo humano, entre las que se destacan el sistema respiratorio, sistema inmunológico, piel y tejidos mucosos, sistema sensorial, sistema nervioso central y periférico y sistema cardiovascular, siendo los causantes de miles de muertes al año en todo el mundo.

Las emisiones de gases efecto invernadero producidas por los desechos de la quema de combustibles fósiles en el motor del vehículo son emitidos a través del sistema de

escape, a continuación se realiza una descripción del efecto de este tipo de gases relacionado al efecto del congestionamiento vehicular.

#### **1.11.1. Monóxido de carbono (CO)**

Es un resultado de la combustión incompleta debido a la ineficiencia de tecnologías no fósiles. Uno de los efectos nocivos es que disminuye la capacidad natural de la sangre para cargar oxígeno en las células, lo que conlleva peligrosos riesgos de enfermedad cardíaca.

#### **1.11.2. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

Sus emisiones absorben y emiten radiación infrarroja en sus dos frecuencias de vibración activas en infrarrojos. Este proceso hace que el dióxido de carbono caliente la superficie y la atmósfera inferior y enfríe la atmósfera superior.

#### **1.11.3. Hidrocarburos (HC)**

Son partículas que no reaccionaron en la combustión o lo hicieron parcialmente, es el mayor contribuyente de lo que se conoce como el smog reconocido como altamente tóxico para la salud, pudiendo causar daños y problemas en el hígado así como cáncer si se está continuamente expuesto a este elemento.

#### **1.11.4. Óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

Son generados cuando el nitrógeno reacciona con el oxígeno del aire bajo las condiciones de alta temperatura y presión que se presentan dentro del motor de un vehículo, sus emisiones contribuyen a la creación del smog, así como a la formación de la lluvia ácida.

#### **1.11.5. Material Particulado en suspensión (MP)**

Consisten en acumulación de diminutas piezas de sólidos o de gotitas de líquidos en la atmósfera ambiental, generada a partir de varias actividades antropogénicas como los gases que salen de los escapes de los vehículos a motor.

### 1.11.6. Modelos de Estimación de Emisiones de Contaminantes

Existen varios modelos para estimar las emisiones de gases por efecto del congestionamiento vehicular, en el presente estudio nos enfocaremos a los modelos que están incluidos en la herramienta informática de microsimulación de tránsito Aimsun 8.1 versión *expert*, proporciona tres modelos ambientales de contaminantes del aire, el Modelo de Consumo de Combustible, el Modelo de Emisión de Contaminación *QUARTET* y el Modelo de Emisión de Contaminación Panis et al.

Haremos hincapié en el tercer modelo citado, ya que tiene la capacidad de estimar de manera instantánea la contaminación causadas por la aceleración / desaceleración, velocidad, tipo de vehículo y el tipo de combustible para todos los vehículos en la simulación basada en el estudio de Luc Int Panis, Steven Broekx, Ronghui Lui: “Modelo de emisión instantánea de tráfico y la influencia de los límites de velocidad del tráfico”.

#### 1.11.6.1. Modelo de Emisiones Instantáneas por influencia de velocidad

Se hace énfasis en el análisis de este modelo en particular ya que el software de micro simulación de tránsito Aimsun en su versión 8.1, usado para evaluar el viario en estudio lo incluye como uno de sus tres modelos de contaminación, el presente estudio se fundamenta en los resultados obtenidos con la aplicación de este modelo y sus resultados fueron validados con el apoyo de otro software de estimación de contaminaciones como lo es el IVE (*International Vehicle Emissions*).

El estudio que a continuación se detalla fue publicado en la revista *Science of the Total Environment* 371 (2006) 270 – 285 en octubre del año 2006 bajo el título “*Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits*”, se lo ubica en el repositorio de artículos de *ELSEVIER-SCOPUS* y está disponible online en [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Es indiscutible que en los últimos años la calidad del aire local, regional y mundial ha recibido gran atención por parte de científicos, políticos y la sociedad en general debido a su relación directa con la salud de la población. Dentro de los contaminantes más nocivos tenemos a los óxidos de nitrógeno, los sulfuros, el dióxido de carbono, el plomo y sobre todo el material particulado que se encuentra en un rango de 2.5 micras el cual es la sustancia más dañina para la salud. Es posible tomar medidas externas a

la circulación vehicular para reducir los contaminantes y evitar la generación de sulfuros, reducir la cantidad de azufre en el combustible, colocar filtros y trampas para mejorar la cantidad de emisiones, pero lamentablemente estas acciones no son obligatorias, además es importante destacar que si bien con el mejoramiento de la tecnología se reducen las emisiones, la demanda de movilización crece constantemente, por lo que estos beneficios no son visibles.

Este estudio considera el efecto de la velocidad, la aceleración y la desaceleración en las emisiones de contaminantes inducidas por el tránsito, dichas emisiones instantáneas se basan en mediciones empíricas y son obtenidas de un modelo microscópico integrado que captura segundo a segundo la velocidad y la aceleración de los vehículos individuales que viajan por la red, tomando en consideración las características de conducción, las especificaciones mecánicas y las interacciones con otros vehículos y el control de tráfico de la red.

### **Pertinencia de desarrollar un nuevo modelo de estimaciones**

Los modelos macroscópicos basados en la velocidad de marcha y recorrido han sido la metodología más utilizada para estimar las emisiones de los vehículos en los últimos años, por ejemplo en Europa la mayoría de los inventarios de emisiones de gases de escape a nivel de la flota o de una ciudad en su conjunto siguen siendo calculados de acuerdo con la metodología COPERT desarrollada a partir del proyecto MEET Europeo, estos modelos implican enormes simplificaciones en la exactitud de los procesos físicos relacionados a las emisiones contaminantes, solo para destacar, esta metodología calcula las emisiones por kilómetro para trayectorias de vehículos utilizando la velocidad media espacial, aunque este parámetro es un factor importante que influye en las emisiones, la fluctuación de velocidad instantánea desempeña un papel más importante ya que para la misma velocidad media, se pueden observar perfiles de velocidad instantánea y aceleración muy diferentes y cada uno de ellos con un consumo de combustible y niveles de emisión muy diferentes. Es importante destacar que para la compilación de inventarios de emisiones de grandes áreas y durante largos períodos de tiempo, este efecto microscópico puede ser ignorado y los resultados de los modelos macroscópicos pueden dar estimaciones razonablemente buenas.

Sin embargo, para evaluaciones en áreas menores y en tiempo real es necesario desarrollar modelos que tengan en cuenta las condiciones de funcionamiento del vehículo y el comportamiento de conducción a más de la correlación entre las emisiones y la velocidad, la aceleración y la interacción con otros vehículos, permitiendo así determinar las emisiones directas de escape.

Hoy en día existen varios modelos que consideran este particular, entre los que destacamos el Modelo de Emisión Modal Integral desarrollado en la Universidad de California 2007, Rakha et al., 2004, Pelkmans et al., 2004; Cornelis et al., 2005.

### **Metodología**

En este trabajo se presenta una metodología para compatibilizar modelos de emisiones instantáneas con modelos de microsimulación de tráfico utilizando el software DRACULA (*Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulation*), plataforma informática muy utilizada en investigación y proyectos de gestión de tránsito. Sin embargo, la metodología es genérica y puede incorporarse a otros modelos que simulan tráfico como lo hizo hace algunos años los desarrolladores de Aimsun.

Se considera la interacción entre la política de transporte, la congestión del tráfico vial, las emisiones de tráfico y la contaminación atmosférica, la metodología propuesta desarrolla un enfoque de un modelo integrado que represente el tráfico y la emisión al mismo nivel de detalle, conecta directamente con los modelos de emisiones las condiciones de tráfico en tiempo real, basadas en la velocidad de circulación instantánea y la aceleración, a través de las cuales se proporcionan estimaciones directas de emisiones de escape.

Hay dos componentes principales en esta metodología: un modelo microscópico de simulación de tráfico y un modelo de emisión microscópica. El primero puede basarse en cualquier modelo de software de micro simulación de tráfico que tenga la capacidad de proporcionar medidas de las condiciones de conducción en tiempo real en términos de velocidad de conducción y aceleración, el segundo es un modelo de emisión desarrollado sobre la base de una gran cantidad de datos de medición que no habían sido previamente analizados para este propósito.

Se analizan los datos de emisiones y se formula un modelo con el objetivo específico de vincularse con los datos que representan la conducción en tiempo real basadas en las condiciones de ciclo de conducción en laboratorio.

### Software de micro simulación DRACULA

El estudio utilizó este software debido a que refleja el comportamiento individual de cada vehículo en la red. Además, es capaz de representar diferentes tipos de intersecciones no semaforizadas, semaforizadas y redondeles, también considera todos los aspectos relacionados al transporte público e incluso puede modelar accidentes generados dentro de la micro simulación, considera además las características propias de los vehículos tipo de vehículo, longitud, aceleración máxima, desaceleración, tiempo de reacción del conductor, aceleración normal, velocidad, riesgo.

El modelo matemático que sirve de algoritmo para realizar las diferentes microsimulaciones se basa en el modelo de GIPS de 1981 que considera la teoría de seguimiento vehicular y de cambio de carril, para la determinación de la velocidad y aceleración entre dos vehículos para las distintas condiciones de tráfico se calculan con las siguientes expresiones:

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2.5a_n^{\max} \tau [1 - v_n(t)] / v_n^{des} [0.025 + v_n(t) / v_n^{des}]^{1/2} \\ c_1 v_n(t) + c_2 v_{n-1}(t) + c_3 [s_n(t) - s_n^{\min}] \\ d_n \tau + [d_n^2 \tau^2 - d_n \{2[s_n(t) - s_n^{\min}] - v_n(t) \tau - v_{n-1}^2(t) / \hat{d}\}]^{1/2} \end{array} \right\} \quad (1.22)$$

$$a_n(t + \tau) = [v_n(t + \tau) - v_n(t)] / \tau \quad (1.23)$$

Donde:

$v_n$ : Velocidad del  $n$ ésimo vehículo

$a_n$ : aceleración del  $n$ ésimo vehículo

$c_1, c_2, c_3$ : coeficientes de calibración

$d_n$ : distancia al  $n$ ésimo vehículo

$\tau$ : tiempo entre vehículo líder y  $n$ ésimo vehículo

Es importante destacar que la plataforma informática Aimsun 8.1 versión *expert*, también incluye dentro de sus algoritmos matemáticos el modelo de GIPS, por lo que la aplicación del modelo desarrollado por Panis et al.

## El nuevo modelo de emisiones propuesto

Se modelaron los siguientes contaminantes NO<sub>x</sub> (Óxidos de Nitrógeno), VOC (Compuestos volátiles orgánicos), CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono) y PM (Material Particulado) se tomaron en consideración por sus efectos adversos para la salud humana y en el caso del CO<sub>2</sub> debido al cambio climático que produce y también porque está directamente ligado con el consumo de combustible. Los factores utilizados para el cálculo fueron obtenidos en base a mediciones de campo en situaciones reales de tráfico basados en el sistema VOEM (*Vito's On-board Emission and Energy Measurement*). Se midieron 25 clases de vehículos entre los cuales tenemos seis buses, dos camiones y doce vehículos livianos con motores a gasolina y cinco con motores diésel. La fórmula para el cálculo de emisiones fue obtenida está en función de la velocidad instantánea y la aceleración usando técnicas de regresión múltiple no lineal. Las predicciones tienen un 95% de confiabilidad.

El modelo matemático que describe esta correlación de variables para redes urbanas se ilustra en la siguiente ecuación:

$$E_n(t) = \max[E_o, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)] \quad (1.24)$$

Donde:

$E_n(t)$ : Emisión del contaminante en el tiempo  $t$

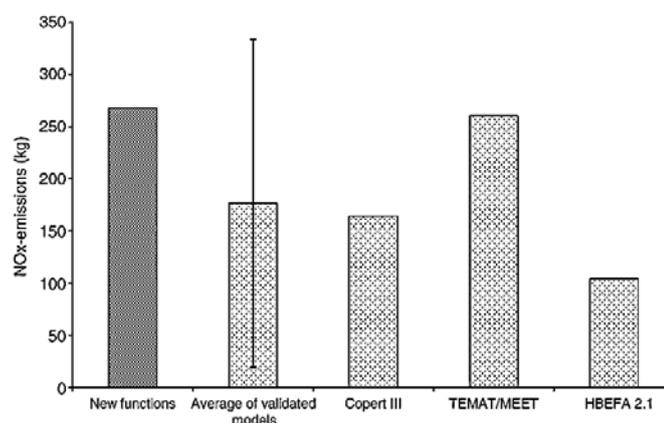
$E_o$ : Emisión inicial

$f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ : factores de calibración del modelo de emisiones

$v_n$ : Velocidad instantánea del  $n$ -ésimo vehículo en el tiempo  $t$

$a_n$ : aceleración del  $n$ -ésimo vehículo  $n$  en el tiempo  $t$

Las variables anteriores son calculadas a partir de las ecuaciones del modelo de GIPS anteriormente descritas. Los resultados obtenidos fueron validados con tres modelos existentes: COOPERT II, HBEFA y MEET, para el período pico de la mañana en el centro urbano de la ciudad de *Ghent*, los resultados muestran que existen grandes diferencias entre los resultados de los dos primeros modelos y resultados muy semejantes en el modelo MEET para NO<sub>x</sub>, pero las emisiones son más altas para CO<sub>2</sub>, PM y VOC.



*Figura 1-8 Emisión CO<sub>2</sub> correlacionada con velocidad y aceleración Fuente: Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits*

### **Control de Velocidades con ISA (Adaptación inteligente de velocidad)**

Si bien el modelo presentado se puede utilizar para evaluar la contaminación a un mediano y largo plazo, es la evaluación de impactos medioambientales con políticas de gestión en tiempo real su verdadera utilidad, ya que permite realizar un análisis que busca mejorar la circulación vehicular y a su vez generar menor cantidad de contaminantes.

ISA es un dispositivo electrónico que permite controlar la velocidad máxima de un vehículo, existen dos modos de operación, regulatorio en el cual los vehículos se ven obligados a conducir con las velocidades máximas establecidas sin poder rebasarlas o voluntario en el cual el conductor es capaz de decidir si desplazase a la velocidad recomendada o superarla. Con esta evaluación se busca conocer los resultados ante una medida de control de velocidad considerando que la mayor parte de los individuos cumplen las disposiciones provistas por los organismos de control. Para la modelación se consideró que se tenían vehículos tanto funcionando con el sistema ISA en regulatorio como en voluntario. Para la modelación se consideró la red de zona densamente poblada de la localidad de *Ghentbrugge*, dentro de la red vial existen vías con límites de velocidad de 70 km/h, 50 km/h, y 30 km/h. Para validar el modelo se realizó una calibración por flujo y velocidad.

## Resultados

La velocidad promedio de toda la red disminuyó en menos de 1 km/h, los efectos son menores en las vías de circulación a más altas velocidades, la desviación estándar se reduce ligeramente.

Al revisar las emisiones generadas en la red el promedio de material particulado disminuyó ligeramente, esto se refleja en los usuarios que simularon el uso de ISA regulatorio, mientras que voluntario mantuvieron la misma cantidad de emisiones, la generación de óxidos de nitrógeno difiere del combustible de los vehículos, se concluye que los motores diésel generan menos contaminantes a bajas velocidades que los motores a gasolina, los compuestos orgánicos volátiles aumentan debido a que se reducen las velocidades de circulación.

Lo más relevante es que los resultados indican que los impactos ambientales de la aplicación de ISA son mucho menores a los esperados. En la siguiente figura se presentan los resultados obtenidos, diferenciando a los conductores que utilizaron ISA regulatorio (Man) y voluntario (Vol).

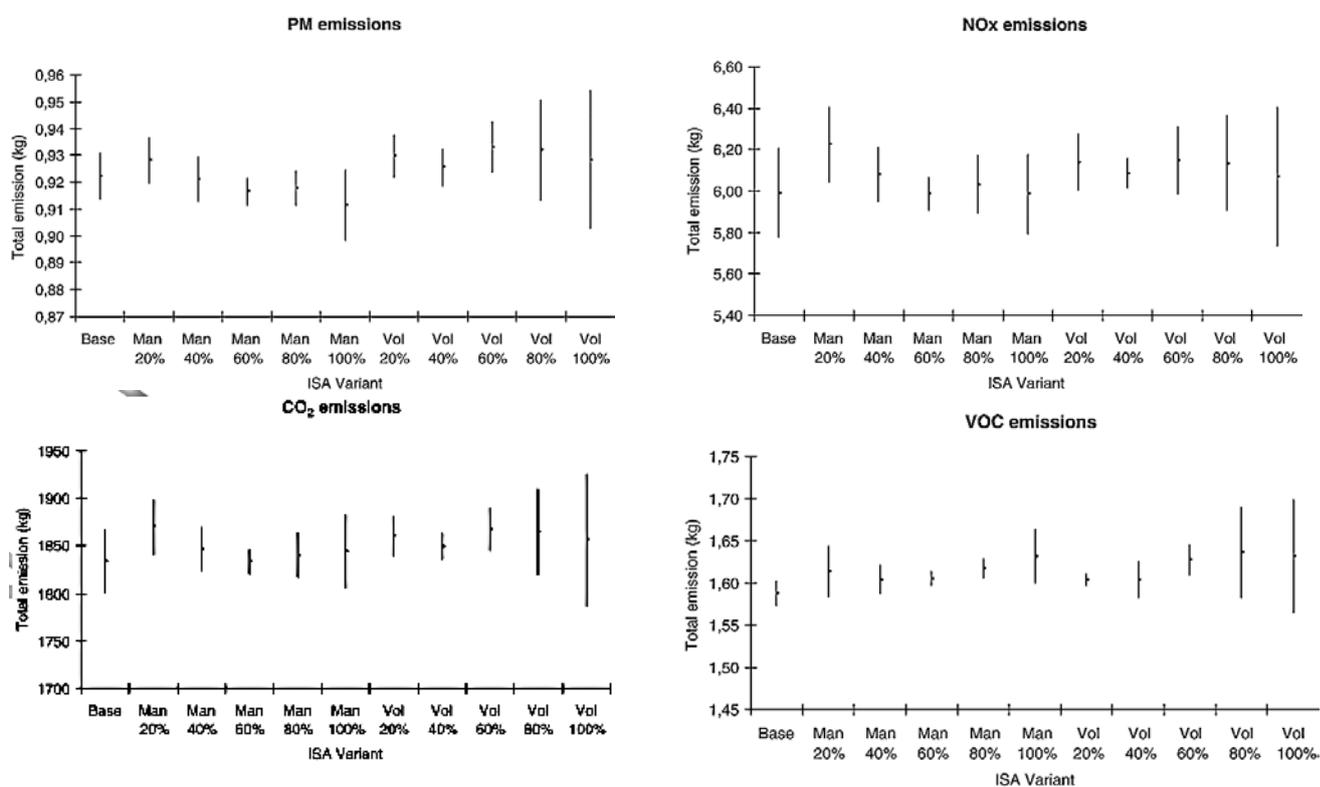


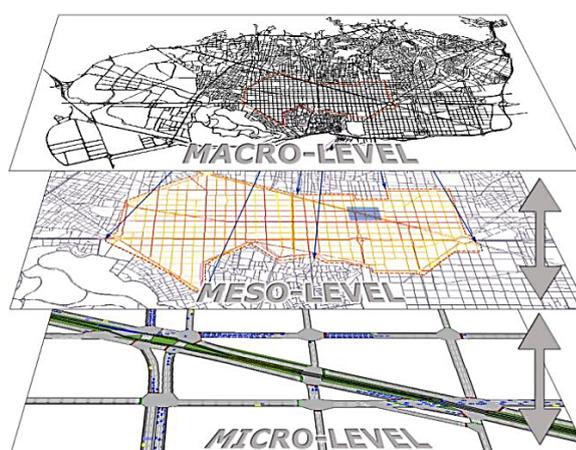
Figura 1-9 Variaciones de emisiones usando ISA

Fuente: Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits

### 1.12. Software de microsimulación Aimsun 8.1 expert

Aimsun es una herramienta informática capaz de integrar en una sola aplicación tres tipos de modelos de transporte: un simulador microscópico, un simulador Mesoscópico y una asignación estática y dinámica de tráfico mediante un simulador macroscópico, además presenta la posibilidad de realizar simulaciones híbridas, es decir microscópicas y mesoscópicas simultáneas, lo que permite simular grandes áreas para luego acercarse en las áreas que requieren un mayor nivel de detalle, su desarrollo ha sido posible gracias a más de 20 años de investigación, a las publicaciones científicas y a la información proveniente de los miles de proyectos realizados por sus usuarios (SIT, 2013).

Una de las funcionalidades más destacadas es su velocidad, se lo considera como el micro simulador más rápido del mercado y de mayor calidad disponible a nivel mundial para proyectos de gran escala, ya sea una gran ciudad o una red de autopistas muy grande y compleja, incluso en un computador portátil. En la siguiente figura se aprecia los niveles de microsimulación que ofrece la herramienta informática.



*Figura 1-10 Niveles de Simulación de Aimsun*

*Fuente: Curso teórico de Aimsun - Sistemas Inteligentes de Transporte*

Las aplicaciones del programa son muy numerosas, pero algunas de las más comunes son:

- Optimización del plan de control de señales de semáforos y evaluación de control adaptativo.
- Evaluación de políticas de velocidad variable y otros sistemas de transporte inteligentes (ITS).

- Análisis del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM).
- Análisis de impacto ambiental.
- Evaluación y optimización de los esquemas de prioridad de señales de tránsito y de sistemas de tránsito rápido de autobuses (BRT).
- Precios de peaje y carretera.
- Evaluación de las estrategias de gestión de la demanda de viajes.

Las microsimulaciones de tránsito son técnicas que proporcionan un banco de pruebas experimentales para evaluar el comportamiento de un área de estudio y comparar los índices operacionales actuales con respecto a los diseños y alternativas de mejoramiento, por lo que sus resultados proporcionan la base para un soporte cuantitativo en la toma de decisiones. De acuerdo con este concepto, el modelo de simulación puede ser visto como un laboratorio informático que sirve para emular una situación que ocurre en la realidad, mediante experimentos estocásticos con el fin de establecer conclusiones que sean válidas para el sistema real, en la cual se analizan diversos escenarios bajo la premisa "¿Qué pasaría si ...?". En otras palabras, suponiendo que la evolución en el tiempo del modelo del sistema imita correctamente la evolución en el tiempo del sistema modelado, las muestras de las variables de observación de interés se recogen utilizando técnicas de análisis estadístico y extrayendo las conclusiones sobre el comportamiento del sistema.

En la dirección web de *Transport Simulation Systems (TSS)*, se encuentran diversos manuales para el uso de la herramienta informática, por lo que se recomienda referirse a ellos al momento de requerir información específica con respecto a la creación de un modelo de microsimulación.

Con el objetivo de aportar con una secuencia de actividades necesarias para la correcta realización de estudios para el establecimiento de emisiones de contaminantes del aire con la aplicación de la herramienta informática Aimsun en su versión *expert 8.1*, a continuación se presenta una metodología que servirá de guía en las fases de: levantamiento de datos de campo, procesamiento de información y microsimulación, para ello se toma en consideración el alcance general establecido dentro de los requisitos de los estudios de impacto sobre la red vial para la ciudad de Cuenca ya que responden a cada caso en particular y está en función del tipo de proyecto a evaluar.

## CAPITULO 2

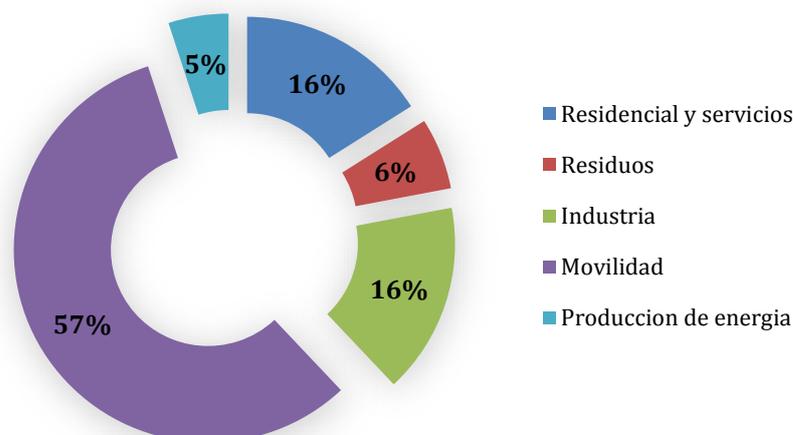
### CONDICIONES OPERACIONALES Y ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL AIRE CASO DE ESTUDIO N° 1 AV. 10 DE AGOSTO DE LA CIUDAD DE CUENCA

En el presente capítulo se establece una línea base de las condiciones operacionales del viario en estudio, se realiza un breve análisis de la calidad del aire de la ciudad de Cuenca y la influencia del tráfico motorizado en la misma, se determina el proceso de levantamiento y procesamiento de información primaria y secundaria, se realiza una descripción del mecanismo de calibración y validación del modelo de microsimulación, se efectúa la estimación de emisiones de contaminantes del aire y se validan los resultados obtenidos con apoyo de una herramienta informática paralela.

#### **2.1 Calidad del aire en Cuenca relacionada a la movilidad**

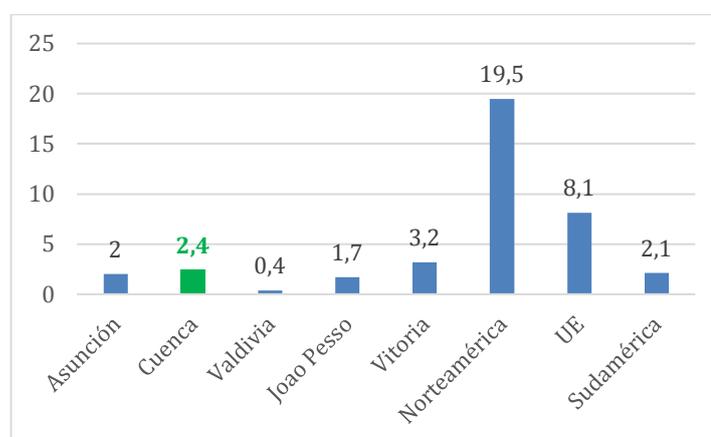
El Cantón Cuenca, es la capital de la provincia del Azuay tiene una población de 505.585 habitantes según el censo poblacional del 2010, el 66% de la población es urbana distribuidas en 15 parroquias y el 34% es rural emplazadas en 21 parroquias, cuya tasa de crecimiento poblacional anual es del 2,1% (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010).

En función a lo establecido en el inventario de emisiones del año 2014 se determinó que se producen 2,42 toneladas de CO<sub>2</sub> per cápita, siendo el principal generador del contaminante el relacionado con la movilidad, del total de gases de efecto invernadero 57% es producido por el transporte, seguido por la industria y las actividades residenciales – servicios cada una con el 16%, los residuos sólidos con el 6% y la producción de energía con el 5%, este indicador ubica a Cuenca en un nivel verde al ser menor a las 5 toneladas anuales per cápita según la metodología ICES, las emisiones de GEI en relación al Producto Interno Bruto que mide la eficiencia de la ciudad en términos de emisiones de carbono, presenta un el valor de 0,11, mismo que es menor del 0,35 que establece ICES como sostenible, por lo que está calificado en indicador verde. (Banco Interamericano de Desarrollo - BID, 2014).



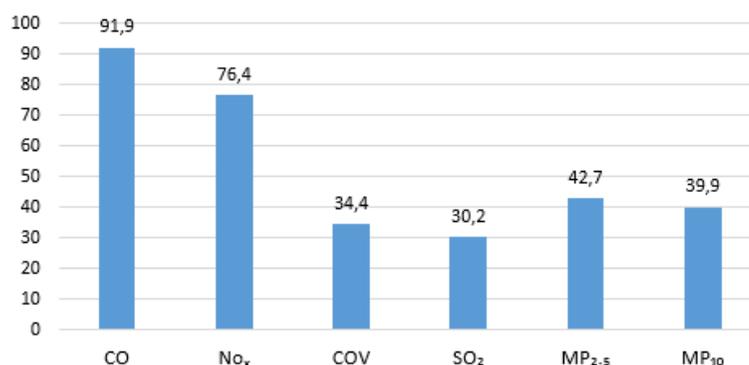
*Figura 2-1 Fuentes de contaminación en la ciudad de Cuenca*  
Fuente: Cuenca ciudad sostenible – BID 2014

En comparación con otras ciudades sudamericanas, norteamericanas y de la Unión Europea, la contaminación de CO<sub>2</sub>, presenta valores muy por debajo de la media, lo cual es sumamente alentador, en la siguiente figura se puede observar lo manifestado.



*Figura 2-2 Emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con ciudades ICES y otras regiones*  
Fuente: Cuenca ciudad sostenible – BID 2014

Si bien es cierto que en CO<sub>2</sub>, la ciudad presenta indicadores favorables, en el resto de contaminantes los resultados no son tan alentadores, y se evidencia que la influencia de la movilidad es sumamente sensible en el grado de contaminación, en la siguiente figura se muestra el porcentaje de participación de la movilidad en la emisión de varios contaminantes. (Empresa de Movilidad de Cuenca - EMOV -EP, 2015).



*Figura 2-3 Porcentaje de contaminación por tráfico vehicular  
Fuente: Informe de calidad de aire Cuenca – 2015*

## 2.2. Antecedentes del área de estudio

### 2.2.1. Definición del area de estudio

El área de estudio de la presente investigación se enfoca en un eje colector importante de la ciudad como lo es la avenida 10 de Agosto en toda su longitud, el viario está localizado en la parroquia Sucre del Cantón Cuenca, existe un total de 34 intersecciones de las cuales 24 son con calles de jerarquía local, 3 son intersecciones rotatorias (redondeles) y 7 son intersecciones semaforicas con vías de igual o superior jerarquía, la extensión total del tramo estudiado es de 4.18 Km por sentido de circulación, para el presente estudio se han tomado en consideración las intersecciones que se detallan en la siguiente tabla.

*Tabla 2-1 Intersecciones del área de estudio*

N°	Intersección
1	Av. 10 de Agosto y Av. Loja
2	Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha
3	Av. 10 de Agosto y Av. Ricardo Muñoz
4	Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero
5	Av. 10 de Agosto y Av. Fray Vicente Solano
6	Av. 10 de Agosto y Av. Roberto Crespo
7	Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso
8	Av. 10 de Agosto y Av. Paucarbamba
9	Av. 10 de Agosto y Calle de las Herrerías
10	Av. 10 de Agosto y Av. del Paraíso

*Fuente: Autor*

En la siguiente figura se ilustra el viario en estudio, identificándose las intersecciones evaluadas.



*Figura 2-4 Intersecciones de área de estudio  
Fuente: Autor a partir de Google Earth*

### **2.3. Levantamiento de información primaria**

La información primaria que se recabó para la realización de la presente investigación está relacionada a los aforos vehiculares de clasificados de tráfico y velocidades operativas.

#### **2.3.1. Aforos direccionales clasificados de tráfico observado**

El levantamiento de información se realizó el día jueves 26 de mayo de 2016 en el periodo comprendido entre las 07H00 – 19H00, participaron aproximadamente 150 estudiantes de los sextos y octavos ciclos de la escuela de Ingeniería Civil y Gerencia en Construcciones de la Universidad del Azuay, dicha actividad fue coordinada y supervisada por el autor del presente documento con el apoyo de dos estudiantes egresadas de la carrera antes mencionada, los formularios para el levantamiento de información fueron los que se detallan en la sección 1.2.1, el periodo en el cual se registró la información fue de 15 minutos. La programación y distribución de los flujos vehiculares, fue realizada por el autor de la presente investigación y el número de aforadores destinados en cada intersección estuvo en función de la intensidad de tráfico analizada en la prueba piloto realizada el día miércoles 25 de mayo de 2016.

### 2.3.2. Velocidades de marcha, recorrido y demoras

El levantamiento de esta información se realizó el día viernes 02 de junio de 2017 y se cumplió con lo establecido en la sección 1.10, se aplicó el método del vehículo flotante apoyado como instrumento de medición una cámara de video con gps, acelerómetro y altímetro incorporado “*modelo Virb Elite del fabricante Garmin*”, la determinación del tamaño de la muestra se basó en la metodología planteada y se observa en la siguiente tabla (4 recorridos), los formatos para el levantamiento de información fueron los descritos en secciones anteriores.

Tabla 2-2 Determinación del número de recorridos

**TAMAÑO MUESTRAL EN RECORRIDOS PARA MEDICION DE VELOCIDADES Y DEMORAS**

	Velocidades Km/h	Diferencias	Media de Velocidades	Rango medio de velocidades (R)	Numero minimo del Muestreo para el error especificado				
					+/- 2,0 Km/h	+/- 3,5 Km/h	+/- 5,0 Km/h	+/- 6,5 Km/h	+/- 8,0 Km/h
RECORRIDO 1	31,75	4,08	2,66	5	4	3	2	2	2
RECORRIDO 2	35,83			10	8	4	3	3	2
RECORRIDO 3	37,07	1,24		15	14	7	5	3	3
RECORRIDO 4	36,45	0,62		20	21	9	6	5	4
				25	28	13	8	6	5
				30	38	16	10	7	6

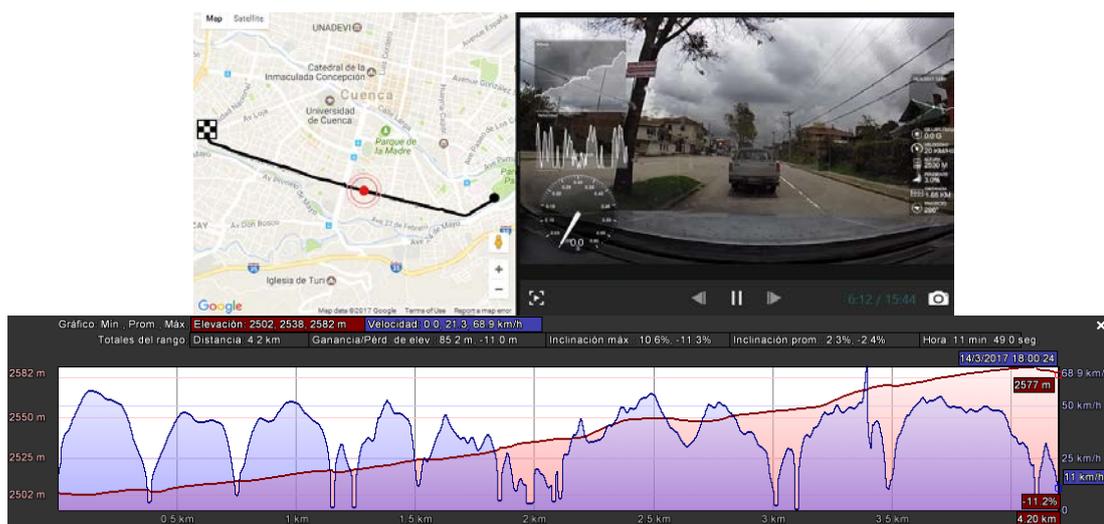
N =	Numero de recorridos
	4
S =	Sumatoria de valores
	5,94
R =	$\frac{S}{N-1}$
	1,98

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

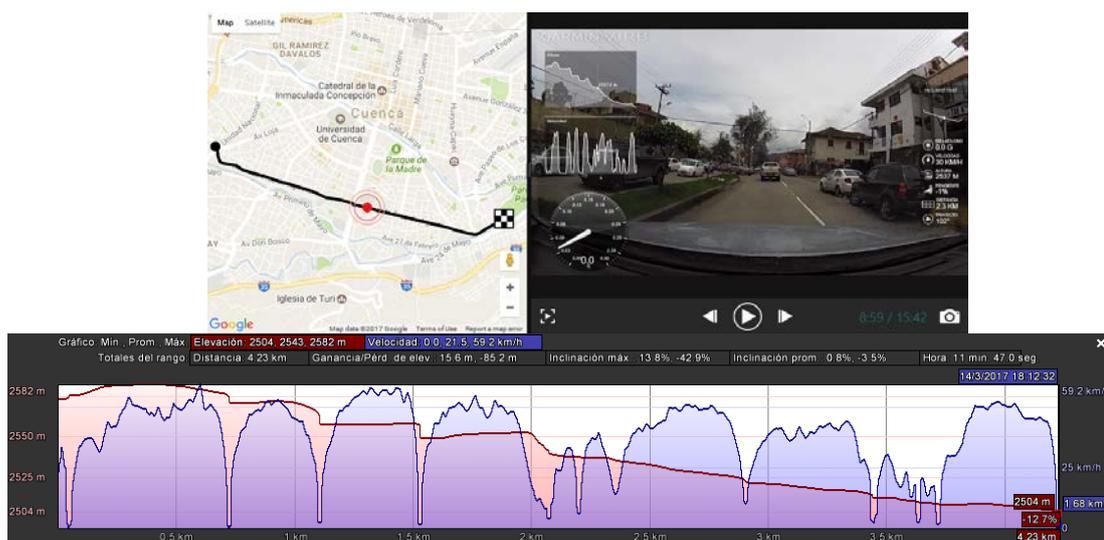
*Fuente: Autor*

En las siguientes figuras se evidencia el uso de la cámara Virb Elite de Garmin para la determinación de velocidades de marcha y de recorrido en cada tramo de la vía de estudio por sentido de circulación, como apoyo al método del vehículo flotante.

A partir de la información generada por el equipo de medición se estableció un track geo referenciado que permitió ligar el perfil longitudinal de la vía con el histograma de variación de velocidades a lo largo del recorrido, en esta información sirve para determinar en cuales tramos se detuvo el vehículo de prueba, esta superposición de perfiles se realizó cargando la información en la plataforma informática *Google Earth*.



*Figura 2-5 Velocidades de marcha y de recorrido por este - oeste*  
 Fuente: Autor a partir de Virb Edit de Garmin y Google Earth



*Figura 2-6 Velocidades de marcha y de recorrido por oeste – este*  
 Fuente: Autor a partir de Virb Edit de Garmin y Google Earth

Luego de procesar la información se determina la velocidad media de cada ruta, así como también su velocidad máxima y mínima información sumamente útil al momento de realizar una modelación de microsimulación de tránsito, en la tabla que a continuación se detalla se muestran los resultados calculados.

Tabla 2-3 Velocidades de marcha y recorrido

## Consolidado de Recorridos Ruta 1

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 1 P. Paraiso-De las Herrerías	E-O	1	437	55	9	46	28.60	25.74	28.87	27.32	34.20	31.50	38.61	34.61
	E-O	2	429	60	20	40	25.74				38.61			
	E-O	3	420	58	10	48	26.07				31.50			
	E-O	4	417	52	8	44	28.87				34.12			

## Consolidado de Recorridos Ruta 2

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 2 De las Herrerías- 27 de Febrero	E-O	1	307	55	33	22	20.09	20.09	22.46	21.25	50.24	44.64	56.52	50.61
	E-O	2	314	51	31	20	22.16				56.52			
	E-O	3	312	50	28	22	22.46				51.05			
	E-O	4	310	55	30	25	20.29				44.64			

## Consolidado de Recorridos Ruta 3

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 3 27 de Febrero- Francisco Moscoso	E-O	1	496	125	68	57	14.28	14.28	16.04	14.76	31.33	25.20	31.33	27.00
	E-O	2	480	120	52	68	14.40				25.41			
	E-O	3	485	122	55	67	14.31				26.06			
	E-O	4	490	110	40	70	16.04				25.20			

## Consolidado de Recorridos Ruta 4

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 4 Francisco Moscoso- Roberto Crespo	E-O	1	220	46.2	0	46.2	17.14	17.14	23.08	19.62	17.14	17.14	23.08	20.27
	E-O	2	300	46.8	0	46.8	23.08				23.08			
	E-O	3	225	42	5	37	19.29				21.89			
	E-O	4	232	44	0	44	18.98				18.98			

## Consolidado de Recorridos Ruta 5

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 5 Roberto Crespo Toral-Av. Solano	E-O	1	540	132.6	34.2	98.4	14.66	5.94	14.66	10.76	19.76	13.45	35.63	21.89
	E-O	2	570	345.6	288	57.6	5.94				35.63			
	E-O	3	550	232.4	85.2	147.2	8.52				13.45			
	E-O	4	562	145.6	37.6	108	13.90				18.73			

## Consolidado de Recorridos Ruta 6

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 6 Av. Solano- Ricardo Muñoz	E-O	1	990	130	96	34	27.42	27.42	29.76	28.34	104.82	78.72	104.82	89.82
	E-O	2	984	125	80	45	28.34				78.72			
	E-O	3	982	127	85	42	27.84				84.17			
	E-O	4	992	120	81	39	29.76				91.57			

## Consolidado de Recorridos Ruta 7

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 7 Ricardo Muñoz- Pichincha	E-O	1	393	43.8	0	43.8	32.30	32.30	35.08	33.89	32.30	32.30	35.08	33.89
	E-O	2	391	42	0	42	33.51				33.51			
	E-O	3	385	40	0	40	34.65				34.65			
	E-O	4	380	39	0	39	35.08				35.08			

## Consolidado de Recorridos Ruta 8

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 8 Pichincha- Loja	E-O	1	686	66.6	0	66.6	37.08	37.08	41.88	39.82	37.08	37.08	41.88	39.82
	E-O	2	719	61.8	0	61.8	41.88				41.88			
	E-O	3	700	64	0	64	39.38				39.38			
	E-O	4	705	62	0	62	40.94				40.94			

## Consolidado de Recorridos Ruta 9

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 9 Loja- Pichincha	O-E	1	1335	119.4	60.6	58.8	40.25	37.79	40.5	39.62	81.73	71.84	82.19	78.54
	O-E	2	1329	126.6	60	66.6	37.79				71.84			
	O-E	3	1333	120.2	59	61.2	39.92				78.41			
	O-E	4	1331	118.3	60	58.3	40.50				82.19			

## Consolidado de Recorridos Ruta 10

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 10 Pichincha-Ricardo Muñoz	O-E	1	770	58.8	14.4	44.4	47.14	47.14	49.13	48.16	62.43	49.26	62.43	56.42
	O-E	2	786	57.6	6	51.6	49.13							
	O-E	3	780	59	2	57	47.59							
	O-E	4	772	57	10	47	48.76							

## Consolidado de Recorridos Ruta 11

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 11 Ricardo Muñoz-Av. Solano	O-E	1	991	100	30	70	35.68	35.68	39.31	37.53	50.97	50.97	55.16	53.15
	O-E	2	950	87	25	62	39.31							
	O-E	3	970	95	27	68	36.76							
	O-E	4	980	92	28	64	38.35							

## Consolidado de Recorridos Ruta 12

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 12 Av. Solano-Roberto Crespo Total	O-E	1	640	42	0	42	54.86	32.40	54.86	44.69	54.86	32.40	54.86	44.69
	O-E	2	540	60	0	60	32.40							
	O-E	3	600	45	0	45	48.00							
	O-E	4	580	48	0	48	43.50							

## Consolidado de Recorridos Ruta 13

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 13 Roberto Crespo Toral-Francisco	O-E	1	310	39.8	0	39.8	28.04	22.41	28.04	24.28	28.04	22.41	28.04	24.28
	O-E	2	310	49.8	0	49.8	22.41				22.41			
	O-E	3	300	45	0	45	24.00				24.00			
	O-E	4	302	48	0	48	22.65				22.65			

## Consolidado de Recorridos Ruta 14

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 14 Francisco Moscoso-27 de Febrero	O-E	1	510	94.8	0	94.8	19.37	18.94	19.37	19.24	19.37	18.94	19.37	19.24
	O-E	2	500	93.2	0	93.2	19.31				19.31			
	O-E	3	502	95.4	0	95.4	18.94				18.94			
	O-E	4	510	95	0	95	19.33				19.33			

## Consolidado de Recorridos Ruta 15

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 15 27 de Febrero-De las Herrerías	O-E	1	720.5	94.8	46.2	48.6	27.36	26.63	28.6	27.60	53.37	42.90	53.37	47.02
	O-E	2	715	90	30	60	28.60				42.90			
	O-E	3	718	93	37	56	27.79				46.16			
	O-E	4	710	96	40	56	26.63				45.64			

## Consolidado de Recorridos Ruta 16

RUTA	SENTIDO	NÚMERO DE RECORRIDO	LONGITUD DE RECORRIDO	TOTAL TIEMPO DE VIAJE Seg	TOTAL DEMORA Seg	TOTAL DE VIAJE SIN DEMORA Seg	VELOCIDAD DE RECORRIDO km/h (incluye demoras)	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÍNIMA	VELOCIDAD DE RECORRIDO MÁXIMA	PROMEDIO Velocidad de recorrido	VELOCIDAD DE MARCHA km/h (sin demoras)	VELOCIDAD DE MARCHA MÍNIMO	VELOCIDAD DE MARCHA MÁXIMO	PROMEDIO Velocidad de Marcha
Ruta 16 De las Herrerías-P. Paraiso	O-E	1	423	52.8	7.2	45.6	28.84	28.84	37.16	32.51	33.39	33.26	37.16	34.47
	O-E	2	420	44.4	0	44.4	34.05				34.05			
	O-E	3	415	40.2	0	40.2	37.16				37.16			
	O-E	4	425	51	5	46	30.00				33.26			

Fuente: Autor

### 2.3.3. Velocidades instantáneas

De manera simultánea a las velocidades de marcha y de recorrido, el día viernes 02 de junio de 2017 desde las 07H00 hasta el sábado 03 de junio de 2017 a las 07H00 , se realizó el levantamiento de información con apoyo de un contador automático de tipo neumático picocount 4500, el punto de aforo escogido fue en las coordenadas Norte= 9678298.63 , Este= 720500.56, debido a que los vehículos despejan la intersección con la Av. Ricardo Muñoz en el sentido oeste – este y desarrollan una velocidad representativa del viario, en la siguiente figura se detalla la ubicación de la estación de aforo automático.



*Figura 2-7 Ubicación de la estación de aforo automático  
Fuente: Autor a partir de Google Earth*

Los equipos se programaron para que registren los aforos y determinen las velocidades desde las 07H00 por un lapso de 24 horas, en las siguientes figuras se evidencia el proceso de instalación y calibración de los equipos, esto se realiza con ayuda de un medidor de impulsos modelo *Countbuddy II*, que evalúa el paso de los ejes de los vehículos sobre las mangueras neumáticas, su proximidad de repetición entre ejes y la exactitud en el número de repeticiones.

Es importante destacar que la tensión que tiene que mantenerse en las mangueras neumáticas es fundamental para el óptimo registro de la información, además el punto de registro de información debe ubicarse de tal manera que las velocidades de circulación de los vehículos sean superiores a los 20 Km/hora.



Figura 2-8 Ubicación de la estación de aforo automático  
Fuente: Autor

Una vez procesada la información con soporte del *software Traffic Viewer Pro Beta*, los resultados se muestran en las siguientes tablas y figuras.

Tabla 2-4 Variación horaria de los aforos automáticos clasificados

Hora	Dos Ruedas	Liviano	Bus	C2	C3	C4	C5 o Superior	Total
07:00 - 07:59	2	696	1	22	3	2	9	735
08:00 - 08:59	1	727	5	13	3	6	5	760
09:00 - 09:59	0	647	2	20	4	7	7	687
10:00 - 10:59	0	609	9	26	5	4	9	662
11:00 - 11:59	4	557	2	13	2	4	5	587
12:00 - 12:59	4	626	2	21	4	0	8	665
13:00 - 13:59	1	546	1	15	6	1	11	581
14:00 - 14:59	2	637	4	13	4	4	7	671
15:00 - 15:59	3	746	3	15	6	7	7	787
16:00 - 16:59	1	662	1	16	3	0	5	688
17:00 - 17:59	3	695	0	16	5	1	4	724
18:00 - 18:59	0	728	3	11	3	5	6	756
19:00 - 19:59	1	662	1	10	4	1	7	686
20:00 - 20:59	1	496	0	6	2	3	2	510

21:00 - 21:59	1	431	0	2	3	2	1	440
22:00 - 22:59	0	300	0	2	0	1	1	304
23:00 - 23:59	0	238	1	1	1	0	0	241
00:00 - 00:59	0	167	0	3	0	0	0	170
01:00 - 01:59	1	156	0	0	0	0	0	157
02:00 - 02:59	0	109	0	0	0	0	0	109
03:00 - 03:59	0	68	0	1	0	0	0	69
04:00 - 04:59	0	53	0	1	0	0	0	54
05:00 - 05:59	0	94	0	6	1	0	0	101
06:00 - 06:59	0	167	0	22	0	0	1	190
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>10817</b>	<b>35</b>	<b>255</b>	<b>59</b>	<b>48</b>	<b>95</b>	<b>11334</b>

Fuente: Autor a partir de Traffic Viewer Pro Beta

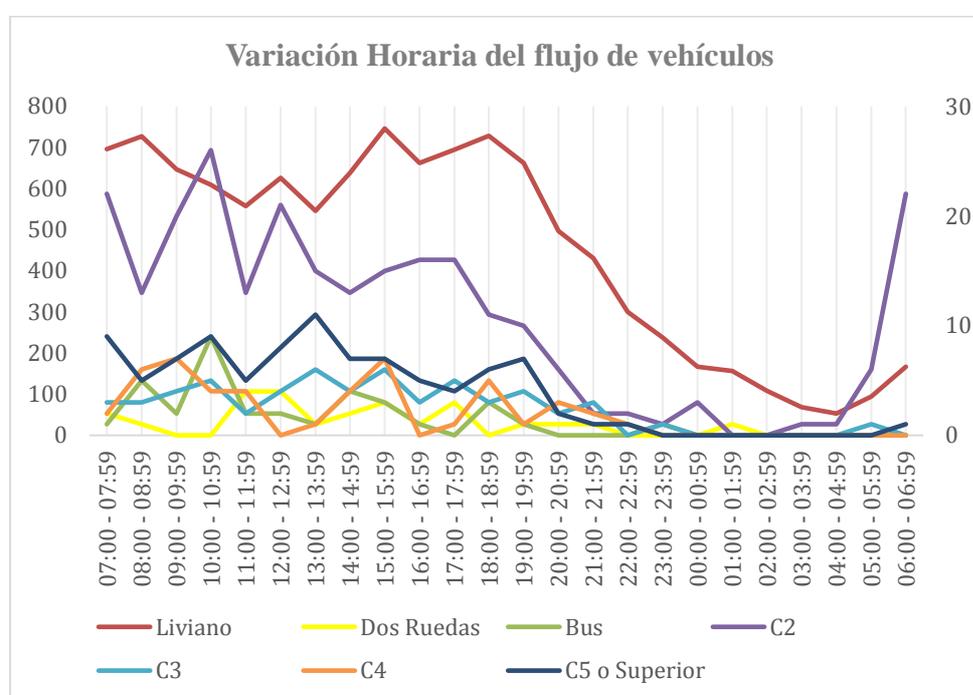


Figura 2-9 Variación horaria de flujos vehiculares clasificados

Fuente: Autor a partir de Traffic Viewer Pro Beta

Se evidencia claramente un predominio del flujo perteneciente a los vehículos livianos, seguido por los camiones de dos ejes, los vehículos de dos ruedas son los que menor porcentaje de participación tienen, es importante destacar que estos valores corresponden a los aforos realizados en un punto específico del viario.

En la siguiente tabla se observa los datos correspondientes a la hora de máxima demanda de toda la red en estudio, que corresponde al periodo entre las 12H30 – 13H30.

*Tabla 2-5 Variación aforos automáticos clasificados en HMD*

Hora	Dos Ruedas	Liviano	Bus	C2	C3	C4	C5 o Superior	Total
12:30 - 12:45	0	148	1	5	0	0	3	157
12:45 - 13:00	1	142	1	4	2	0	0	150
13:00 - 13:15	0	131	1	3	1	0	4	140
13:15 - 13:30	1	137	0	4	1	0	2	145
<b>Total</b>	2	558	3	16	4	0	9	592

*Fuente: Autor a partir de Traffic Viewer Pro Beta*

Con respecto a las velocidades instantáneas, las siguientes figuras y tablas muestran la variación horaria en distribución de frecuencias para rangos de velocidades, se observa claramente que el mayor número de vehículos circulan en el rango de los 40 a los 50 Km/h, que es el máximo permitido para una vía de las características en estudio.

*Tabla 2-6 Variación horaria intervalo de frecuencias de velocidades instantáneas*

Hora	05-29 KPH	30-39 KPH	40-49 KPH	50-59 KPH	60-89 KPH	Total
07:00 - 07:59	7	154	468	95	11	735
08:00 - 08:59	12	154	463	121	10	760
09:00 - 09:59	13	161	439	69	5	687
10:00 - 10:59	14	191	384	70	3	662
11:00 - 11:59	23	230	281	52	1	587
12:00 - 12:59	57	208	330	66	4	665
13:00 - 13:59	8	188	322	58	5	581
14:00 - 14:59	29	229	350	61	2	671
15:00 - 15:59	30	305	408	36	8	787
16:00 - 16:59	13	224	385	65	1	688
17:00 - 17:59	14	222	419	64	5	724
18:00 - 18:59	15	315	376	50	0	756
19:00 - 19:59	7	230	380	64	5	686
20:00 - 20:59	7	189	267	44	3	510
21:00 - 21:59	7	132	249	48	4	440
22:00 - 22:59	4	98	157	38	7	304
23:00 - 23:59	7	84	117	31	2	241
00:00 - 00:59	1	59	91	15	4	170

01:00 - 01:59	5	31	102	16	3	157
02:00 - 02:59	2	31	65	9	2	109
03:00 - 03:59	2	17	34	15	1	69
04:00 - 04:59	1	11	33	8	1	54
05:00 - 05:59	6	12	59	17	7	101
06:00 - 06:59	6	51	107	22	4	190
<b>Total</b>	290	3526	6286	1134	98	11334

Fuente: Autor a partir de Traffic Viewer Pro Beta

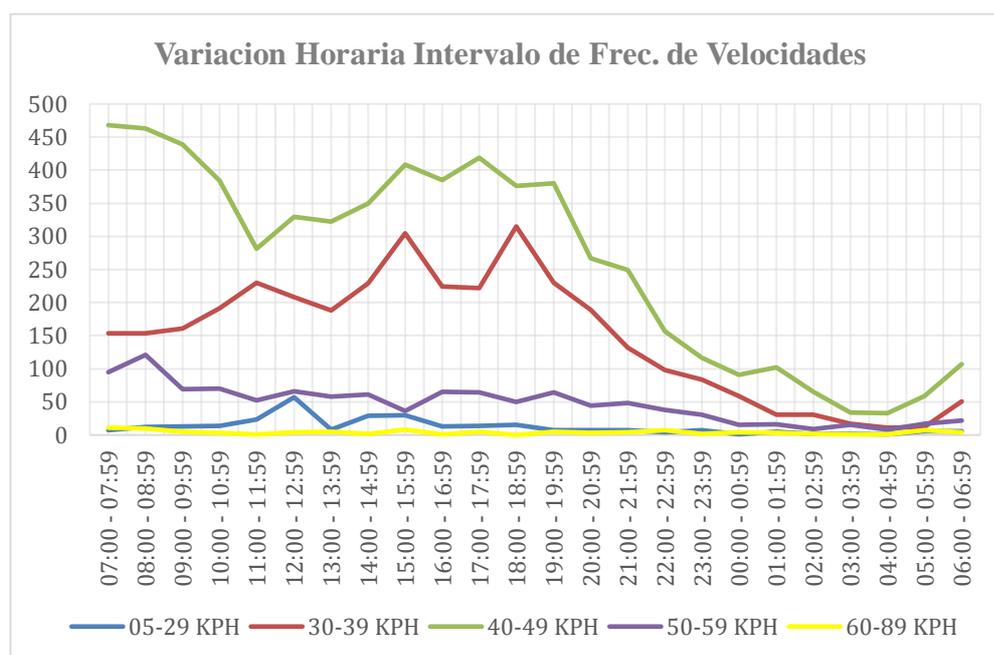


Figura 2-10 Variación horaria de intervalo de frecuencias velocidades instantánea

Fuente: Autor a partir de Traffic Viewer Pro Beta

Para finalizar, en la siguiente tabla se ilustra la variación del intervalo de frecuencias de velocidades instantáneas en la hora de máxima demanda de la red, la cual es fundamental para la calibración y validación del modelo de microsimulación.

Tabla 2-7 Intervalo de frecuencias de velocidades instantáneas en HDM

Hora	05-29 Km/h	30-39 Km/h	40-49 Km/h	50-59 Km/h	60-89 Km/h	Total
12:30 - 12:45	19	44	73	18	3	157
12:45 - 13:00	3	40	88	19	0	150
13:00 - 13:15	2	38	83	17	0	140
13:15 - 13:30	3	49	77	15	1	145
<b>Total</b>	27	171	321	69	4	592

Fuente: Autor a partir de Traffic Viewer Pro Beta

### 2.3.4. Aforos vehiculares direccionales en intersecciones

El levantamiento del tráfico observado de cada una de las 10 intersecciones que conforman el viario en estudio se realizó con el apoyo logístico de los estudiantes de pregrado de la institución antes mencionada, el procesamiento se realizó usando hojas electrónicas de Excel predefinidas por el autor donde se calculan los principales parámetros de ingeniería de tránsito como el TPDA, la hora de máxima demanda de cada acceso y de la intersección en general, el factor de la hora de máxima demanda, las variaciones horarias, flujos de entrada y salida, etc. Al ser una información sumamente extensa no se la incluye en el desarrollo del presente capítulo, pero el lector la podrá encontrar en los Anexos del documento, al igual que el consumo de combustible y el conteo automático de tráfico 24 horas – 7 días. A continuación se presentan un breve resumen de los principales parámetros operacionales de cada intersección, correspondientes a la hora de máxima demanda, tanto de la intersección como de toda la red en estudio.

#### 2.3.4.1. Intersección 1: Av. 10 de Agosto y Av. Loja

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 34917 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan tres accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.

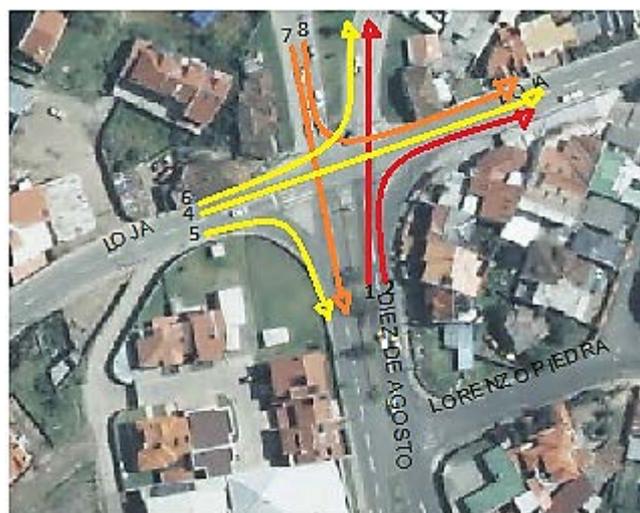


Figura 2-11 Esquema de flujos en intersección 1  
Fuente: Autor a partir de Google Earth

### Horas de máximo movimiento en toda la intersección.

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

Tabla 2-8 Hora Máximo Movimiento de la intersección 1

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h30-8h30	3375	10%
TARDE	13h00-14h00	3289	9%

*Fuente: Autor*

De acuerdo a los resultados, se indican que las horas de máximo movimiento en la intersección se han dado desde las 7h30 hasta las 8h30 ya que este horario es el de entrada de centros educativos e inicio de la jornada laboral. El periodo de máximo movimiento de la tarde se da desde las 13h00 hasta las 14h00 con un total de 3289 vehículos.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 90%, le siguen los de dos ruedas con el 4%, luego los buses y camiones livianos con el 2% respectivamente y finalmente el camión liviano con el 1%.

Tabla 2-9 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 1

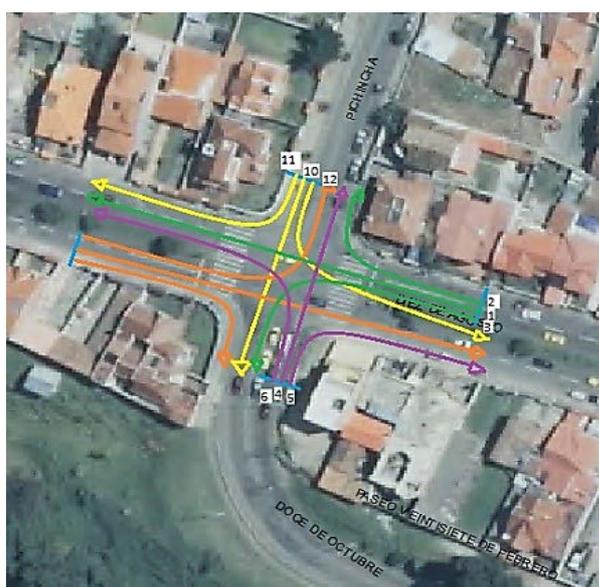
HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos Rueda
12h30-12h45	684	11	10	4	5	0	31
12h45-13h00	665	21	15	15	5	0	16
13h00-13h15	775	18	21	8	0	0	45
13h15-13h30	711	18	8	8	4	0	40
<b>TOTAL</b>	<b>2835</b>	<b>68</b>	<b>54</b>	<b>34</b>	<b>14</b>	<b>0</b>	<b>133</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	2835	90%
Buses	68	2%
Camión Liviano	54	2%
Camión Mediano	34	1%
Camión Pesado	14	0%
Trailer	0	0%
Dos Rueda	133	4%
<b>TOTAL</b>	<b>3136</b>	<b>100%</b>

*Fuente: Autor*

### 2.3.4.2. Intersección 2: Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 33276 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.



*Figura 2-12 Esquema de flujos en intersección 2*  
*Fuente: Autor a partir de Google Earth*

#### **Horas de máximo movimiento en toda la intersección.**

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

Tabla 2-10 Hora Máximo Movimiento de la intersección 2

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Acceso)	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h00-8h00	3091	9%	9%
TARDE	17h45-18h45	3255	10%	10%

Fuente: Autor

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 17h45 hasta las 18h45 con 3255 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 3091 vehículos desde las 7h00 hasta las 8h00.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 88%, es decir 2625 vehículos, le siguen los de dos ruedas con el 5%, luego los buses con el 4%, camión mediano con el 2% y finalmente el camión liviano con el 1%.

Tabla 2-11 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 2

HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos Rueda
12h30-12h45	565	28	8	4	0	0	41
12h45-13h00	671	36	3	22	0	0	41
13h00-13h15	718	29	13	18	0	0	46
13h15-13h30	671	24	7	11	6	0	18
<b>TOTAL</b>	<b>2625</b>	<b>118</b>	<b>31</b>	<b>56</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>146</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	2625	88%
Buses	117	4%
Camión Liviano	31	1%
Camión Mediano	55	2%
Camión Pesado	0	0%
Trailer	0	0%
Dos Rueda	146	5%
<b>TOTAL</b>	<b>2974</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

### 2.3.4.3. Intersección 3: Av. 10 de Agosto y Av. Ricardo Muñoz Dávila

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 37638 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.

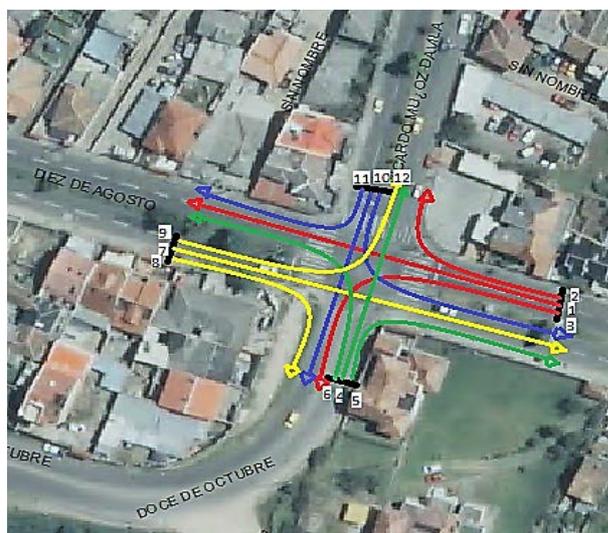


Figura 2-13 Esquema de flujos en intersección 3  
Fuente: Autor a partir de Google Earth

#### Horas de máximo movimiento en toda la intersección.

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

Tabla 2-12 Hora Máximo Movimiento de la intersección 3

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Intersección)	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h00-8h00	3628	10%	5%
TARDE	18h00-19h00	3656	10%	5%

Fuente: Autor

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 18h00 hasta las 19h00 con 3656 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 3628 vehículos desde las 7h00 hasta las 8h00.

#### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 91%, le siguen los de dos ruedas con el

4%, camiones livianos con el 3% y finalmente el camión mediano y buses con el 1% respectivamente.

*Tabla 2-13 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 3*

HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos Rueda
12h30-12h45	576	4	23	3	0	0	27
12h45-13h00	608	6	26	4	1	0	20
13h00-13h15	596	7	14	7	8	0	22
13h15-13h30	588	5	16	11	1	0	34
<b>TOTAL</b>	<b>2368</b>	<b>22</b>	<b>79</b>	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>103</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	2368	91%
Buses	22	1%
Camión Liviano	79	3%
Camión Mediano	25	1%
Camión Pesado	10	0%
Trailer	0	0%
Dos Rueda	103	4%
<b>TOTAL</b>	<b>2607</b>	<b>100%</b>

*Fuente: Autor*

#### 2.3.4.4. Intersección 4: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 28218 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.



*Figura 2-14 Esquema de flujos en intersección 4*

*Fuente: Autor a partir de Google Earth*

### Horas de máximo movimiento en toda la intersección.

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

Tabla 2-14 Hora Máximo Movimiento de la intersección 4

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Acceso)	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h00-8h00	2534	9%	9%
TARDE	12h45-13h45	3020	11%	11%

Fuente: Autor

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 12h45 hasta las 13h45 con 3020 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 2534 vehículos desde las 7h00 hasta las 8h00.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 94%, le siguen los de dos ruedas con el 4%, camiones livianos y buses con el 1% respectivamente.

Tabla 2-15 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 4

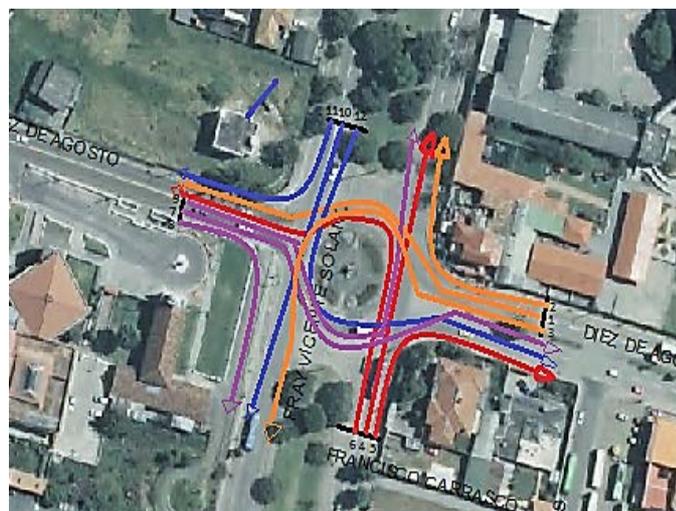
HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camion Liviano	Camion Mediano	Camion Pesado	Trailer	2 Ruedas
12h15-12h30	566	6	10	1	0	0	21
12h30-12h45	608	4	12	0	1	0	23
12h45-13h00	639	4	4	0	0	0	31
13h00-13h15	798	6	3	10	0	0	34
<b>TOTAL</b>	<b>2611</b>	<b>21</b>	<b>29</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>109</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	2611	94%
Buses	21	1%
Camion Liviano	29	1%
Camion Mediano	12	0%
Camion Pesado	1	0%
Trailer	0	0%
2 Ruedas	109	4%
<b>TOTAL</b>	<b>2783</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

### 2.3.4.5. Intersección 5: Av. 10 de Agosto y Av. Fray Vicente Solano

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 53909 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.



*Figura 2-15 Esquema de flujos en intersección 5*  
*Fuente: Autor a partir de Google Earth*

#### **Horas de máximo movimiento en toda la intersección.**

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

*Tabla 2-16 Hora Máximo Movimiento de la intersección 5*

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Acceso)	% TPDA (Intersección)
MANANA	11h45-12h45	4490	8%	8%
TARDE	17h15-18h15	5097	9%	9%

*Fuente: Autor*

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 17h15 hasta las 18h15 con 5097 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 4490 vehículos desde las 11h45 hasta las 12h45.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 91%, le siguen los buses con el 4%, luego los de dos ruedas con el 3%, finalmente el camión liviano y camión mediano con el 1% respectivamente.

Tabla 2-17 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 5

HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos Rueda
12h30-12h45	407	20	7	0	0	0	12
12h45-13h00	412	15	5	2	0	0	24
13h00-13h15	427	14	6	5	1	0	10
13h15-13h30	474	22	4	3	1	0	13
<b>TOTAL</b>	<b>1720</b>	<b>70</b>	<b>21</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>58</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	1720	91%
Buses	70	4%
Camión Liviano	21	1%
Camión Mediano	10	1%
Camión Pesado	3	0%
Trailer	0	0%
Dos Rueda	58	3%
<b>TOTAL</b>	<b>1882</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

#### 2.3.4.6. Intersección 6: Av. 10 de Agosto y Av. Roberto Crespo Toral

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual "TPDA" de 32040 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.

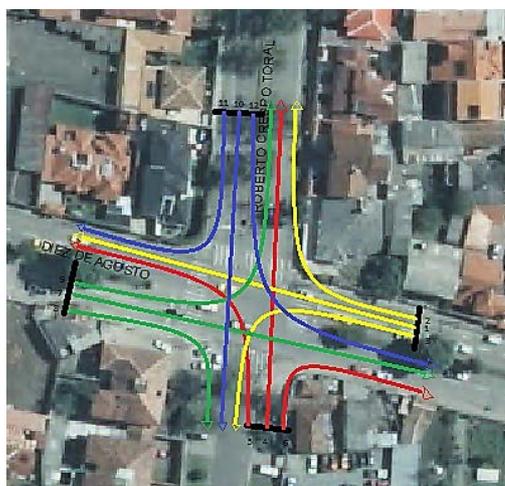


Figura 2-16 Esquema de flujos en intersección 6

Fuente: Autor a partir de Google Earth

### Horas de máximo movimiento en toda la intersección.

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

Tabla 2-18 Hora Máximo Movimiento de la intersección 6

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Acceso)	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h45-8h45	2933	9%	9%
TARDE	17h45-18h45	2985	9%	9%

Fuente: Autor

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 17h45 hasta las 18h45 con 2985 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 2933 vehículos desde las 07h45 hasta las 08h45.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 95%, le siguen los de dos ruedas con el 2%, luego los buses y camiones livianos con el 1%.

Tabla 2-19 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 6

HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos Rueda
12h30-12h45	644	14	5	3	1	0	14
12h45-13h00	632	5	6	5	3	0	24
13h00-13h15	786	10	5	1	3	0	16
13h15-13h30	666	14	8	4	5	0	6
<b>TOTAL</b>	<b>2728</b>	<b>43</b>	<b>24</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>60</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	2728	95%
Buses	43	1%
Camión Liviano	24	1%
Camión Mediano	13	0%
Camión Pesado	11	0%
Trailer	0	0%
Dos Rueda	60	2%
<b>TOTAL</b>	<b>2878</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

### 2.3.4.7. Intersección 7: Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 28496 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.



*Figura 2-17 Esquema de flujos en intersección 7*  
*Fuente: Autor a partir de Google Earth*

#### **Horas de máximo movimiento en toda la intersección.**

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

*Tabla 2-20 Hora Máximo Movimiento de la intersección 7*

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Acceso)	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h45-8h45	2605	9%	9%
TARDE	17h45-18h45	2696	9%	9%

*Fuente: Autor*

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 17h45 hasta las 18h45 con 2696 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 2605 vehículos desde las 07h45 hasta las 08h45.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 93%, le siguen los de dos ruedas con el 3%, luego los buses con el 2% y finalmente el camión liviano con el 1%.

Tabla 2-21 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 7

HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos ruedas
12h30-12h45	529	13	12	0	1	0	23
12h45-13h00	621	17	8	1	3	0	19
13h00-13h15	553	16	5	0	0	0	26
13h15-13h30	686	16	10	0	4	0	10
<b>TOTAL</b>	<b>2389</b>	<b>62</b>	<b>35</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>78</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	2389	93%
Buses	62	2%
Camión Liviano	35	1%
Camión Mediano	1	0%
Camión Pesado	8	0%
Trailer	0	0%
Dos ruedas	78	3%
<b>TOTAL</b>	<b>2574</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

#### 2.3.4.8. Intersección 8: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual "TPDA" de 36926 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.



Figura 2-18 Esquema de flujos en intersección 8

Fuente: Autor a partir de Google Earth

### Horas de máximo movimiento en toda la intersección.

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

Tabla 2-22 Hora Máximo Movimiento de la intersección 8

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h00-8h00	3215	9%
TARDE	12h30-13h30	3490	9%

Fuente: Autor

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 12h30 hasta las 13h30 con 3490 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 3215 vehículos desde las 07h00 hasta las 08h00.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 91%, le siguen los de dos ruedas con el 4%, luego los buses con el 3% y finalmente el camión liviano con el 2%.

Tabla 2-23 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 8

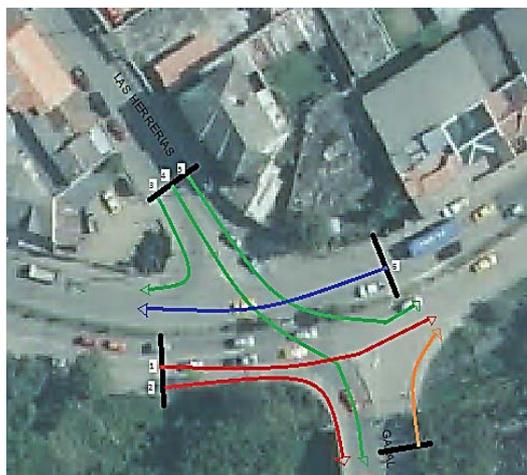
HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos ruedas
12h30-12h45	716	28	9	3	1	0	32
12h45-13h00	759	29	19	4	3	0	22
13h00-13h15	818	33	18	4	4	0	40
13h15-13h30	865	15	12	7	1	0	30
<b>TOTAL</b>	<b>3158</b>	<b>104</b>	<b>58</b>	<b>17</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>124</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	3158	91%
Buses	104	3%
Camión Liviano	58	2%
Camión Mediano	17	0%
Camión Pesado	9	0%
Trailer	0	0%
Dos ruedas	124	4%
<b>TOTAL</b>	<b>3471</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

### 2.3.4.9. Intersección 9: Av. 10 de Agosto y Calle de las Herrerías

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 47020 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan cuatro accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron cuatro directas.



*Figura 2-19 Esquema de flujos en intersección 9*  
*Fuente: Autor a partir de Google Earth*

#### **Horas de máximo movimiento en toda la intersección.**

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

*Tabla 2-24 Hora Máximo Movimiento de la intersección 9*

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Acceso)	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h00-8h00	4391	9%	9%
TARDE	12h30-13h30	4498	10%	10%

*Fuente: Autor*

La hora de máximo movimiento es en la tarde desde las 12h30 hasta las 13h30 con 4498 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 4391 vehículos desde las 07h00 hasta las 08h00.

#### **Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.**

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 92%, le siguen los de dos ruedas con el

3%, luego los buses con el 2% y finalmente el camión liviano y mediano con el 1% respectivamente.

Tabla 2-25 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 9

HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos ruedas
12h30-12h45	1047	16	4	9	4	0	36
12h45-13h00	1029	22	16	8	3	0	35
13h00-13h15	1131	22	19	8	4	0	41
13h15-13h30	977	13	9	9	5	0	31
<b>TOTAL</b>	<b>4184</b>	<b>73</b>	<b>48</b>	<b>34</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>143</b>

TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	4184	92%
Buses	73	2%
Camión	48	1%
Camión	34	1%
Camión	16	0%
Tráiler	0	0%
Dos ruedas	143	3%
<b>TOTAL</b>	<b>4534</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

#### 2.3.4.10. Intersección 10: Av. 10 de Agosto y Av. del Paraíso

La intersección tiene un tráfico promedio diario anual “TPDA” de 23719 vehículos al día, su configuración geométrica determinó que para la cuantificación del tráfico observado se establezcan tres accesos directos; con respecto a las salidas se identificaron tres directas.

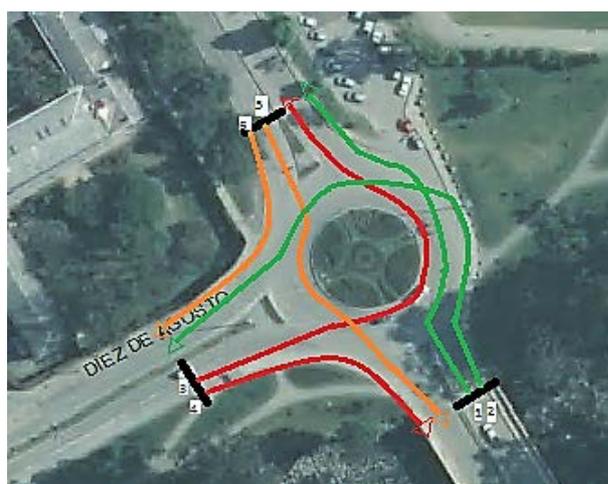


Figura 2-20 Esquema de flujos en intersección 10

Fuente: Autor a partir de Google Earth

### Horas de máximo movimiento en toda la intersección.

Se ha determinado dos horas de máximo movimiento, considerando dos periodos de análisis uno en la mañana (07h00 -13h00) y otro en la tarde (13h00 -19h00), los cuales se indican a continuación:

Tabla 2-26 Hora Máximo Movimiento de la intersección 10

HORA PICO		TPDA TOTAL	% TPDA (Intersección)
MANANA	7h30-8h30	2385	10%
TARDE	14h45-15h45	2101	9%

Fuente: Autor

La hora de máximo movimiento es en la mañana desde las 07h30 hasta las 08h30 con 2385 vehículos, por su parte en la mañana existe un volumen de 2101 vehículos desde las 14h45 hasta las 15h45.

### Composición según tipo de vehículo en hora de máxima demanda.

La composición vehicular dentro de la hora de máxima demanda de la red (12h30-13h30), prevalece el vehículo liviano con el 93%, le siguen los de dos ruedas con el 3%, luego los buses con el 2% y finalmente el camión liviano con el 1%.

Tabla 2-27 Composición vehicular hora de máxima demanda Intersección 10

HORA	FLUJO POR TIPO VEH						
	Livianos	Buses	Camión Liviano	Camión Mediano	Camión Pesado	Trailer	Dos ruedas
12h30-12h45	445	13	2	1	4	0	5
12h45-13h00	457	20	4	3	1	0	5
13h00-13h15	462	16	2	9	3	0	12
13h15-13h30	490	17	6	4	1	0	12
<b>TOTAL</b>	<b>1854</b>	<b>66</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>34</b>

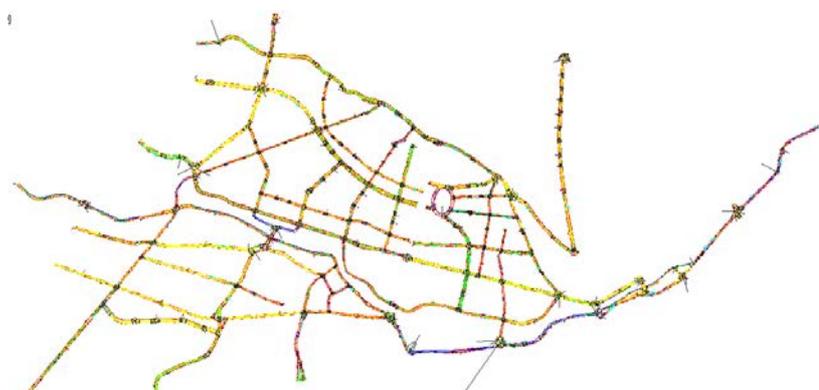
TIPO VEH	FLUJO	% FLUJO
Livianos	2389	93%
Buses	62	2%
Camión Liviano	35	1%
Camión Mediano	1	0%
Camión Pesado	8	0%
Trailer	0	0%
Dos ruedas	78	3%
<b>TOTAL</b>	<b>2574</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor

## 2.4. Levantamiento de información secundaria

### 2.4.1. Planimetría y topografía de la Av. 10 de Agosto

Como información secundaria para la presente investigación se ha requerido recabar la topografía de precisión del sistema viario principal de la parroquia Sucre y Huayna Cápac que dispone la dirección municipal de tránsito del GAD de Cuenca en su base de datos, dicha topografía esta geo referenciada en el *datum WGS84* y sirve de referencia para la creación de la red en el software de microsimulación, lo cual se aprecia en la siguiente figura.



*Figura 2-21 Topografía del Viario principal de parroquia Sucre – Huayna Cápac*  
 Fuente: Dirección Municipal de Tránsito del GAD de Cuenca

### 2.4.2. Características del Parque Automotor de Cuenca

Varios han sido los documentos de consulta para llegar a determinar una caracterización actualizada del parque automotor de la ciudad de Cuenca, se realizaron acercamientos con la Empresa de Movilidad de Cuenca EMOV-EP por intermedio de su Gerencia de Transporte, departamento encargado de la calidad del aire, Dirección Municipal de Tránsito del GAD de Cuenca, Consorcio Danton encargado de la Revisión Técnica Vehicular del Cantón Cuenca, Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador, páginas oficiales de estadísticas como Ecuador en cifras, y no fue posible determinar una caracterización exacta del parque automotor de la ciudad, primero porque la información que disponen en estas dependencias no cuentan con el grado de detalle requerido para caracterizar de manera exacta a los vehículos que mejor representan a cada tipo (livianos, buses y camiones), segundo porque no existe una información depurada que garantice la veracidad de la información y tercero por la

falta de interés de las instituciones públicas en disponer del grado de información requerida para el presente estudio, por lo que se tomó la decisión de trabajar con la información oficial más actualizada que se dispone y que está descrita en el inventario de emisiones atmosféricas de la ciudad de Cuenca del año 2014, en el cual se establece que 131 488 vehículos utilizan gasolina, de los cuales el 67.26% son automóviles, el 20.31% son camionetas y furgonetas, el 7.92% son motocicletas, 3.66% corresponden a taxis, 0.15% a vehículos pesados y el 0.7% a híbridos, (Empresa de Movilidad de Cuenca - EMOV -EP, 2014) lo anteriormente descrito se puede observar en la siguiente tabla.

*Tabla 2-28 Composición del parque automotor de Cuenca de Vehículos a Gasolina*

AÑO	AUTOMÓVILES			HÍBRIDOS			CAMIONETAS Y FURGONETAS			TAXIS			PESADOS	MOTOS	TOTAL
	<1400	1400-2000	>2000	<1400	1400-2000	>2000	<1400	1400-2000	>2000	<1400	1400-2000	>2000			
	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3	cm3			
1989 y anteriores	1909	1654	502	0	0	0	572	2114	251	0	0	0	75	134	7211
1990	723	126	66	0	0	0	54	37	142	0	0	0	7	9	1164
1991	822	311	94	0	0	0	67	70	164	0	0	0	4	12	1544
1992	750	810	277	0	0	0	69	84	211	0	0	0	3	10	2214
1993	499	851	336	0	0	0	95	131	387	0	0	0	4	22	2325
1994	622	1571	314	0	0	0	166	192	662	0	0	0	4	26	3557
1995	480	954	245	0	0	0	144	109	615	0	0	0	6	7	2560
1996	615	1032	189	0	0	0	100	103	531	0	0	0	7	21	2598
1997	468	1084	254	0	0	0	62	67	527	0	0	0	0	13	2475
1998	649	1855	533	0	0	0	66	107	882	0	0	0	4	15	4111
1999	453	1303	423	0	0	0	101	59	882	0	7	0	1	1	3230
2000	84	371	51	0	0	0	0	18	88	1	1	0	0	15	629
2001	892	2273	587	0	0	0	25	35	760	4	164	0	6	53	4799
2002	750	3364	657	0	0	0	38	41	1326	1	273	0	6	106	6562
2003	424	2967	490	0	0	0	43	25	1250	1	229	0	7	116	5552
2004	317	2610	423	0	0	0	26	22	1084	1	169	0	4	182	4838
2005	452	3309	434	0	0	0	66	31	1215	1	464	0	13	182	6167
2006	665	3411	641	0	0	0	48	31	1329	4	358	1	3	307	6798
2007	695	3614	880	0	0	0	51	16	1416	0	373	1	9	258	7313
2008	486	2977	763	0	1	1	6	9	1193	6	307	0	1	288	6038
2009	632	4114	588	0	1	109	34	4	1197	4	468	0	1	423	7575
2010	367	3357	534	0	51	349	16	16	1076	6	436	0	1	527	6736
2011	706	4751	565	0	3	94	78	9	1026	0	525	0	0	748	8505
2012	710	3532	450	0	63	21	204	23	698	1	327	0	4	1362	7395
2013	480	3133	647	0	141	0	169	9	803	0	428	3	7	1715	7535
2014	1259	3885	1368	0	41	44	120	35	1169	7	247	1	23	3858	12 057
<b>Total:</b>	<b>16 909</b>	<b>59 219</b>	<b>12 311</b>	<b>0</b>	<b>301</b>	<b>618</b>	<b>2420</b>	<b>3397</b>	<b>20 884</b>	<b>37</b>	<b>4776</b>	<b>6</b>	<b>200</b>	<b>10 410</b>	<b>131 488</b>
<b>%</b>	<b>12,86%</b>	<b>45,04%</b>	<b>9,36%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,23%</b>	<b>0,47%</b>	<b>1,84%</b>	<b>2,58%</b>	<b>15,88%</b>	<b>0,03%</b>	<b>3,63%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,15%</b>	<b>7,92%</b>	<b>100,00%</b>

*Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas de Cuenca 2014*

En cuanto a los vehículos que operan con diésel existen 15 966 unidades, de los cuales el 42.8% corresponde a vehículos pesados (camiones, volquetas, tráileres y tanqueros), el 38.9% a camionetas y furgonetas, el 14.4% a buses y el 3.9% son automóviles, el detalle de esta información se la puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2-29 Composición del parque automotor de Cuenca de Vehículos a Diésel

AÑO	AUTOMOVILES	CAMIONETAS Y FURGONETAS	BUSES	PESADOS	TOTAL
1989 y anteriores	7	0	3	243	<b>253</b>
1990	1	0	0	96	<b>97</b>
1991	0	0	0	64	<b>64</b>
1992	0	1	0	74	<b>75</b>
1993	1	1	0	31	<b>33</b>
1994	0	5	10	76	<b>91</b>
1995	1	19	16	79	<b>115</b>
1996	0	1	23	40	<b>64</b>
1997	0	3	11	38	<b>52</b>
1998	1	5	25	98	<b>129</b>
1999	0	15	29	123	<b>167</b>
2000	3	1	4	23	<b>31</b>
2001	1	42	68	205	<b>316</b>
2002	5	100	248	375	<b>728</b>
<b>2003</b>	4	190	<b>285</b>	259	<b>738</b>
2004	8	197	251	176	<b>632</b>
2005	85	203	168	221	<b>677</b>
2006	109	186	205	266	<b>766</b>
2007	126	188	153	411	<b>878</b>
2008	79	262	85	399	<b>825</b>
2009	102	697	112	513	<b>1424</b>
2010	57	618	105	336	<b>1116</b>
2011	15	845	161	553	<b>1574</b>
2012	3	584	106	491	<b>1184</b>
2013	15	717	82	639	<b>1453</b>
2014	7	1339	154	<b>1014</b>	<b>2514</b>
<b>Total:</b>	<b>630</b>	<b>6219</b>	<b>2304</b>	<b>6843</b>	<b>15 996</b>
<b>%</b>	<b>3,94%</b>	<b>38,88%</b>	<b>14,40%</b>	<b>42,78%</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas de Cuenca 2014

En lo que respecta a los vehículos a gasolina, se puede ver en la tabla 28 que los automoviles y taxis cuyo motor está entre 1400 – 2000 cm<sup>3</sup> y que pertenecen al año 2011 son los que predominan mayoritariamente, en lo que respecta a buses se observa el mayor numero de vehículos estan entre los años 2003 y 2004, finalmente con respecto a los vehículos pesados (camiones livianos, medianos, pesados, volquetas, trailers, etc) se observa que el mayor numero de unidades corresponden al año de fabricación 2014.

El identificar el modelo representativo de cada tipo de vehículo resulta muy complejo debido a las multiples variables que inciden en la selección, por ello se ha tomado como criterio el modelo mas vendido para cada año, es así que en función de la información obtenida por intermedio de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador “AEADE” de los años 2011 y 2014 (a nivel nacional).

En virtud de lo anterior se ha seleccionado como el vehículo representativo del parque automotor liviano el Chevrolet Aveo Activo Sedán 1.6 del año 2011 ya que fue el vehículo más vendido a nivel nacional con 11 168 unidades (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, 2011), para los vehículos pesados que corresponden a (camiones livianos, medianos, pesados, volquetas, trailers, etc) en función del anuario de ventas nacionales se aprecia que las mayores ventas para el año 2014 registra el Camión Chevrolet NLR con 1 458 unidades (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, 2014), para finalizar en cuanto a los buses es importante destacar que dentro de este tipo de vehículos están las unidades de transporte urbano, intracantonal, intercantonal e interprovincial que circulan por la ciudad, por ello y consultando al Consorcio de transporte Urbano de Cuenca “Concuenca”, se indicó que mayoritariamente los buses que corresponden a ese año son marca Hino FGIJPUZ del año 2003, por lo que se considera este vehículo como el representativo. Las fichas técnicas de cada vehículo donde constan las características mecánicas se pueden encontrar en los Anexos del presente documento.

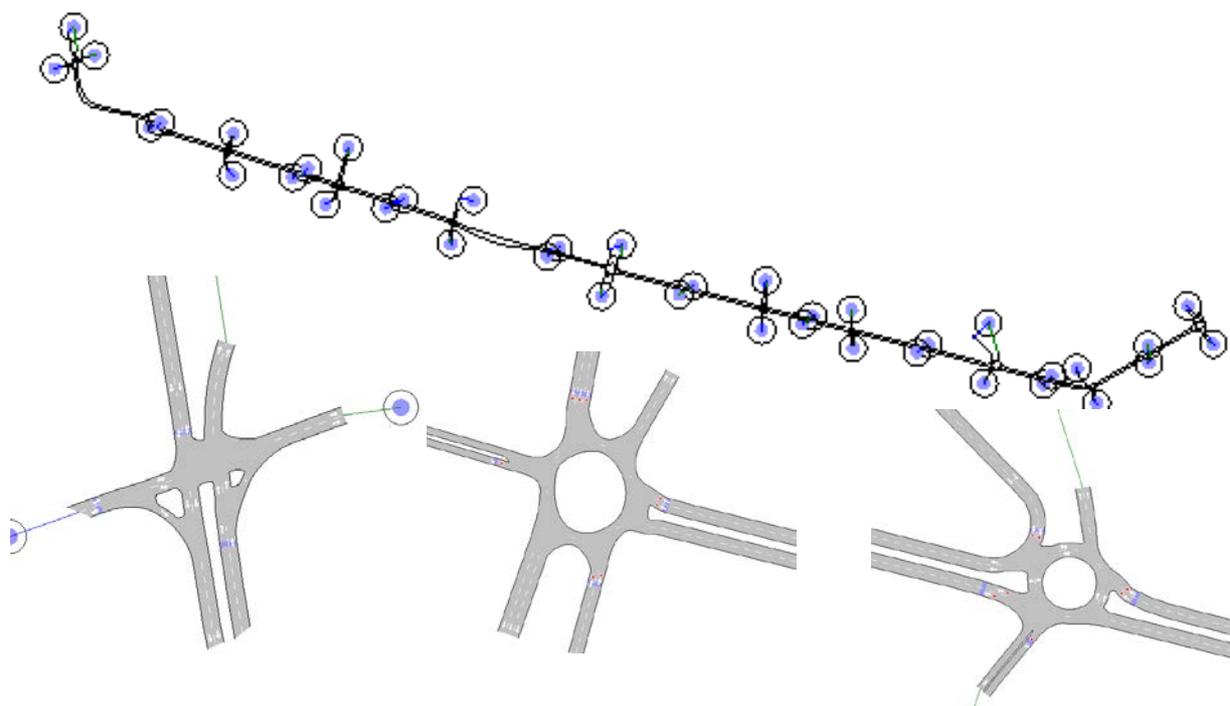
## **2.5. Construcción y calibración del modelo de microsimulación en Aimsun**

A continuación se detalla el proceso de construcción de la red de microsimulación de tránsito, para ello se ha tomado como datos de entrada la información primaria y secundaria recabada para la presente investigación.

### **2.5.1. Creación de la red**

Para la creación de la red del modelo se ha tomado como referencia la topografía de precisión del viario proporcionada por el GAD de Cuenca, sobre la cual se crean los arcos de tal manera que correspondan con las geometrías de las intersecciones y redondeles, esto debido a que por tratarse de una micro simulación el software toma en cuenta la geometría de las vías para analizar el comportamiento de cada vehículo, dependiendo de anchos de carril, radios de giro, señales de pare, semáforos y demás comportamiento que particularizan a cada individuo en la red.

Ante cualquier inquietud en el trazado de la red, se recomienda remitirse a los manuales de TSS fabricante del *software*, en las siguientes figuras se puede apreciar el trazado de la red en el software de microsimulación Aimsun en su versión *expert*.



*Figura 2-22 Creación de Red vial en Aimsun  
Fuente: Autor a partir de Aimsun*

### 2.5.2. Calibración del modelo de microsimulación

Una vez creada la red y alimentado el sistema con los datos de información primaria obtenida en campo (aforos clasificados, velocidades en los arcos, definición de giros y centroides, etc), se corre un escenario dinámico de asignación de tráfico de tipo estocástico conformado por 5 replicaciones, calibrándose los resultados con la media aritmética obtenida.

Con el propósito de garantizar que la información generada en base al modelo de microsimulación sea fiable, se asigna al modelo un conjunto de datos reales en función de los flujos vehiculares y velocidades de marcha levantados en campo, que serán comparados con las series temporales simuladas. Para ello es necesario trabajar con detectores en puntos específicos de la red, realizándose la calibración de 3 formas:

#### a) Gráficamente

Se usa un conjunto de datos reales (flujos y velocidades en la hora de máxima demanda) en comparación con los datos simulados.

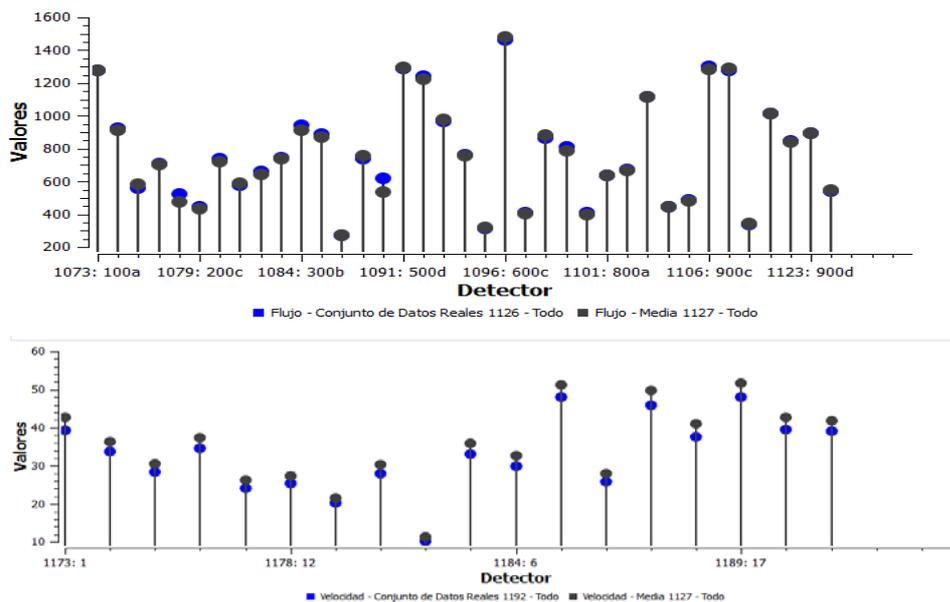


Figura 2-23 Validación datos reales vs datos simulados para flujo y velocidad  
Fuente: Autor a partir de Aimsun

b) Regresión Lineal

Se visualizan los datos reales versus los datos simulados mediante una regresión de tipo lineal, se requiere que el coeficiente de ajuste sea superior a 0.95, y como se puede observar en las siguientes figuras el R cuadrado es mayor a 0.99 tanto en flujos como en velocidades, por lo que se garantiza el ajuste de datos.

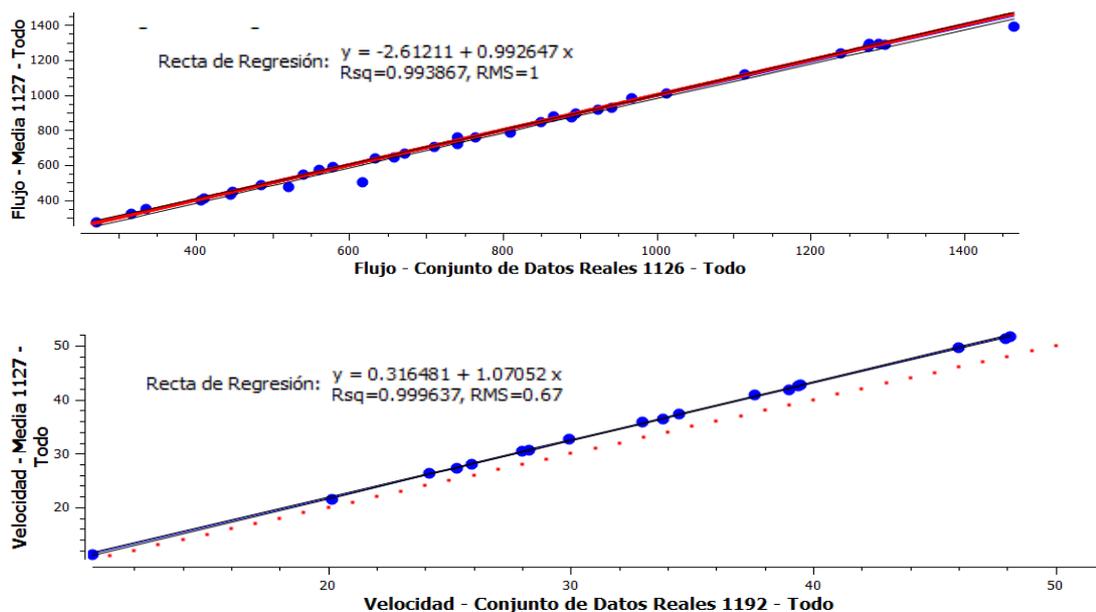


Figura 2-24 Regresión lineal para calibración de flujos y velocidades

Fuente: Autor a partir de Aimsun

### c) Estadísticamente

Se analiza el conjunto de datos reales vs los datos de la simulación, mediante el cálculo del estadístico GEH que se describió en la sección 1.9.7, la herramienta informática Aimsun 8.1.3 calcula automáticamente la diferencia absoluta y la diferencia relativa de cada par de valores para así analizar las desviaciones en cada detector de ajuste, como se puede apreciar en las siguientes tablas, se cumple lo establecido, por lo que se considera que el modelo de microsimulación está perfectamente bien calibrado y refleja las condiciones operacionales del viario en estudio.

*Tabla 2-30 Estadística GEH entre flujos reales y simuladas*

Objeto	Flujo - Conjunto de Datos Reales 1126 - Todo	Flujo - Media 1127 - Todo	Diferencia Absoluta	Diferencia Relativa (%)	GEH
1073: 100a	1276	1275.6	-0.4	-0.031348	0.0111987
1074: 100b	924	914.6	-9.4	-1.01732	0.310027
1075: 100c	561	572.6	11.6	2.06774	0.48724
1076: 200a	711	705.2	-5.8	-0.815752	0.217962
1077: 200d	521	474.4	-46.6	-8.94434	2.08883
1079: 200c	445	433	-12	-2.69663	0.572729
1080: 200b	741	719.6	-21.4	-2.88799	0.791887
1081: 300a	579	588.2	9.2	1.58895	0.380829
1082: 300d	658	642.4	-15.6	-2.37082	0.611788
1083: 300c	743	740.2	-2.8	-0.376851	0.102819
1084: 300b	942	924.4	-17.6	-1.86837	0.576136
1085: 400a	889	872.8	-16.2	-1.82227	0.545823
1088: 400b	271	274	3	1.10701	0.181735
1089: 400c	741	756.4	15.4	2.07827	0.562816
1090: 500a	617	504	-113	-18.3144	4.77299
1091: 500d	1289	1292.4	3.4	0.26377	0.0946382
1092: 500b	1240	1239	-1	0.0806452	0.0284038
1093: 500c	967	978.8	11.8	1.22027	0.37831
1094: 600a	764	757.4	-6.6	-0.863874	0.239297
1095: 600b	316	319.8	3.8	1.20253	0.213127
1096: 600c	1465	1390.4	-74.6	-5.09215	1.97433
1097: 600d	411	406.4	-4.6	-1.11922	0.227539
1098: 700a	866	880.2	14.2	1.63972	0.48057
1099: 700c	810	786.4	-23.6	-2.91358	0.835326
1100: 700b	407	399.8	-7.2	-1.76904	0.35848
1101: 800a	634	636.6	2.6	0.410095	0.103153

1102: 800d	672	663.6	-8.4	-1.25	0.325054
1103: 800c	1114	1116	2	0.179533	0.0598953
1104: 800b	448	445.2	-2.8	-0.625	0.132495
1105: 900b	485	483.6	-1.4	-0.28866	0.0636167
1106: 900c	1298	1284.6	-13.4	-1.03236	0.372899
1107: 900a	1277	1291.4	14.4	1.12764	0.401834
1108: 91000c	335	346.2	11.2	3.34328	0.60687
1109: 91000b	1013	1007.2	-5.8	-0.572557	0.182493
1110: 91000a	849	842.6	-6.4	-0.753828	0.220063
1123: 900d	895	895	0	0	0
1124: 400d	541	547.2	6.2	1.14603	0.265798
<b>Media</b>	<b>776.081</b>	<b>767.762</b>	<b>-8.31892</b>	<b>-1.07191</b>	<b>0.534568</b>

Fuente: Autor a partir de Aimsun

Tabla 2-31 Estadística GEH entre velocidades reales y simuladas

Objeto	Velocidad - Conjunto de Datos Reales 1192 - Todo	Velocidad - Media 1127 - Todo	Diferencia Absoluta	Diferencia Relativa (%)	GEH
1173:01:00	39.36	42.598	3.23799	8.2266	0,5058202
1174:10:00	33.81	36.3579	2.5479	7.53594	0,43015813
1175:02:00	28.27	30.5403	2.27029	8.03073	0,41866972
1176:11:00	34.48	37.2801	2.80014	8.12106	0,41312027
1177:03:00	24.19	26.3349	2.14493	8.86699	0,42949125
1178:12:00	25.29	27.3033	2.01329	7.96083	0,39260722
1179:04:00	20.16	21.5423	1.38232	6.85676	0,30271734
1180:13:00	27.99	30.3378	2.34782	8.38806	0,43474871
1181:05:00	10.29	11.2635	0.973495	9.4606	0,29654599
1182:14:00	32.98	35.8727	2.89269	8.77105	0,49301247
1184:06:00	29.94	32.6491	2.70913	9.04854	0,48427347
1185:15:00	47.94	51.2708	3.33078	6.94781	0,47291608
1186:07:00	25.9	28.037	2.13702	8.25105	0,41150596
1187:16:00	45.99	49.6631	3.6731	7.98674	0,53112681
1188:08:00	37.57	40.8927	3.32274	8.84412	0,53048671
1189:17:00	48.13	51.674	3.54404	7.36348	0,50168918
1190:09:00	39.48	42.6586	3.17859	8.05113	0,49599492
1191:18:00	39	41.8526	2.85261	7.3144	0,44865125
<b>Media</b>	<b>32.8206</b>	<b>35.4516</b>	<b>2.63105</b>	<b>8.01647</b>	<b>0,45031239</b>

Fuente: Autor a partir de Aimsun

Como se puede observar en los resultados presentados, los valores simulados tanto en flujo como en velocidad son extremadamente próximos a los levantados en campo, por lo que se puede concluir que el modelo de microsimulación refleja las condiciones operacionales reales del viario en estudio, garantizando así que los resultados relacionados a las emisiones vehiculares sean los acertados, puesto que como se justificó con anterioridad las emisiones de contaminantes están íntimamente ligados a la velocidad de circulación, su aceleración y al grado de congestión del viario determinado por la densidad y el flujo vehicular.

### 2.5.3. Características mecánicas de los vehículos tipo a Aimsun 8.1

El modelo medio ambiental de emisiones que dispone la herramienta informática Aimsun 8.1, requiere información referente a las características mecánicas y a la composición de la flota del parque automotor que interviene en las modelaciones, en la siguiente tabla se resume un detalle de los porcentajes de tipo de combustible para cada grupo de vehículos en función de la información obtenida en la sección 2.4.2.

*Tabla 2-32 Porcentaje de Combustible en los grupos de vehículos*

<b>TIPO VEH</b>	<b>GASOLINA</b>	<b>%</b>	<b>DIESEL</b>	<b>%</b>	<b>TOTAL</b>
Livianos	120 878	94,64%	6849	5,36%	127 727
Buses	0	0,00%	2304	100,00%	2 304
Pesados	200	2,84%	6843	97,16%	7 043
2 Ruedas	10 410	100,00%	0	0,00%	10 410
<b>TOTALES</b>	<b>131 488</b>	<b>89,15%</b>	<b>15996</b>	<b>10,85%</b>	<b>147 484</b>

*Fuente: Autor*

Para ingresar estas características es necesario que una vez calibrado y validado el modelo de microsimulación, ingresemos a la opción de vehículos, seleccionemos el tipo de vehículo e ingresemos sus características mecánicas como es dimensiones, peso, potencia, tipo de combustible, etc. En la siguiente figura se ilustra el proceso de ingreso de información teniendo como referencia que el tipo de vehículo liviano está representado por el Chevrolet Aveo Activo Sedán 1.6 del año 2011, como se indicó anteriormente en Anexos está disponible su ficha técnica.

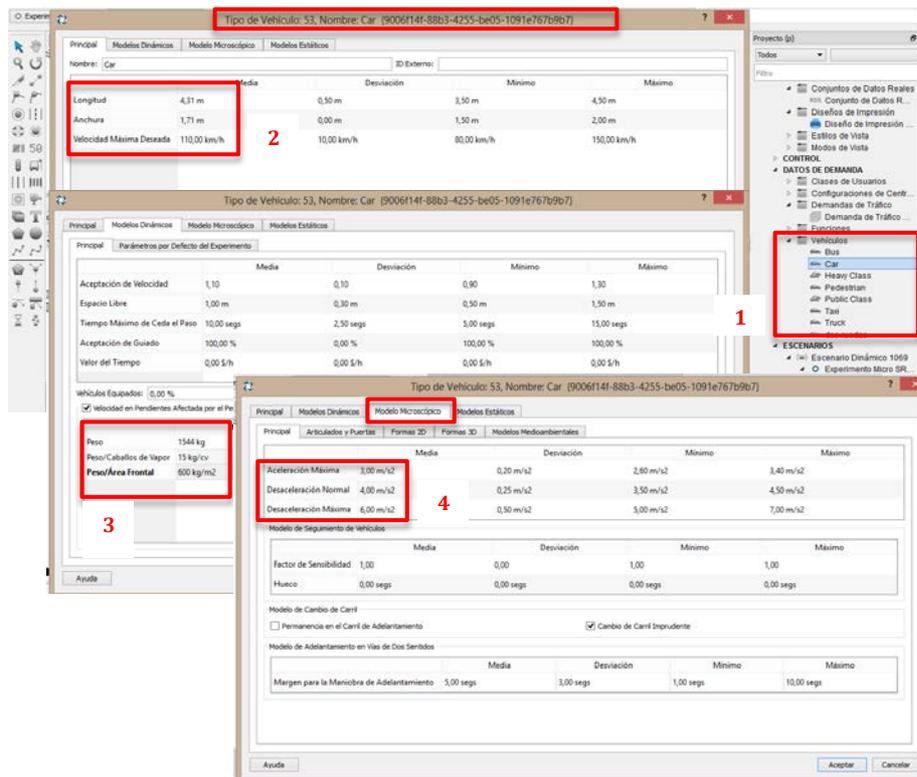


Figura 2-25 Ingreso de características mecánicas del vehículo tipo liviano (car)

Fuente: Autor a partir de Aimsun

Fuente: Aimsun

En base a lo establecido en la tabla 2-32, se ingresa a cada tipo de vehículo que interviene en las microsimulaciones, el porcentaje de combustible que usa, en la siguiente figura se detalla el ingreso de esta información.

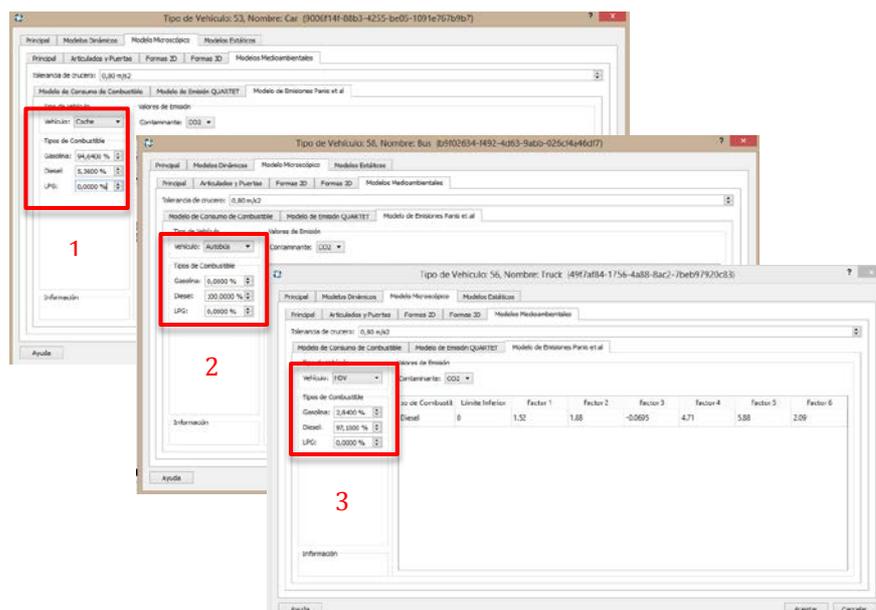


Figura 2-26 Ingreso de tipo de combustible de cada grupo de vehículos

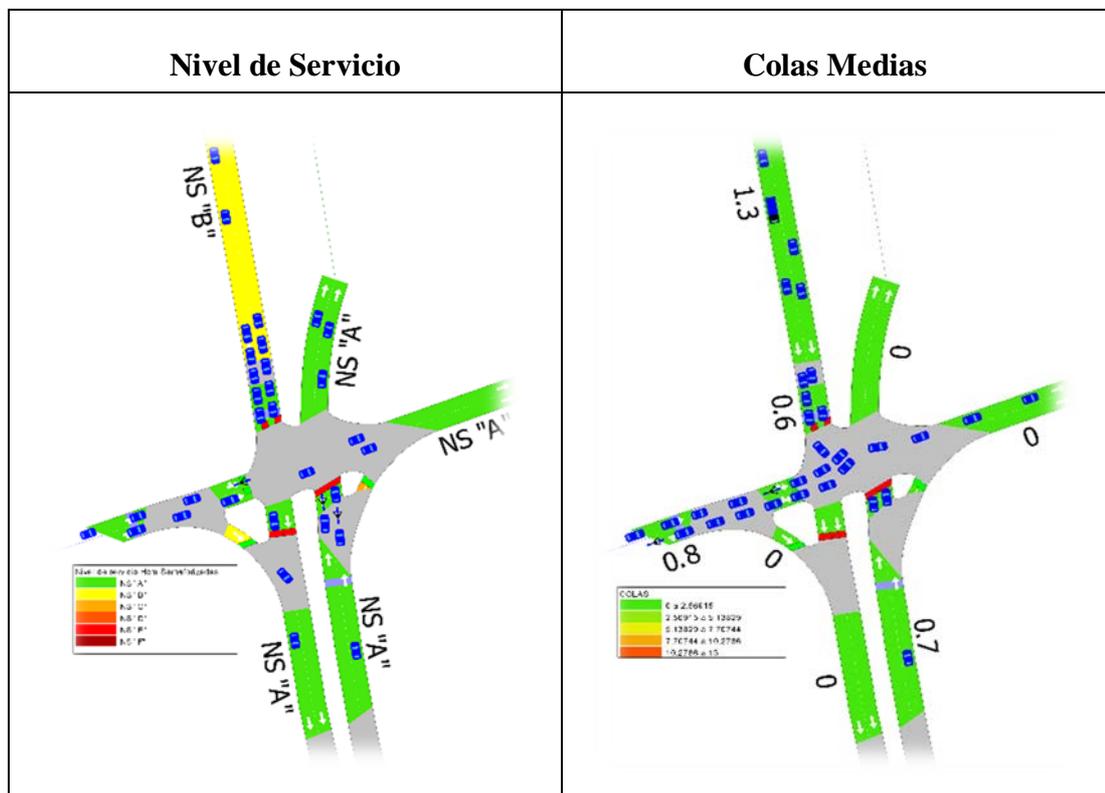
Fuente: Autor a partir de Aimsun

## 2.6. Parámetros operacionales de las intersecciones en estudio

A continuación se detalla los resultados de los principales parámetros operacionales de las intersecciones objeto de estudio, entre los que se destacan:

- Nivel de Servicio
- Longitud de Cola
- Flujo Simulado
- Velocidad Simulada
- Emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

### 2.6.1. Intersección 1: Av. 10 de Agosto y Av. Loja



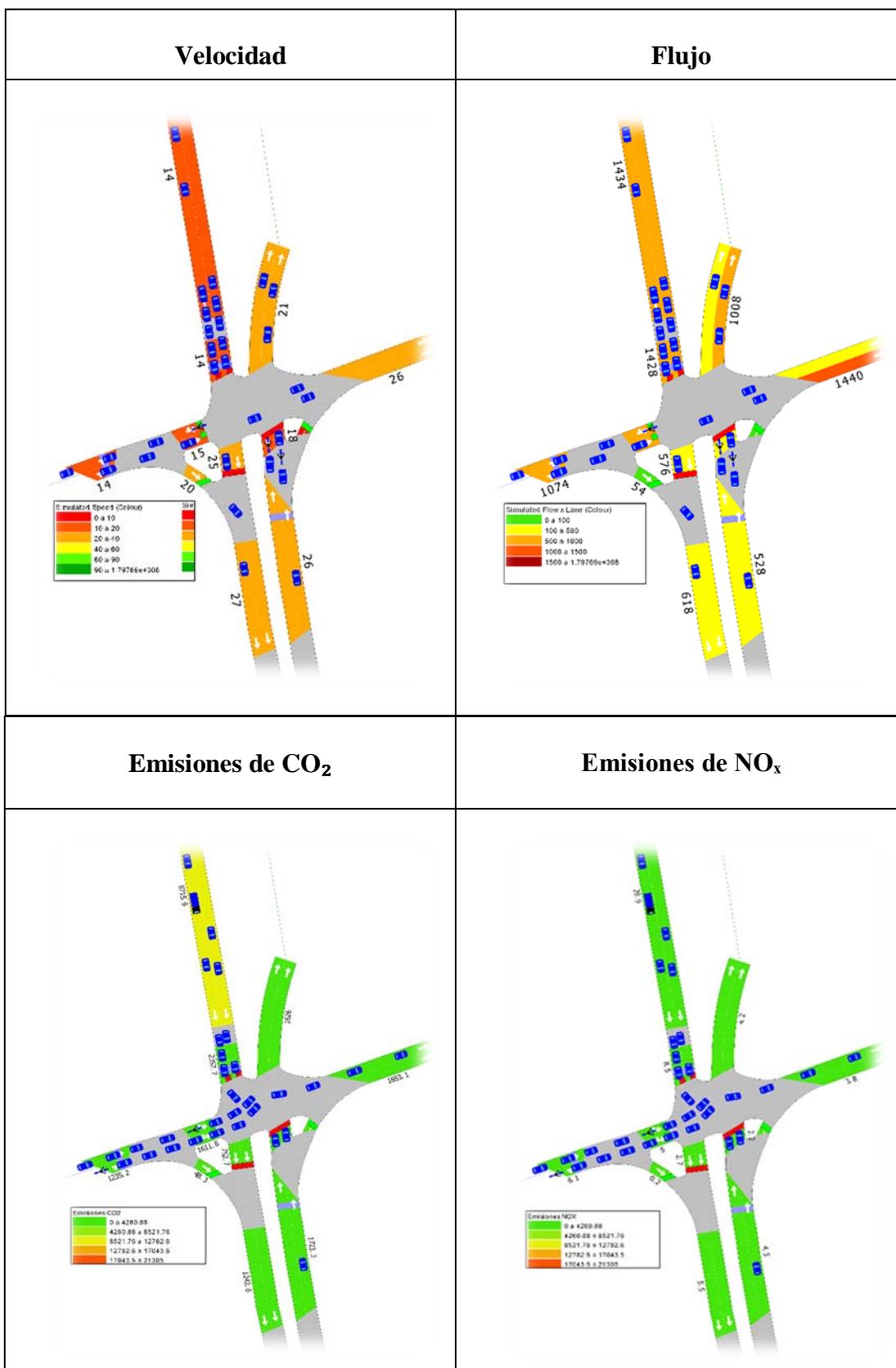
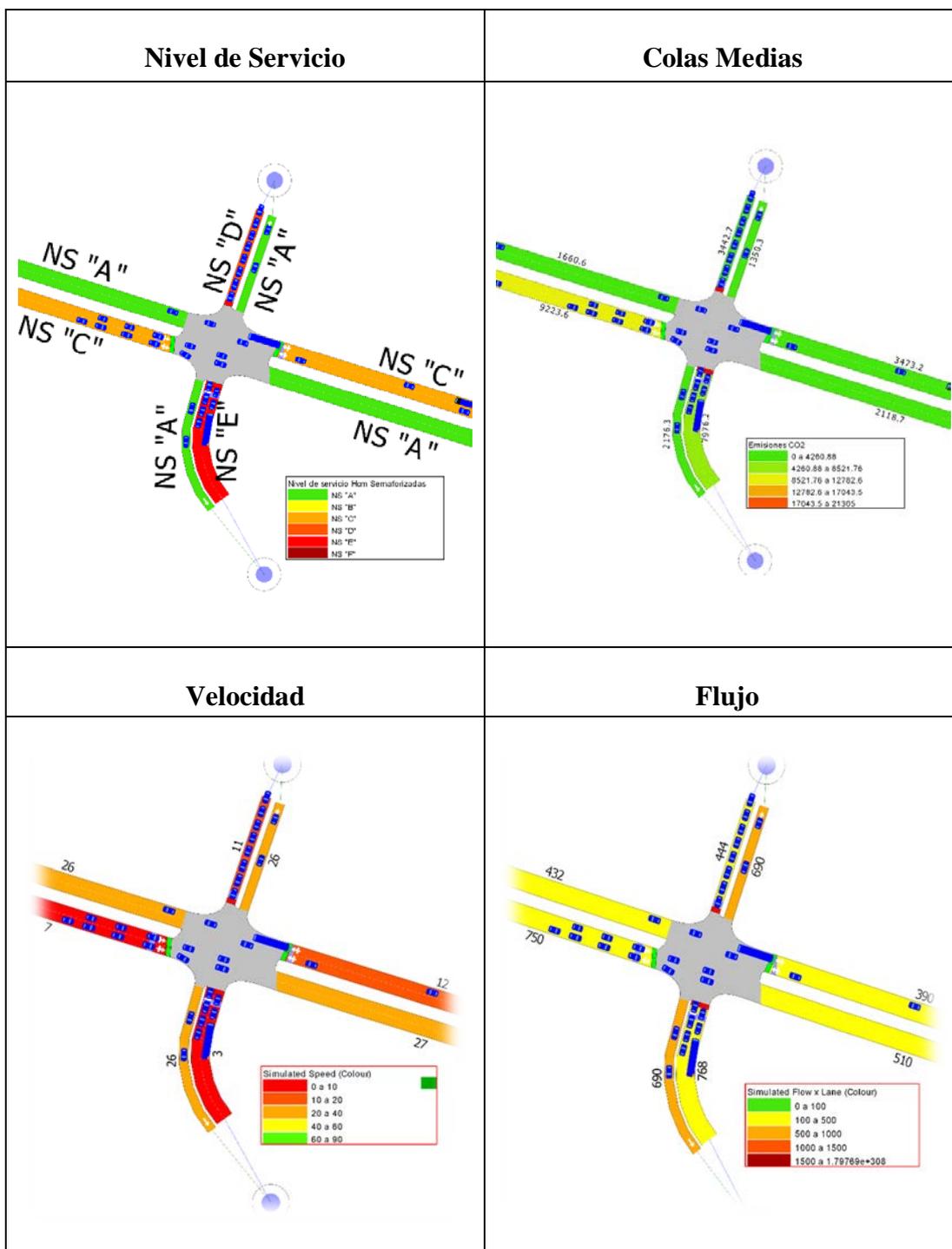


Figura 2-27 Parámetros operacionales Intersección 1  
Fuente: Aimsun

### 2.6.2. Intersección 2: Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha



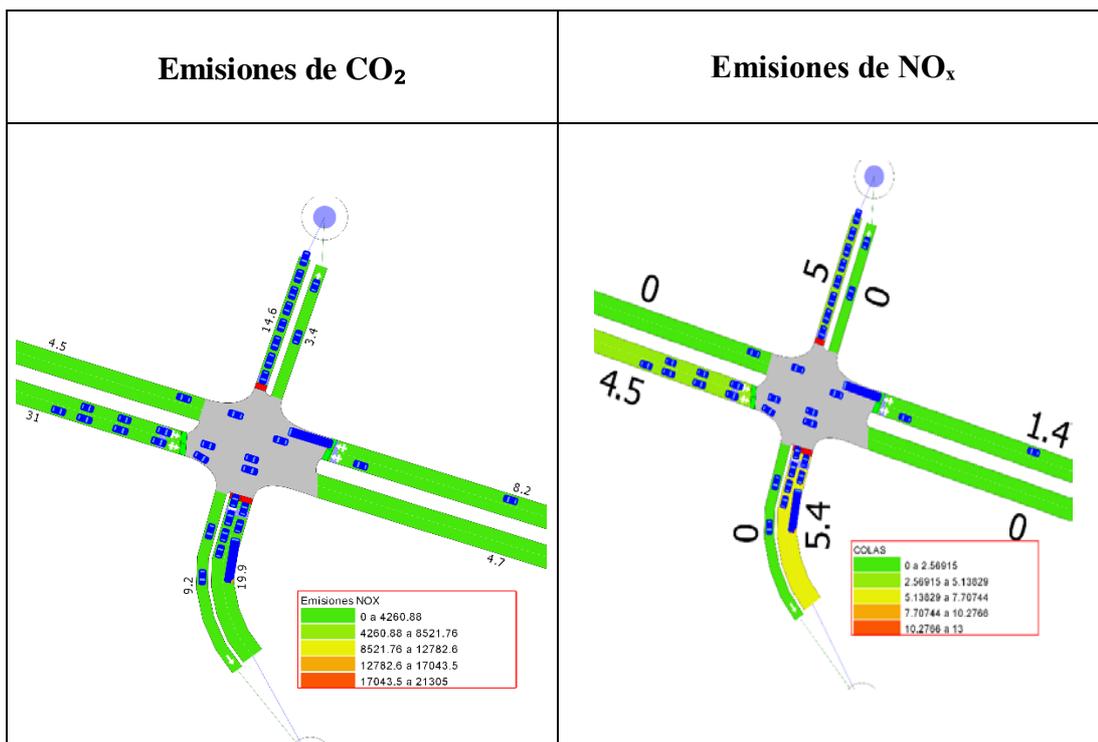
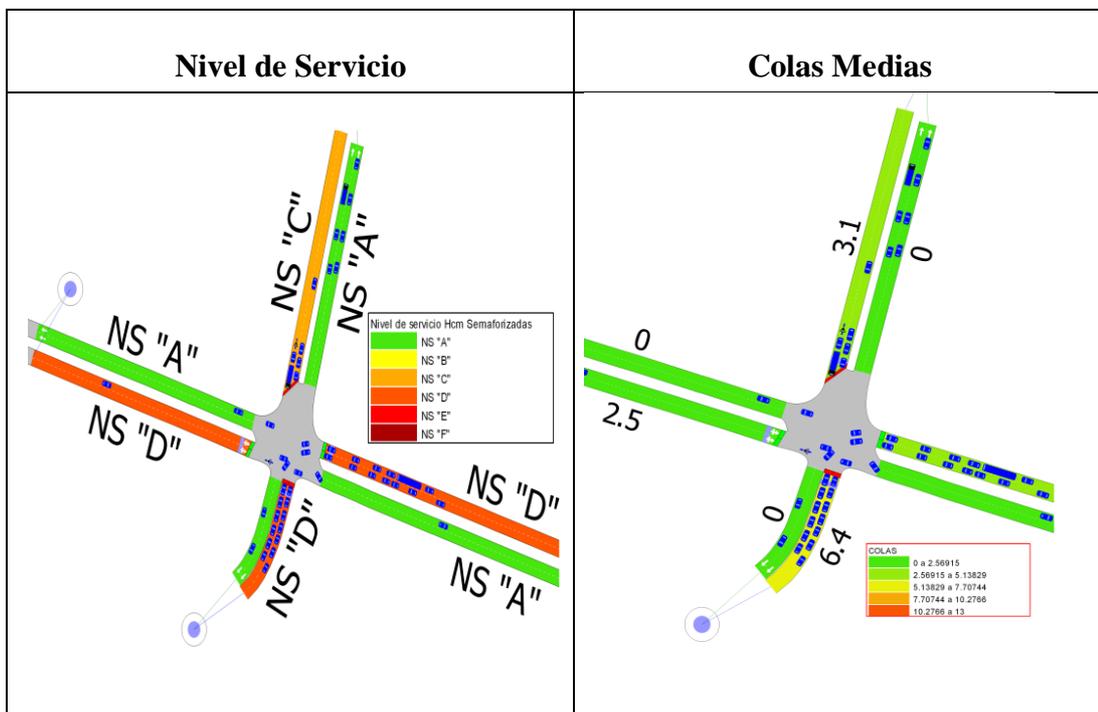


Figura 2-28 Parámetros operacionales Intersección 2  
Fuente: Aimsun

**2.6.3. Intersección 3: Av. 10 de Agosto y Av. Ricardo Muñoz Dávila**



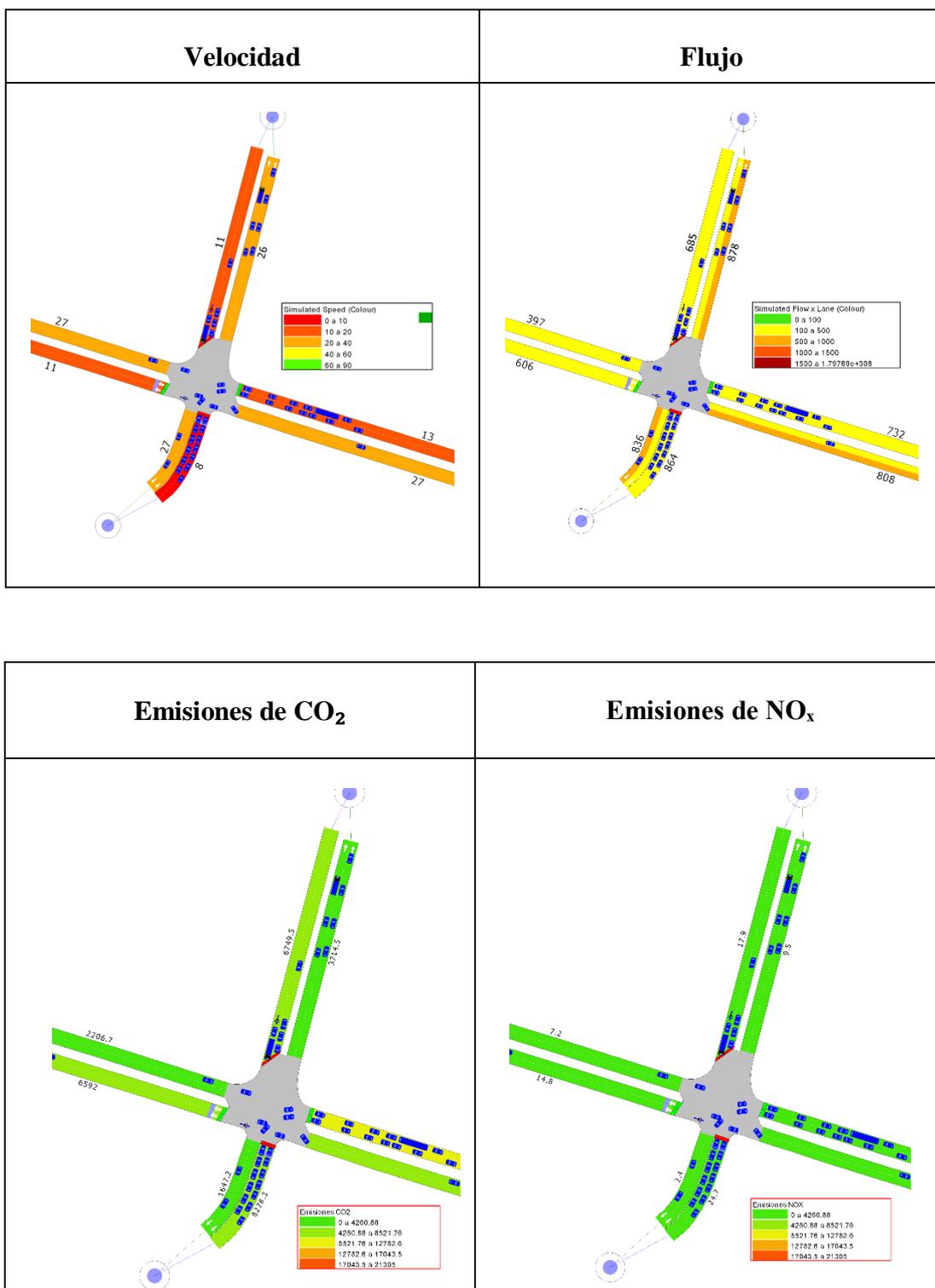
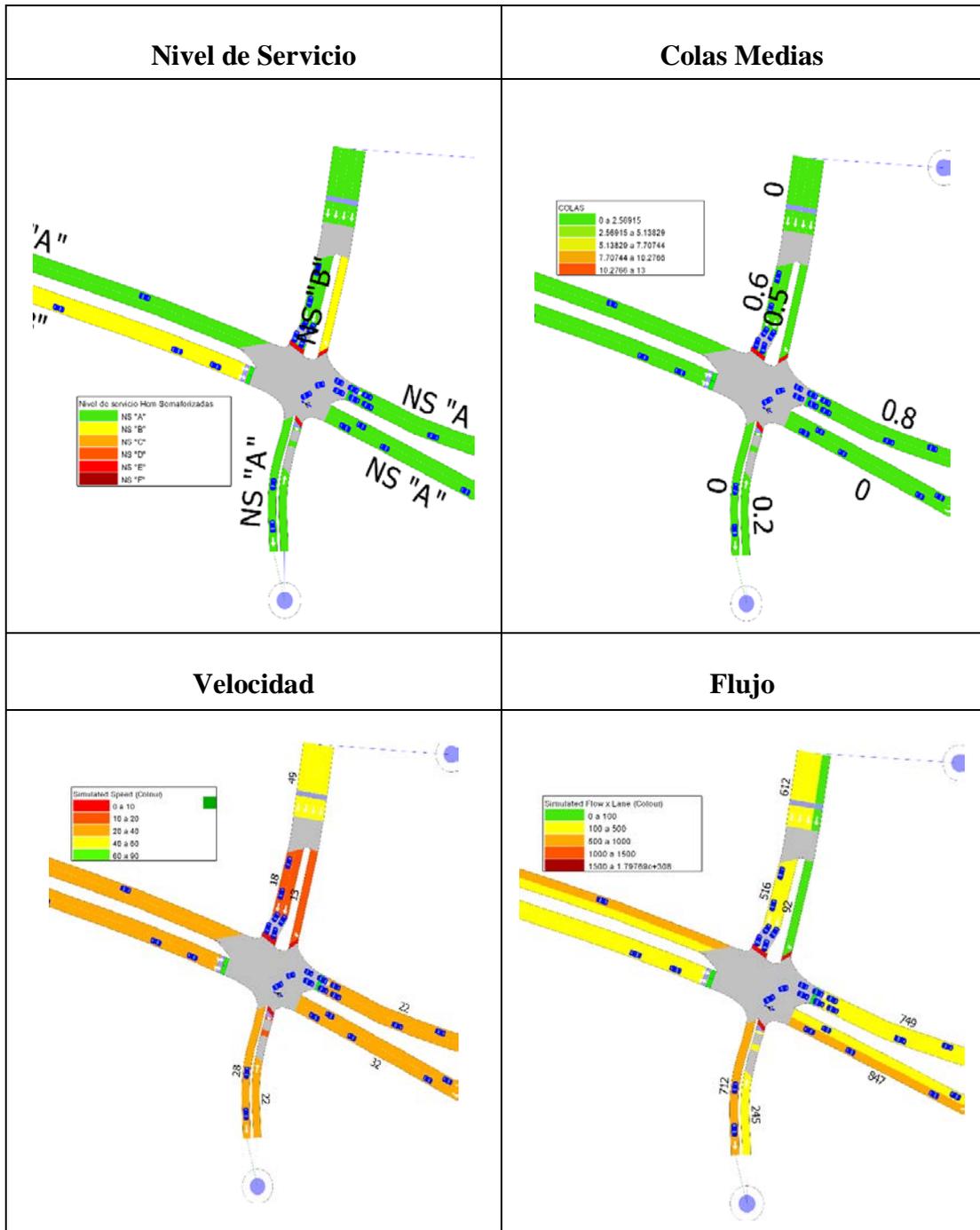


Figura 2-29 Parámetros operacionales Intersección 3  
Fuente: Aimsun

**2.6.4. Intersección 4: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero**



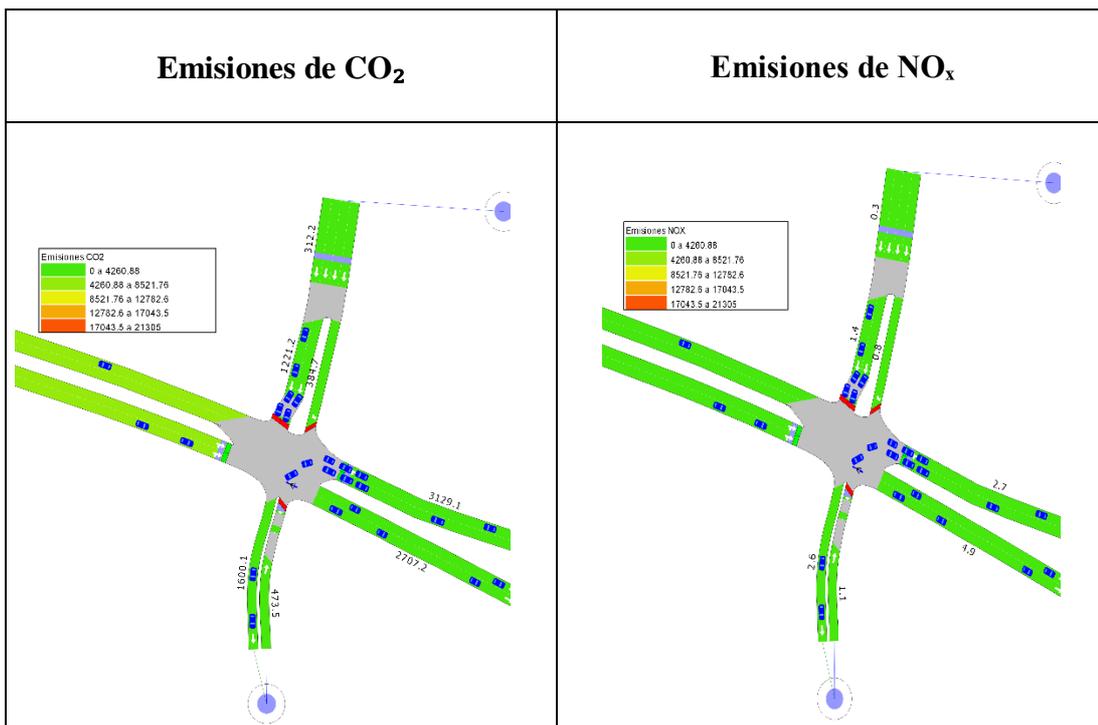
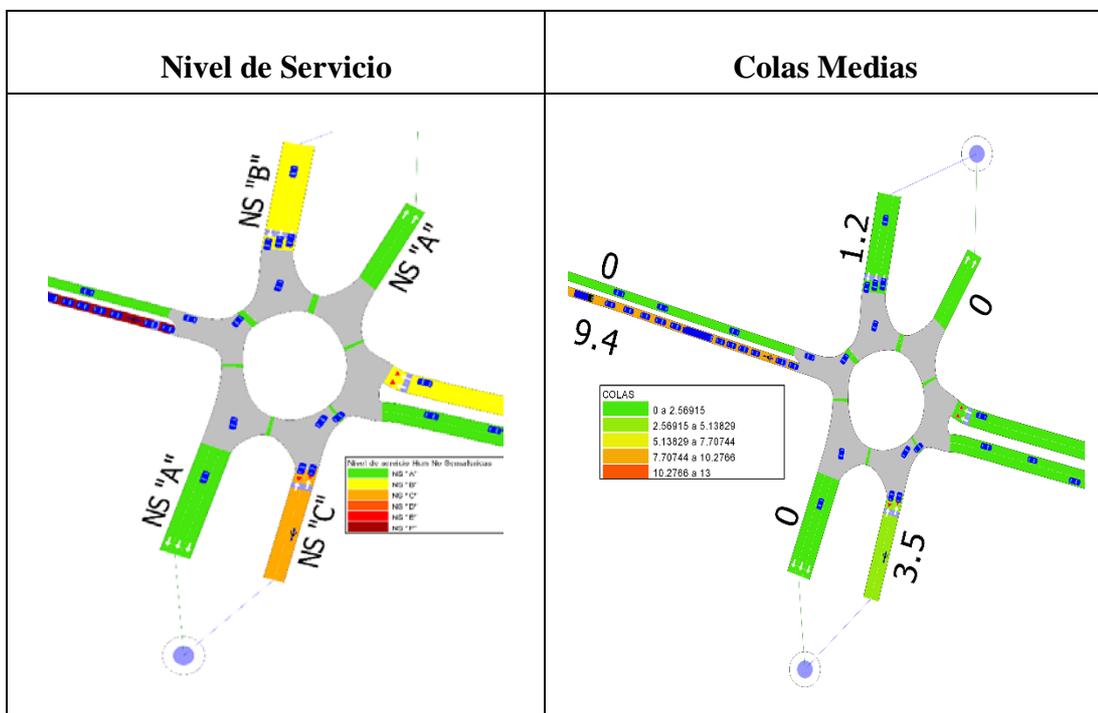


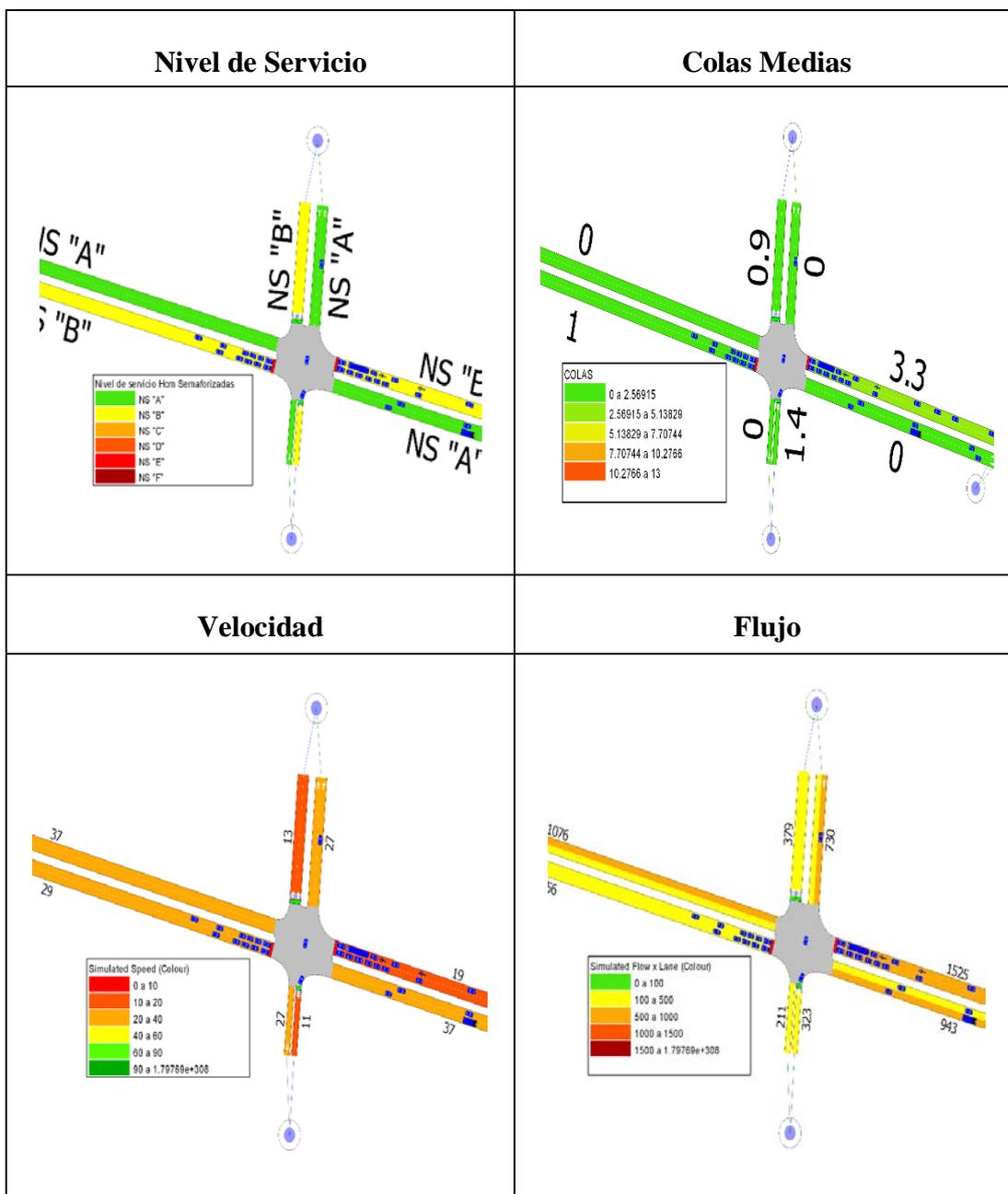
Figura 2-30 Parámetros operacionales Intersección 4  
Fuente: Aimsun

2.6.5. Intersección 5: Av. 10 de Agosto y Av. Fray Vicente Solano





### 2.6.6. Intersección 6: Av. 10 de Agosto y Av. Roberto Crespo Toral



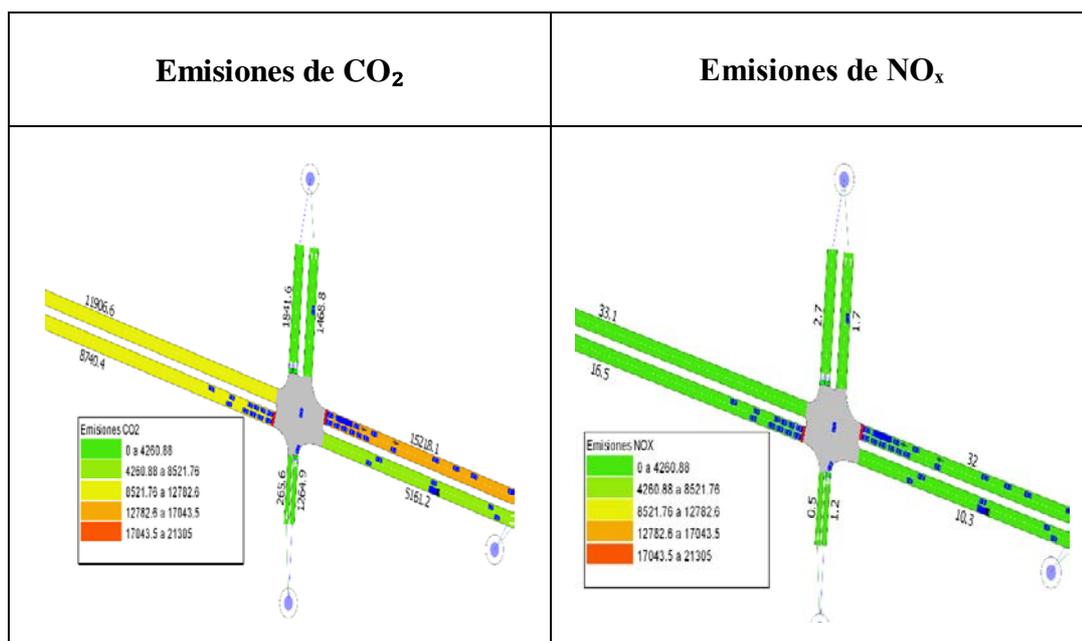
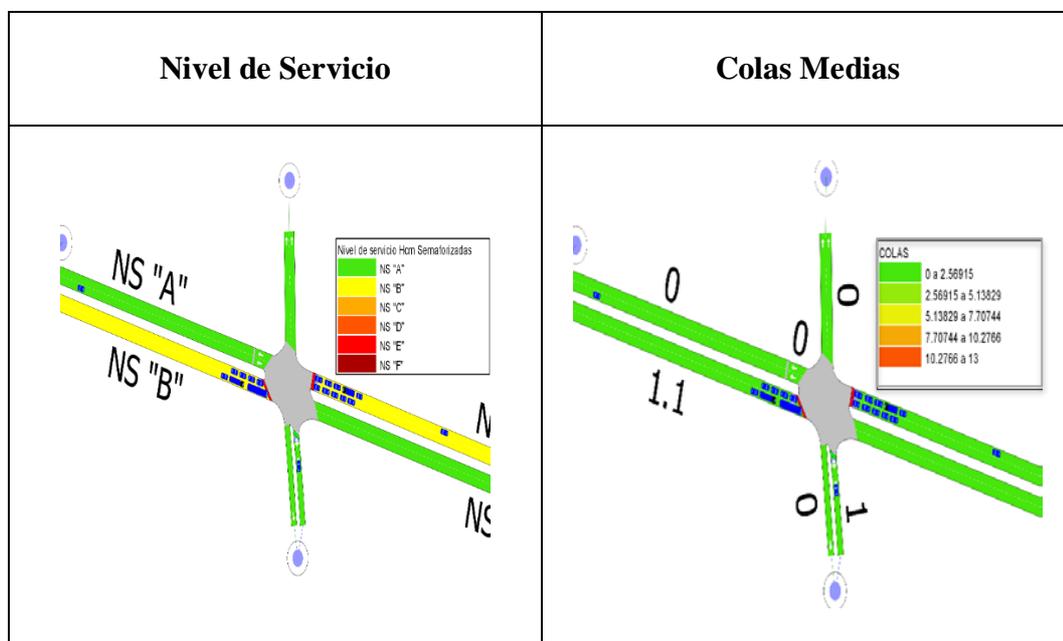


Figura 2-32 Parámetros operacionales Intersección 6

Fuente: Aimsun

**2.6.7. Intersección 7: Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso**



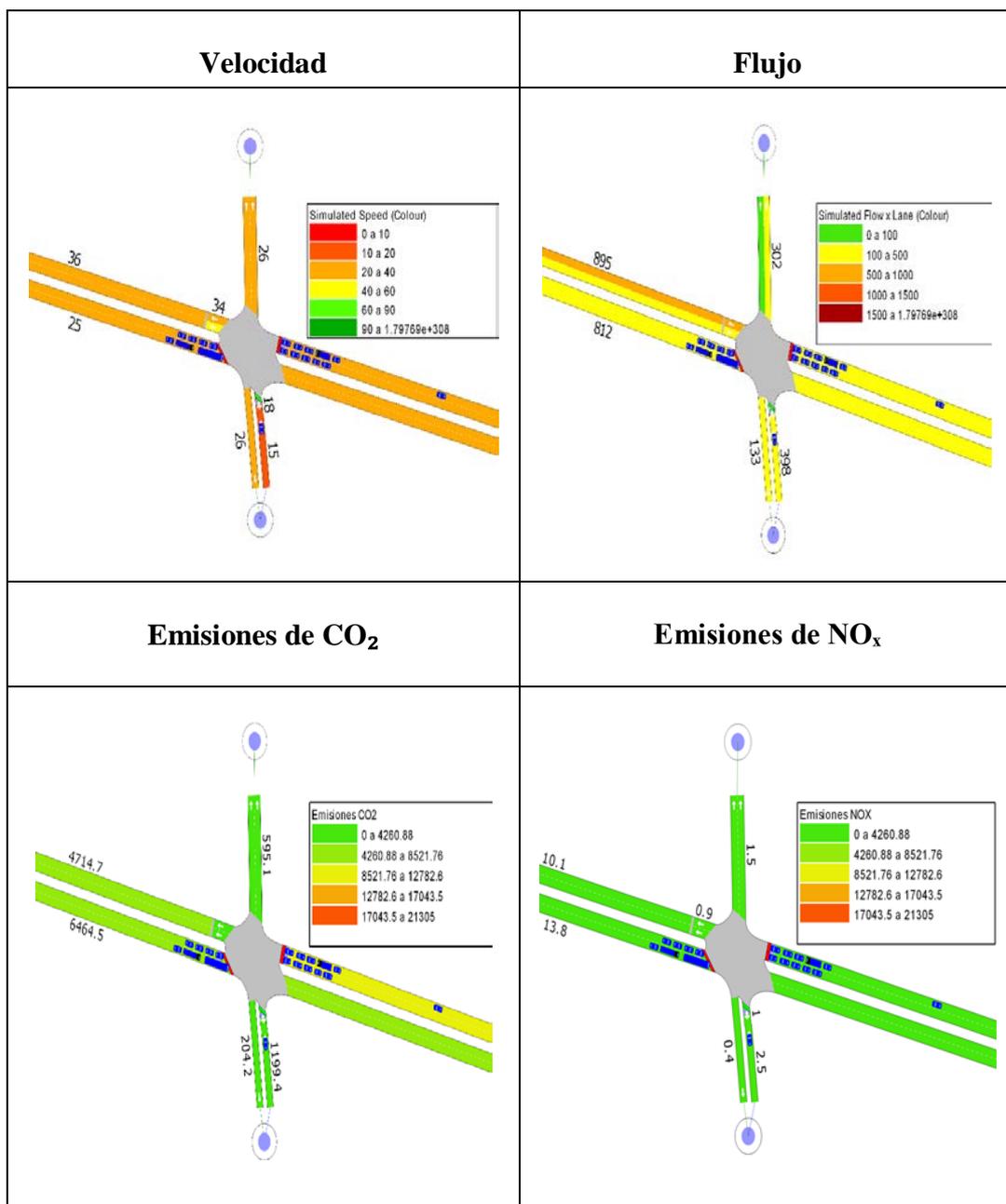
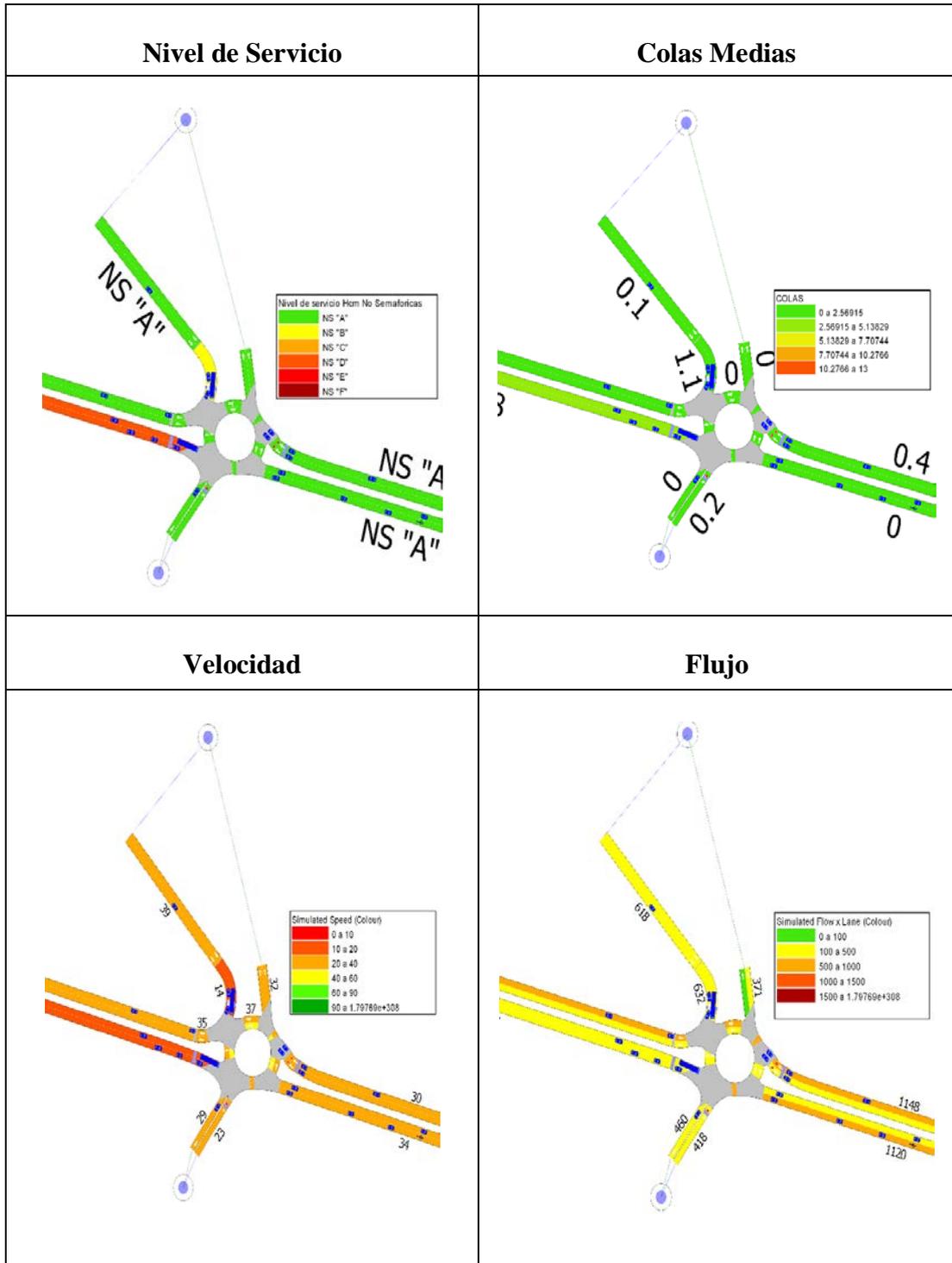


Figura 2-33 Parámetros operacionales Intersección 7  
Fuente: Aimsun

**2.6.8. Intersección 8: Av. 10 de Agosto y Av. 27 de Febrero**



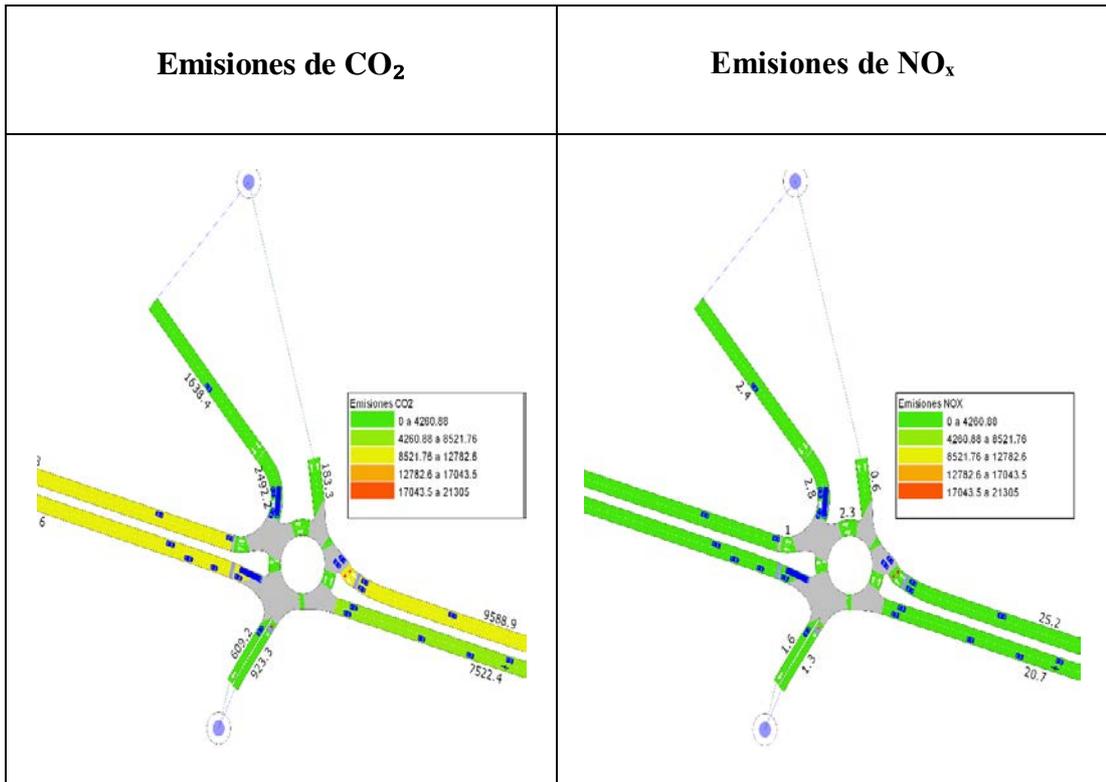
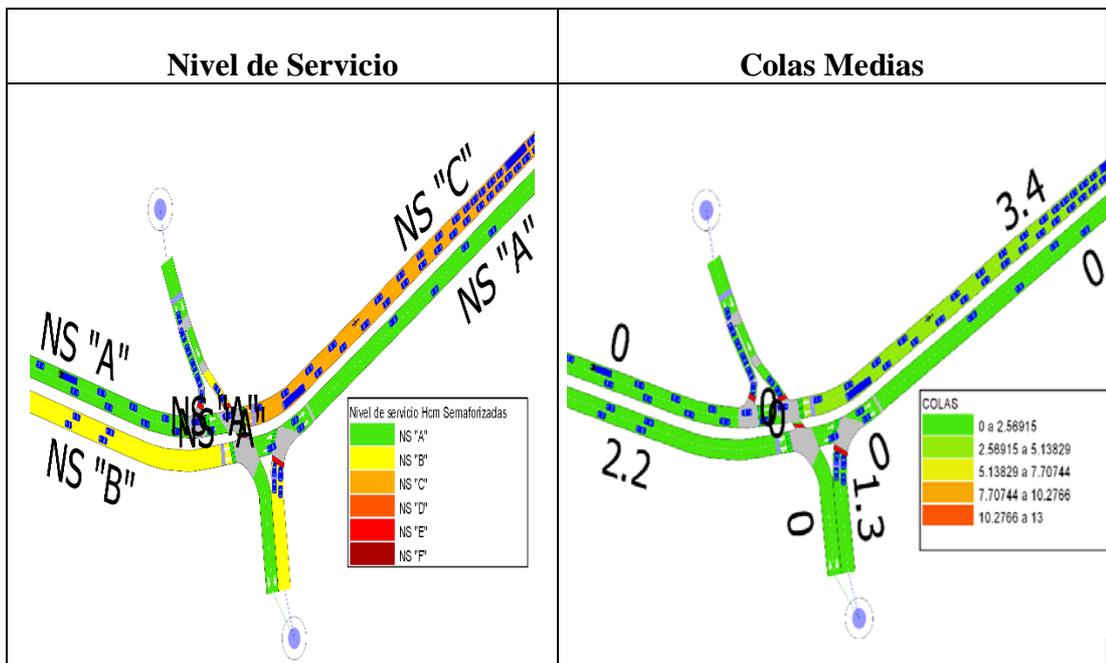


Figura 2-34 Parámetros operacionales Intersección 8  
Fuente: Aimsun

**2.6.9. Intersección 9: Av. 10 de Agosto y Calle de las Herrerías**



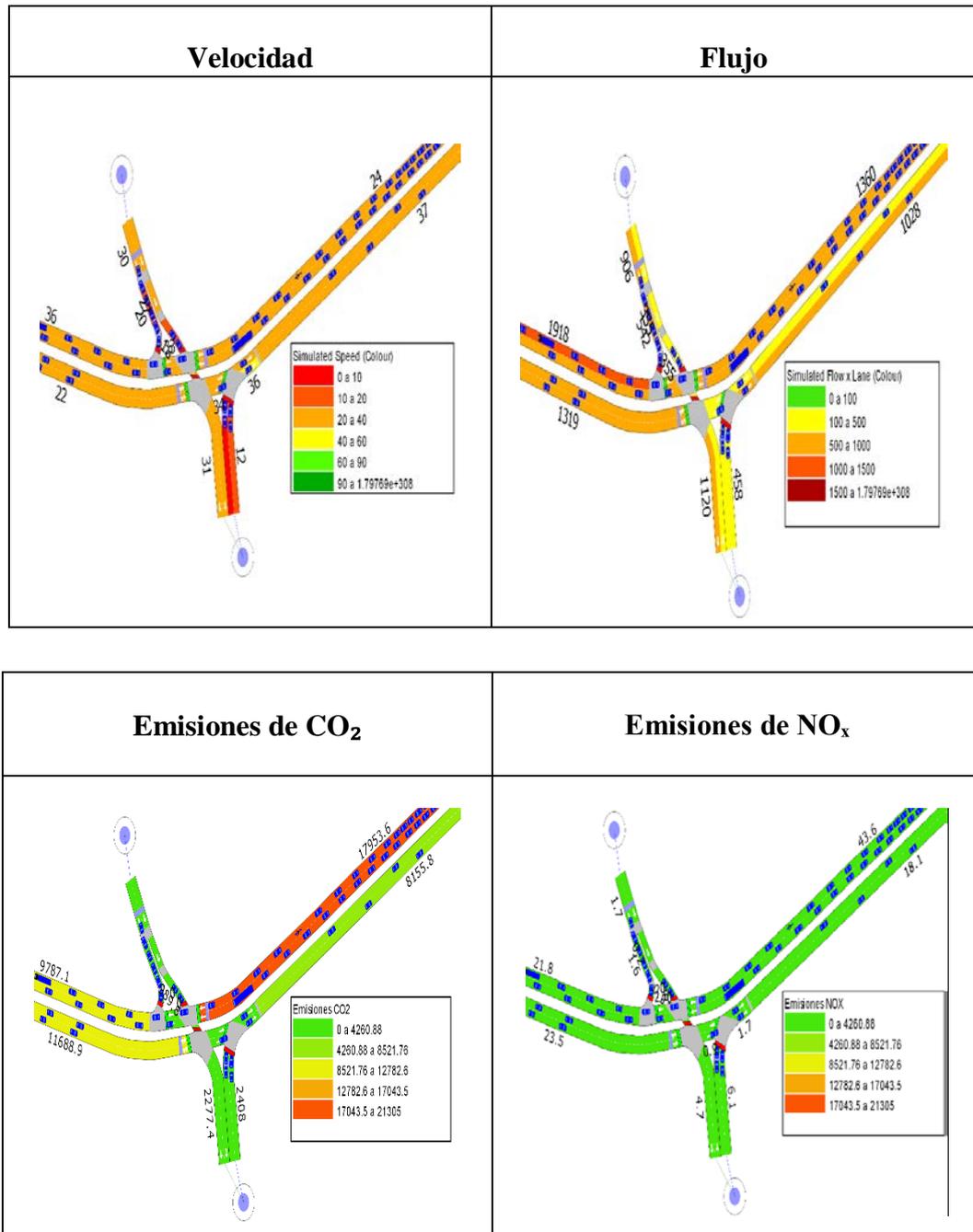
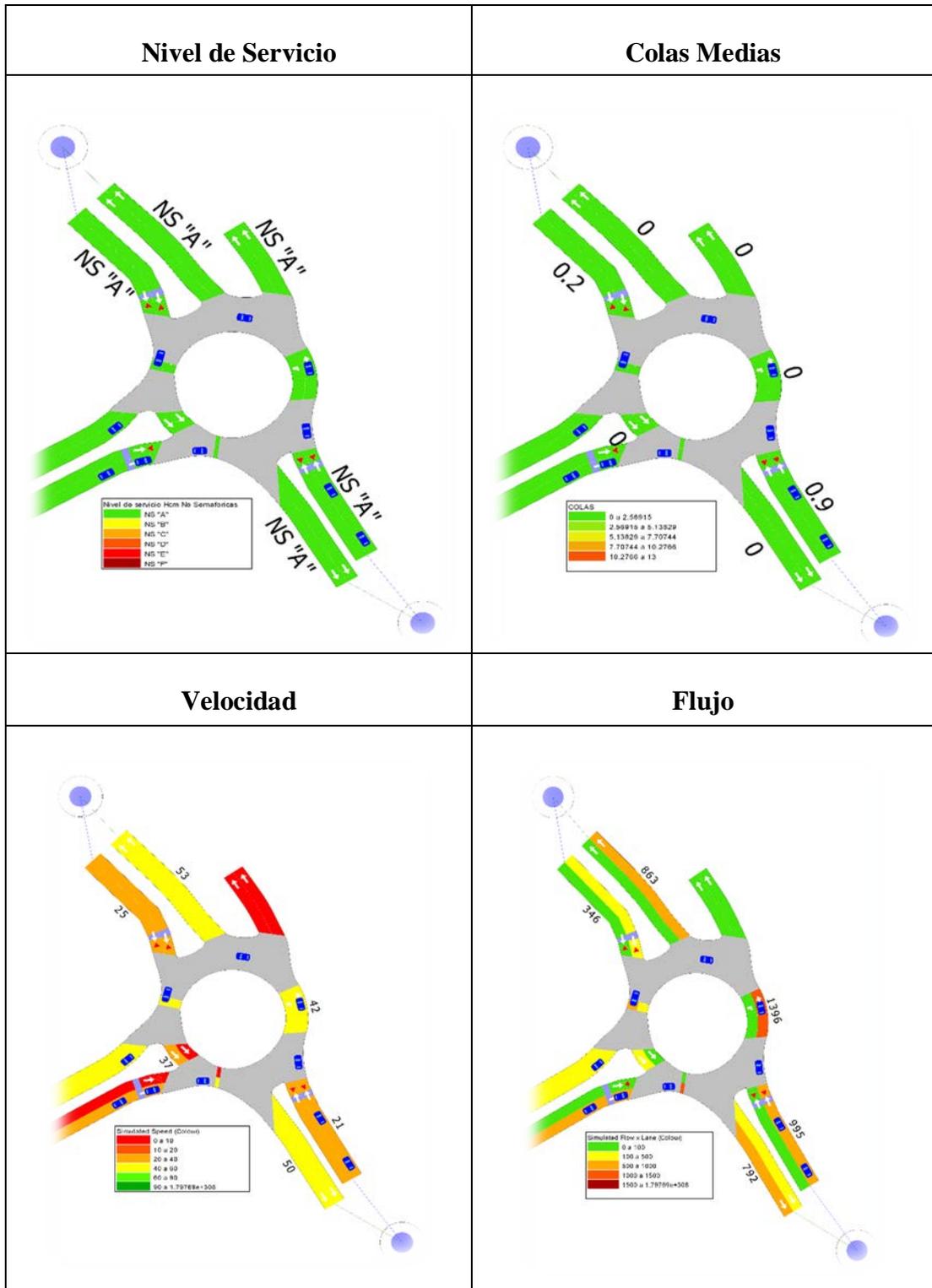


Figura 2-35 Parámetros operacionales Intersección 9  
Fuente: Aimsun

**2.6.10. Intersección 10: Av. 10 de Agosto y Av. del Paraíso**



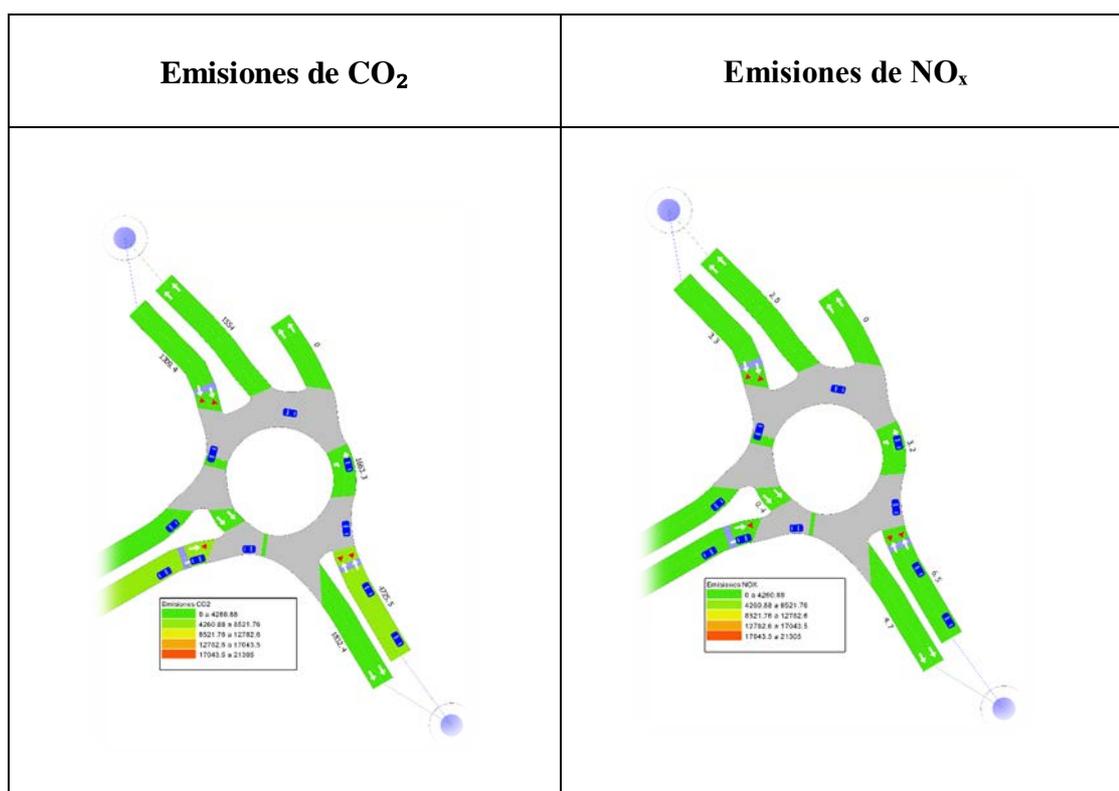


Figura 2-36 Parámetros operacionales Intersección 10  
Fuente: Aimsun

### 2.6.11. Resultados de modelación de la Red Vial completa

De manera adicional a la información detalla de forma individual de cada intersección, y con el propósito de evaluar toda la red de análisis de forma global, en la siguiente tabla se observa los principales parámetros de ingeniería de tránsito y los valores de las emisiones de contaminantes de toda la red.

Tabla 2-33 Resultados de modelación de la Red Vial completa

Serie Temporal	Valor	Desviación Estándar	Unidades
Cola Media - Todo	161.16	5.07	veh
Cola Media - Car	147.78	4.85	veh
Cola Media - Truck	5.04	0.56	veh
Cola Media - Bus	3.99	0.24	veh
Cola Media - dos ruedas	4.36	0.21	veh
Densidad - Todo	19.2	0.3	veh/km
Densidad - Car	17.68	0.29	veh/km
Densidad - Truck	0.51	0.04	veh/km
Densidad - Bus	0.49	0.02	veh/km

Densidad - dos ruedas	0.51	0.03	veh/km
Distancia Total de Viaje - Todo	8378.11	95.21	km
Distancia Total de Viaje - Car	7794.18	82.64	km
Distancia Total de Viaje - Truck	184.17	9.66	km
Distancia Total de Viaje - Bus	200.1	6.66	km
Distancia Total de Viaje - dos ruedas	199.65	16.16	km
Emisión IEM - CO2 - Todo	3360898.91	ND	g
Emisión IEM - CO2 - Car	2574312.29	ND	g
Emisión IEM - CO2 - Truck	441100.61	ND	g
Emisión IEM - CO2 - Bus	272229.68	ND	g
Emisión IEM - CO2 - dos ruedas	73256.34	ND	g
Emisión IEM - NOx - Todo	8892.94	ND	g
Emisión IEM - NOx - Car	3163.16	ND	g
Emisión IEM - NOx - Truck	3384.13	ND	g
Emisión IEM - NOx - Bus	2301.71	ND	g
Emisión IEM - NOx - dos ruedas	43.94	ND	g
Flujo - Todo	28482.4	228.29	veh/h
Flujo - Car	26538.2	194.91	veh/h
Flujo - Truck	581	33.98	veh/h
Flujo - Bus	645	20.04	veh/h
Flujo - dos ruedas	718.2	51.87	veh/h
Flujo de Entrada - Todo	28540.2	233.08	veh/h
Flujo de Entrada - Car	26589.6	196.9	veh/h
Flujo de Entrada - Truck	582	31.9	veh/h
Flujo de Entrada - Bus	648.8	20.83	veh/h
Flujo de Entrada - dos ruedas	719.8	49.52	veh/h
Número de Cambios de Carril - Todo	896.79	11.61	#/km
Número de Cambios de Carril - Car	846.96	10.3	#/km
Número de Cambios de Carril - Truck	13.64	1.82	#/km
Número de Cambios de Carril - Bus	11.98	1.25	#/km
Número de Cambios de Carril - dos ruedas	24.21	2.33	#/km
Número Total de Paradas - Todo	111957.18	2103.74	
Número Total de Paradas - Car	104460.49	2138.87	
Número Total de Paradas - Truck	2073.38	184.79	
Número Total de Paradas - Bus	2267.1	113.52	
Número Total de Paradas - dos ruedas	3156.21	203.66	

Tiempo de Demora - Todo	110.25	2.83	seg/km
Tiempo de Demora - Car	109.23	2.88	seg/km
Tiempo de Demora - Truck	138.18	10.23	seg/km
Tiempo de Demora - Bus	116.44	2.74	seg/km
Tiempo de Demora - dos ruedas	120.07	6.59	seg/km
Tiempo de Parada - Todo	98.12	2.6	seg/km
Tiempo de Parada - Car	96.99	2.65	seg/km
Tiempo de Parada - Truck	128.34	10.6	seg/km
Tiempo de Parada - Bus	103.11	2.92	seg/km
Tiempo de Parada - dos ruedas	110.97	6.28	seg/km
Tiempo de Viaje - Todo	217.27	2.81	seg/km
Tiempo de Viaje - Car	215.56	2.91	seg/km
Tiempo de Viaje - Truck	254.41	10.85	seg/km
Tiempo de Viaje - Bus	228.55	3.07	seg/km
Tiempo de Viaje - dos ruedas	240.22	6.59	seg/km
Tiempo Total de Viaje - Todo	443.81	7.66	h
Tiempo Total de Viaje - Car	408.84	7.3	h
Tiempo Total de Viaje - Truck	11.8	0.92	h
Tiempo Total de Viaje - Bus	11.37	0.48	h
Tiempo Total de Viaje - dos ruedas	11.8	0.78	h
Velocidad - Todo	22.8	0.2	km/h
Velocidad - Car	22.98	0.21	km/h
Velocidad - Truck	19.62	0.37	km/h
Velocidad - Bus	21.01	0.27	km/h
Velocidad - dos ruedas	20.37	0.46	km/h
Velocidad Harmónica - Todo	16.57	0	km/h
Velocidad Harmónica - Car	16.7	0	km/h
Velocidad Harmónica - Truck	14.15	0	km/h
Velocidad Harmónica - Bus	15.75	0	km/h
Velocidad Harmónica - dos ruedas	14.99	0	km/h

*Fuente: Aimsun*

## 2.7. Emisiones de contaminantes del aire en las intersecciones en estudio

En la siguiente tabla se detalla los valores de las emisiones calculadas con el uso de la herramienta informática Aimsun 8.1 a través de su módulo de emisiones instantáneas, cabe mencionar que los valores descritos corresponde a cada acceso a las intersecciones objeto de análisis, es importante destacar que se ha considerado una longitud de acceso de 20.00 antes de llegar a la intersección para la determinación de los valores.

Destacamos que en el siguiente capítulo se establecerá un método de cálculo para definir las emisiones globales de cada intersección, tomando en consideración las emisiones de cada acceso.

Tabla 2-34 Resultados de por acceso de cada intersección

<b>INTERSECCION 1</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. LOJA OESTE-ESTE	867	13	19778,61	48,69
AV 10 DE AGOSTO NORTE-SUR	1275,6	13	23034,97	59,88
AV. 10 DE AGOSTO SUR-NORTE	502,4	15,87	8457,83	23,29
<b>TOTAL</b>	<b>2645</b>	<b>14</b>	<b>51271</b>	<b>132</b>
<b>INTERSECCION 2</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. PICHINCHA SUR-NORTE	712,8	8	25289	60
AV. PICHINCHA NORTE-SUR	460,2	15	12882	42
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	704	13	20381	53
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	434,2	15	11205	28
<b>TOTAL</b>	<b>2311,2</b>	<b>13</b>	<b>69756</b>	<b>183</b>
<b>INTERSECCION 3</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. RICARDO MUÑOZ DAVILA SUR-NORTE	920,6	16	25369	73
AV. RICARDO MUÑOZ DAVILA NORTE-SUR	642,4	14	17872	41
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	589,6	18	15303	30
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	742,4	16	19671	46
<b>TOTAL</b>	<b>2895</b>	<b>16</b>	<b>78214</b>	<b>190</b>
<b>INTERSECCION 4</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. 27 DE FEBRERO SUR-NORTE	273,4	10	7273	22
AV. AGUSTÍN CUEVA VALLEJO NORTE-SUR	460,4	9	11314	13
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	873,8	24	13041	23
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	757,8	18	11607	13
<b>TOTAL</b>	<b>2365,4</b>	<b>15</b>	<b>43234</b>	<b>71</b>
<b>INTERSECCION 5</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. FRAY VICENTE SOLANO SUR-NORTE	1237,6	14	32686	59

AV. FRAY VICENTE SOLANO NORTE-SUR	1296,2	11	37381	63
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	488,4	8	21880	70
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	973	6	20401	44
<b>TOTAL</b>	3995,2	10	112348	236
<b>INTERSECCION 6</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. ROBERTO CRESPO TORAL SUR-NORTE	304,8	12	6409	7
AV. ROBERTO CRESPO TORAL NORTE-SUR	388	10	8491	13
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	723,4	22	12000	27
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	1321,8	10	27304	66
<b>TOTAL</b>	2738	14	54203	112
<b>INTERSECCION 7</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. FRANCISCO MOSCOSO SUR-NORTE	400,4	14	7965	14
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	878,4	14	16081	39
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	786	9	14155	32
<b>TOTAL</b>	2064,8	12	38202	86
<b>INTERSECCION 8</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. 27 DE FEBRERO SUR-NORTE	445	20	5536	9
AV. PAUCARBAMBA NORTE-SUR	668,2	12	16761	17
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	636,2	5	25079	78
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	1116,4	17	14925	30
<b>TOTAL</b>	2865,8	13	62302	134
<b>INTERSECCION 9</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. DE LAS HERRERIAS NORTE-SUR	482,6	14,05	10349,45	24,75
AV. GAPAL SUR-NORTE	892,4	17,295	15617,76	18,64
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	1290,8	16,61	23891,86	45,03
AV. 10 DE AGOSTO ESTE-OESTE	1283,2	15,87	20409,35	53,01
<b>TOTAL</b>	3949	16	70268	141
<b>INTERSECCION 10</b>				
<b>ACCESO</b>	<b>FLUJO (veh)</b>	<b>VELOCIDAD (km/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g)</b>
AV. PARAISO NORTE-SUR	346,4	23,25	13240,51	19,9
AV. PARAISO SUR-NORTE	1013,2	23,11	26791,91	34,43
AV. 10 DE AGOSTO OESTE-ESTE	843	23,45	12801,09	16,41
<b>TOTAL</b>	2202,6	23	52834	71

Fuente: Autor a partir de Aimsun

## 2.8. Validación de los resultados de Emisiones con IVE

### 2.8.1. Ingreso de información en el IVE

Para la presente investigación es indispensable el corroborar que los resultados de las emisiones de contaminantes obtenidos por medio del software de microsimulación Aimsun 8.1 sean confiables, por ello y con el apoyo de la herramienta informática “IVE” *International Vehicle Emissions* en su versión 2.0.2, usando la base de datos de Bogotá del año 2005, ésta base se ha seleccionado ya que Bogotá presenta condiciones geográficas similares a las de Cuenca, de manera específica los datos seleccionados corresponden a vías arteriales, partiendo de esta información se generaron los modelos correspondientes a vehículos livianos, pesados y buses, lo anterior se puede visualizar en la siguiente figura.

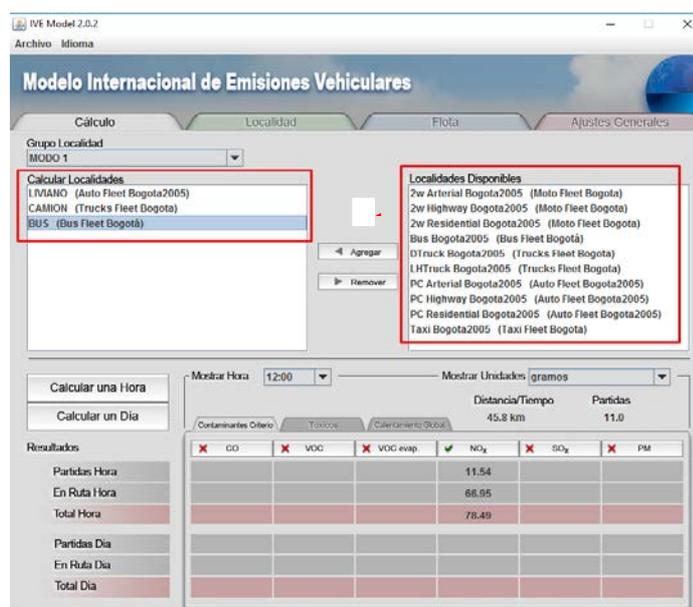


Figura 2-37 Base de datos para IVE

Fuente: Autor a partir de IVE

Una vez propuestos los escenarios a analizar se procedió a llenar la información correspondiente al área de estudio, dentro del cual se requiere ingresar la altura a la cual se encuentra la ciudad de Cuenca, el contenido de azufre, benceno, plomo y oxigenados del combustible utilizado, la pendiente del tramo, la humedad y temperatura de la zona, distancia total de recorrido por cada tipo de vehículo, cuantas partidas se realizaron en ese tramo y la velocidad promedio, estos factores fueron obtenidos a partir de los resultados de la modelación en Aimsun.



Figura 2-40 Información ingresada para Buses  
Fuente: Autor a partir de IVE

Para finalizar, una vez introducidos los datos particulares de cada tramo para los diferentes tipos de vehículos, se obtienen los valores correspondientes a las estimaciones de emisiones, en las siguientes figuras se ejemplifica lo dicho.

Mostrar Hora: 12:00 | Mostrar Unidades: gramos

Distancia/Tiempo: 45.8 km | Partidas: 11.0

Contaminantes Criterio | Tóxicos | Calentamiento Global

Contaminante	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
✓	214.33	✗	✗
	12135.38		
	12349.71		

Mostrar Hora: 12:00 | Mostrar Unidades: gramos

Distancia/Tiempo: 45.8 km | Partidas: 11.0

Contaminantes Criterio | Tóxicos | Calentamiento Global

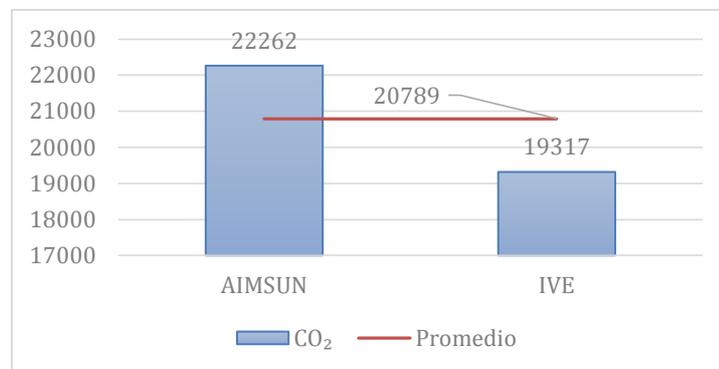
Contaminante	CO	VOC	VOC evap.	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM
✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
				11.54		
				66.95		
				78.49		

Figura 2-41 Resultados obtenidos de NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>  
Fuente: Autor a partir de IVE

## 2.8.2. Análisis comparativo de emisiones entre Aimsun e IVE

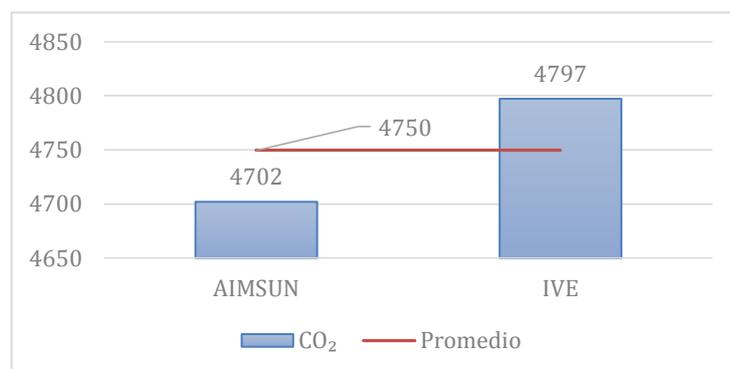
Una vez que se han obtenido los resultados de emisiones determinados por el software IVE, se procede a compararlos con los valores obtenidos aplicando el módulo de emisiones instantáneas determinado por Aimsun, por lo extensa de la información a continuación se presentan los resultados promedios de toda la red y para accesos de diversas intersecciones del área de estudio.

En la siguiente figura se muestra la emisión promedio de toda la red de CO<sub>2</sub> determinada por Aimsun con un promedio de 22262 gramos, mientras que el promedio de emisiones determinada por IVE es de 19317 gramos, lo que representa una variación de 13%.



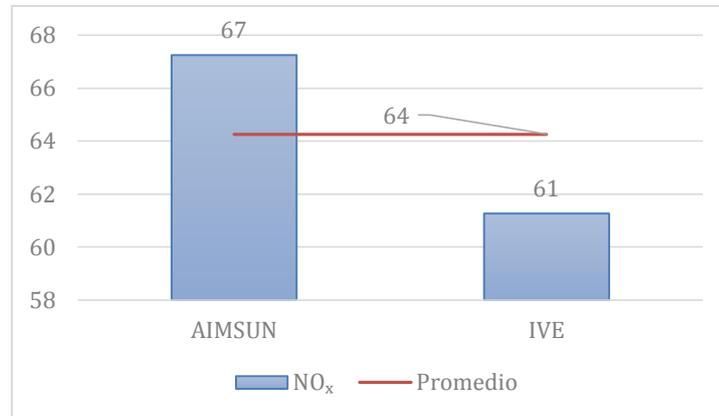
*Figura 2-42 Comparación de CO<sub>2</sub> promedio de la red entre Aimsun e IVE*  
Fuente: Autor

Analizando el acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha el modelo Aimsun determinó 4702 gramos de CO<sub>2</sub> contra 4797 gramos que determinó IVE, lo cual representa una variación del 2%.



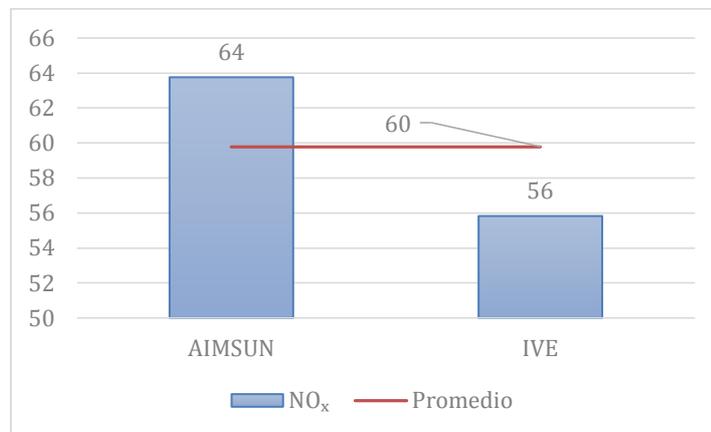
*Figura 2-43 Comparación de CO<sub>2</sub> Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha*  
Fuente: Autor

Con respecto a las emisiones de  $\text{NO}_x$ , en la siguiente figura se muestra la emisión promedio de toda la red de  $\text{NO}_x$  determinada por Aimsun con un promedio de 67.25 gramos, mientras que el promedio de emisiones determinada por IVE es de 61.27 gramos, lo que representa una variación de 9%.



*Figura 2-44 Comparación de  $\text{NO}_x$  promedio de la red entre Aimsun e IVE*  
Fuente: Autor

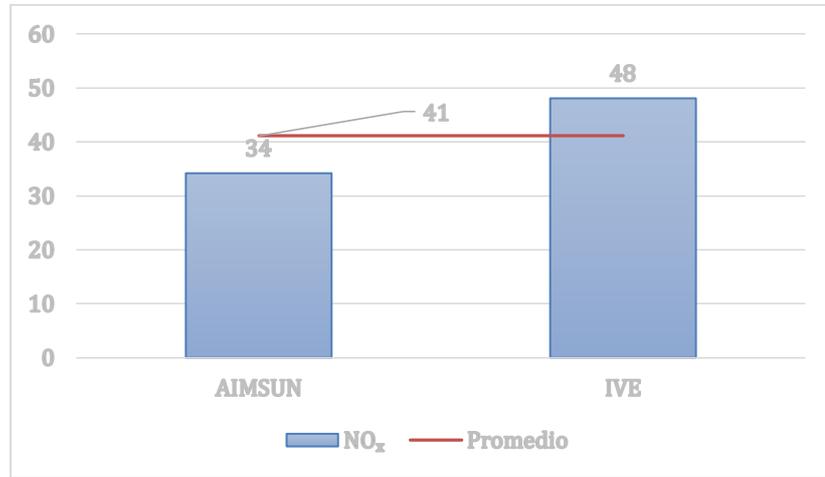
En el acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha el modelo Aimsun calculó 63.76 gramos mientras IVE calculó 55.83 gramos existiendo una diferencia de 12%.



*Figura 2-45 Comparación de  $\text{NO}_x$  Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Pichincha*  
Fuente: Autor

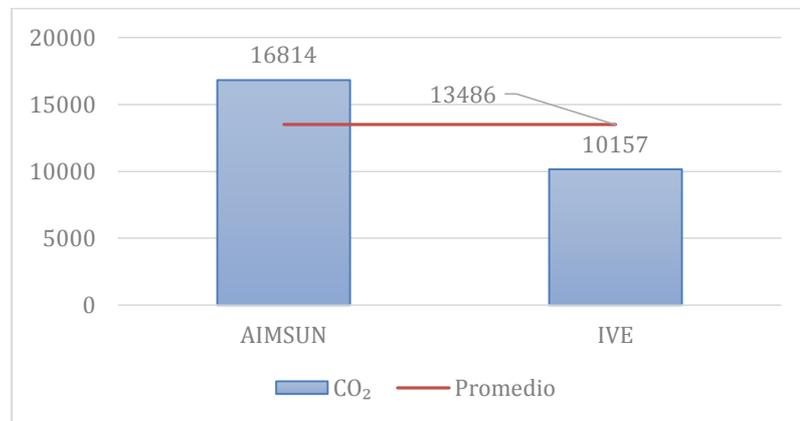
Como se puede observar las variaciones en los accesos analizados presentan variaciones dentro de un rango aceptable, pero también existen valores que presentaciones variaciones significativas como se muestran a continuación en las siguientes figuras.

En el acceso de la Av. 10 de Agosto y Francisco Moscoso, el modelo Aimsun calculó 34 gramos de NO<sub>x</sub> mientras que IVE calculó 48 gramos, lo que representa una variación del 41%.



*Figura 2-46 Comparación de NO<sub>x</sub> Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso*  
Fuente: Autor

En el acceso de la Av. 10 de Agosto y Francisco Moscoso, el modelo Aimsun calculó 16814 gramos de CO<sub>2</sub> mientras que IVE calculó 10157 gramos, los valores difieren en 39%.



*Figura 2-47 Comparación de CO<sub>2</sub> Tramo de acceso de la Av. 10 de Agosto y Av. Francisco Moscoso*  
Fuente: Autor

Una representación gráfica de la determinación de los principales parámetros operacionales y emisiones en toda el área de estudio se ilustra en las siguientes figuras.

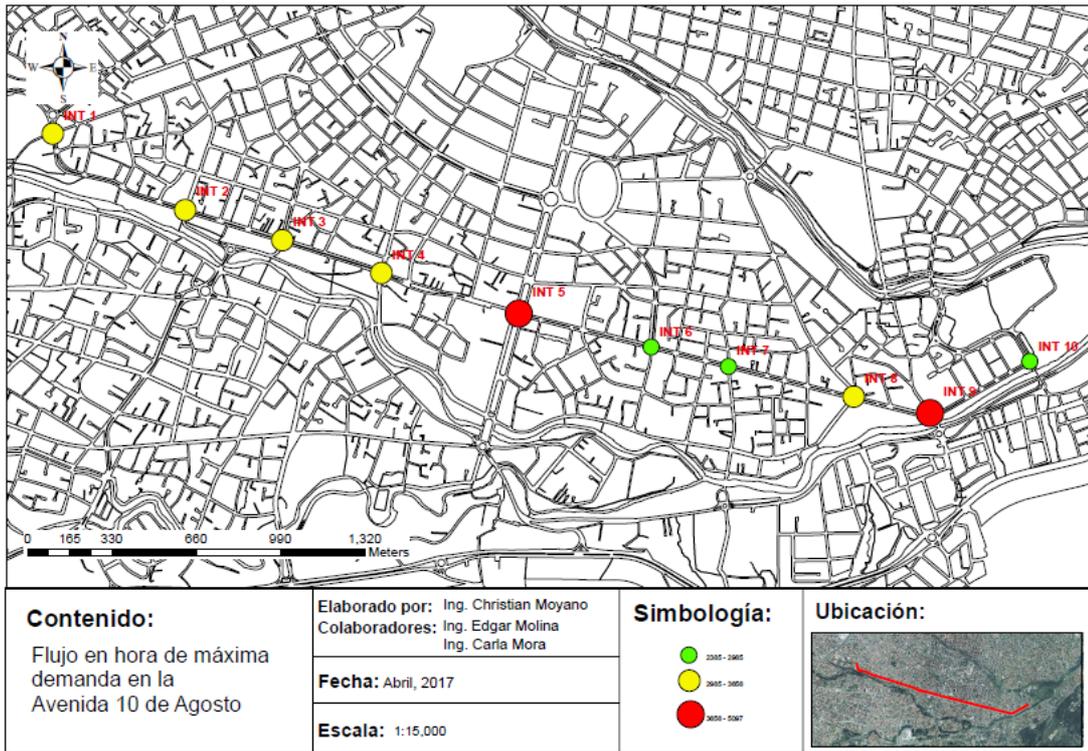


Figura 2-48 Representación Horas de Máxima Demanda en toda la Red  
Fuente: Autor a partir de GIS

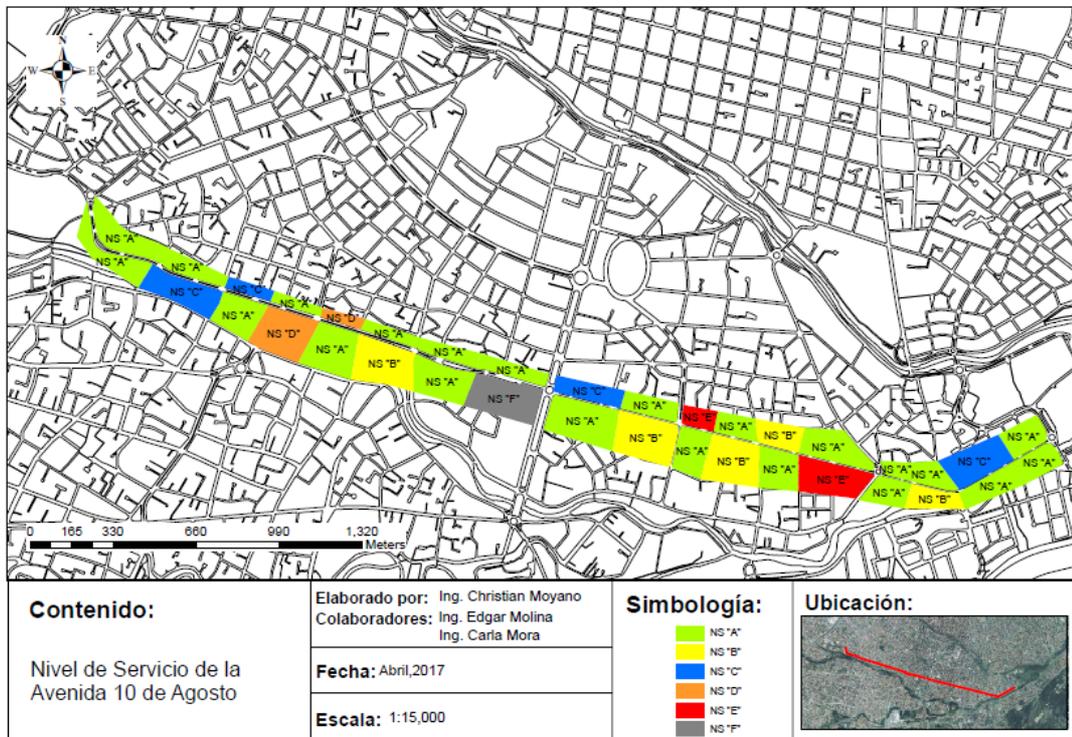


Figura 2-49 Representación Horas de Máxima Demanda en toda la Red  
Fuente: Autor a partir de GIS

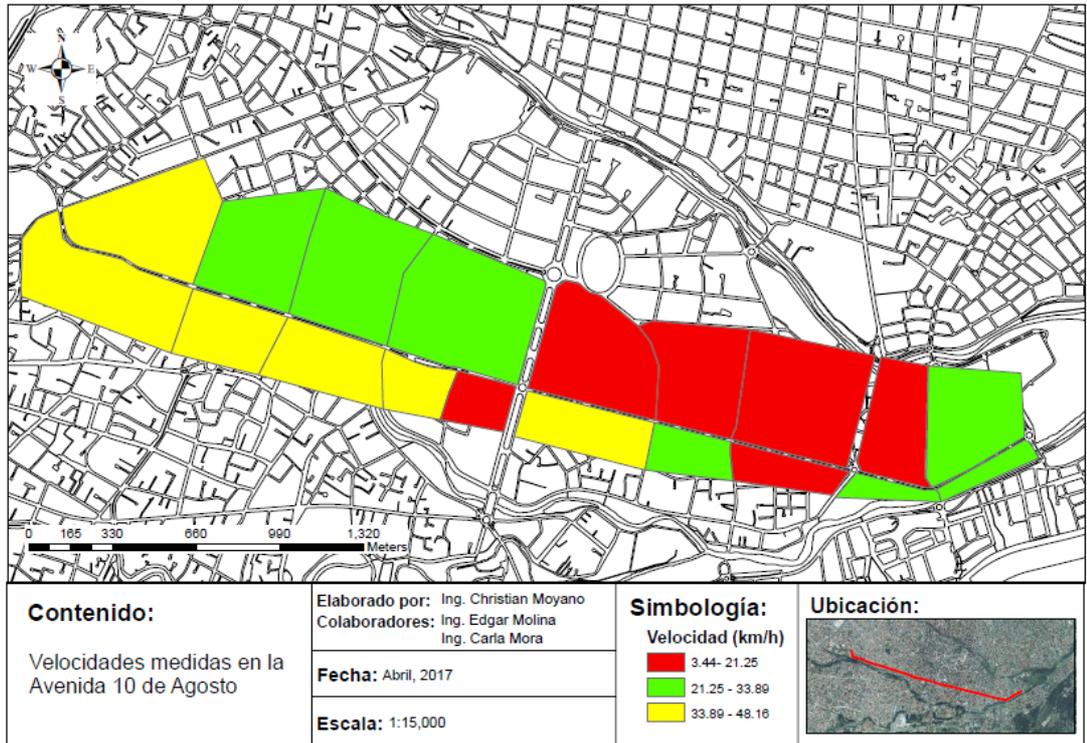


Figura 2-50 Representación Velocidades en toda la Red  
 Fuente: Autor a partir de GIS

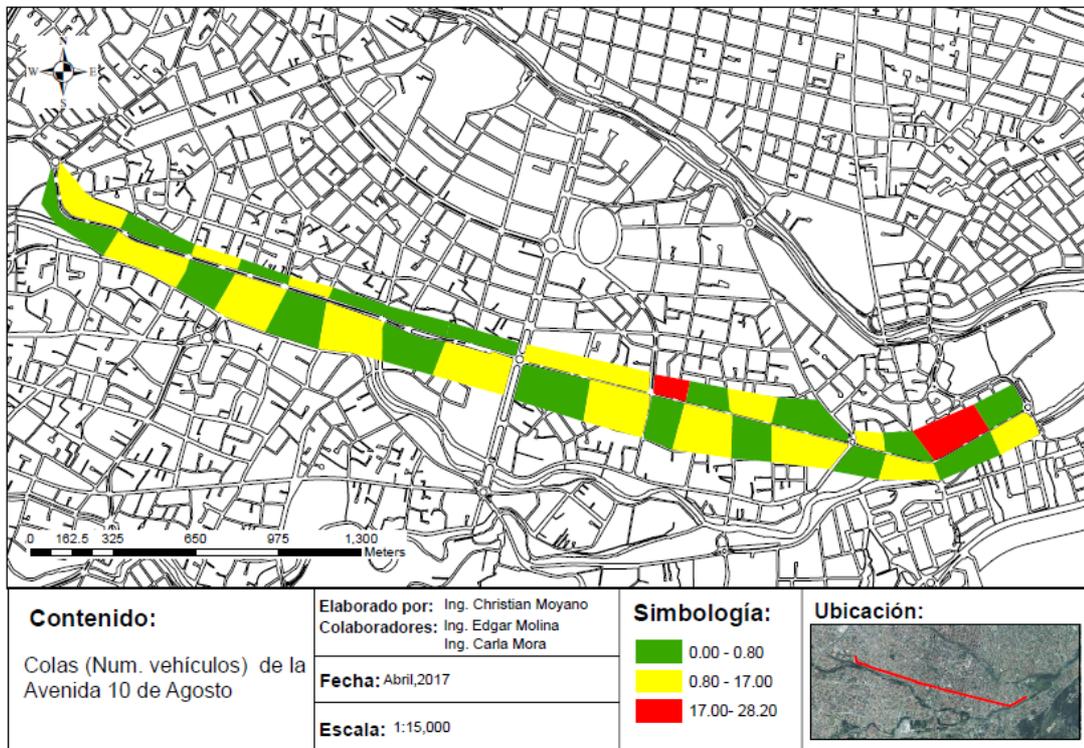


Figura 2-51 Representación Colas en toda la Red  
 Fuente: Autor a partir de GIS

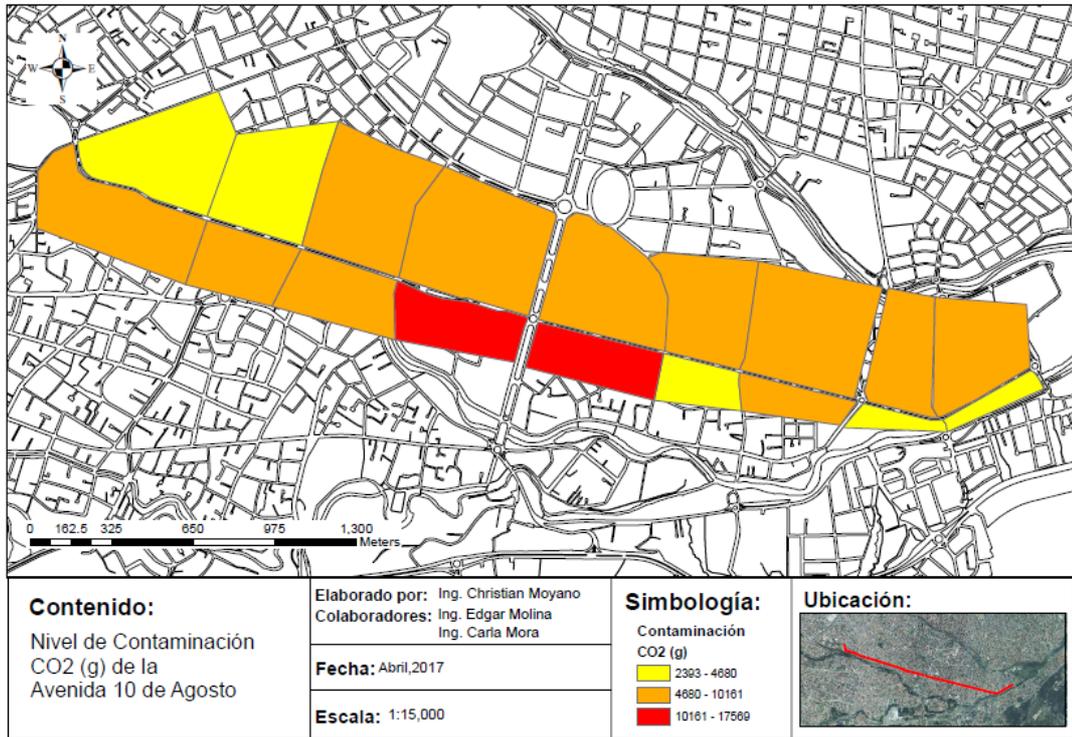


Figura 2-52 Representación Emisiones CO<sub>2</sub> en toda la Red

Fuente: Autor a partir de GIS

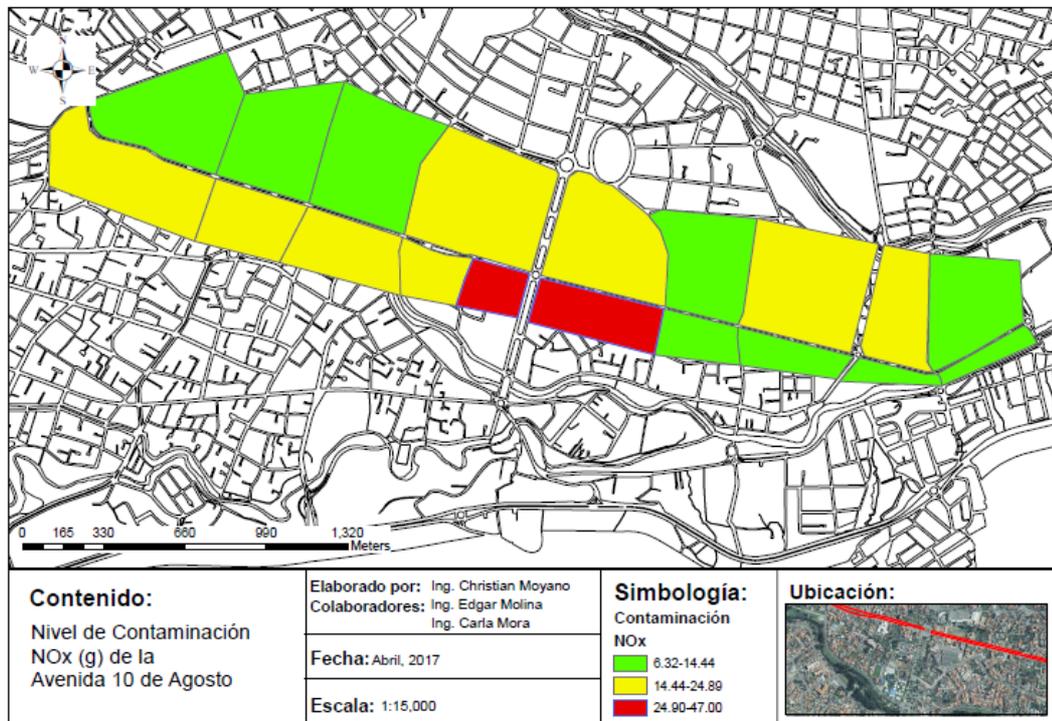


Figura 2-53 Representación Emisiones NO<sub>x</sub> en toda la Red

Fuente: Autor a partir de GIS

## CAPITULO 3

### **DETERMINACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y METODOLOGÍA PROPUESTA PARA ESTUDIOS DE IMPACTO SOBRE LA RED VIAL**

En el presente capítulo se establece un modelo matemático que relaciona los flujos y velocidades vehiculares con los valores de emisiones de contaminantes a partir de los datos obtenidos en este estudio, mediante la aplicación de ecuaciones directas sencillas, finalmente se propone una metodología para su aplicación en los estudios de impacto sobre la red vial que rigen en la ciudad de Cuenca.

#### **3.1. Modelo Matemático de estimación de emisiones a partir de Aimsun.**

A lo largo de la presente investigación se ha justificado la necesidad de ampliar el alcance de los Estudios de Impacto sobre la Red Vial que requieren el GAD de Cuenca para cierto tipo de emplazamientos públicos y privados, considerando así el impacto que tendría el congestionamiento vehicular sobre la calidad del aire, un mecanismo para realizar este diagnóstico es con el uso de la herramienta informática Aimsun 8.1, lastimosamente la disponibilidad de una herramienta informática con estas características es muy limitada ya que por su costo está al alcance únicamente de instituciones académicas (Universidad del Azuay) e instituciones públicas (GAD de Cuenca), esto es un impedimento en el objetivo de que se amplíe la aplicación de este tipo de estudios en el medio local.

Existen múltiples modelos para la determinación de emisiones en el ámbito académico, los cuales requieren de una formación matemática extremadamente elevada, restringiendo el campo de aplicación al área netamente investigativa.

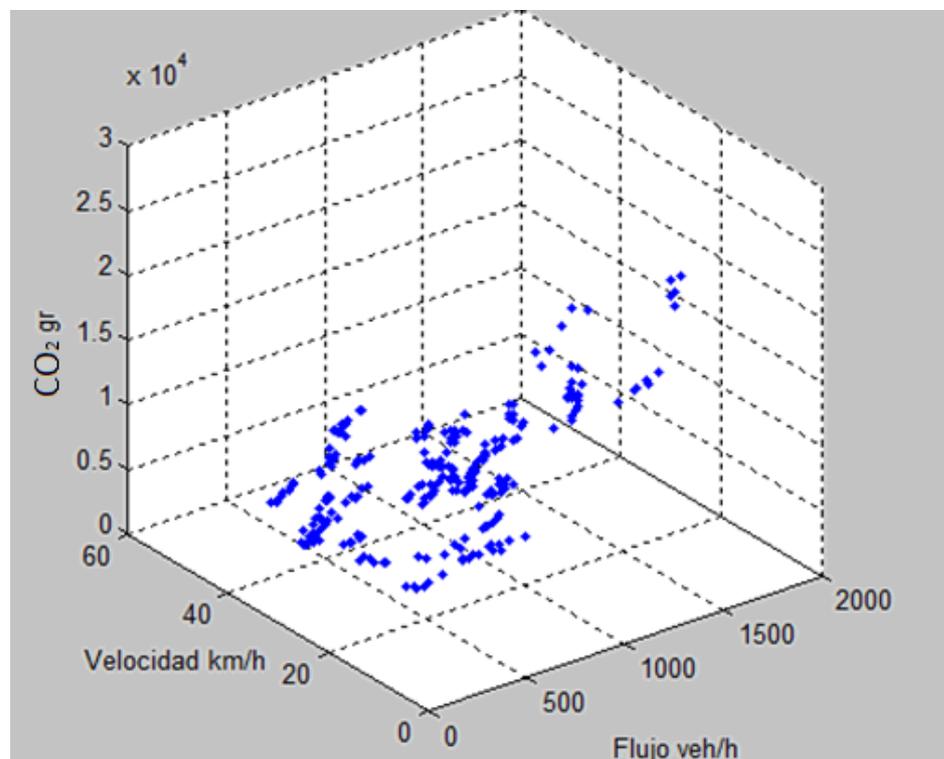
Por otro lado, si bien es cierto el uso de software libre para la determinación de emisiones de contaminantes como el IVE es relativamente sencilla, la base de datos con la que se determinan las emisiones pertenecen a ciudades de realidades muy distintas a las de nuestro medio, tanto en escala del parque automotor como en su composición, por lo que sus resultados podrían no ser fiables.

Todo esto motivó el desarrollo de la presente investigación y como uno de sus objetivos específicos, se desarrolla un modelo matemático a partir de las correlaciones entre los parámetros que mejor describen el comportamiento vehicular como son el flujo y la velocidad, con la estimación de las emisiones de los contaminantes del aire estudiados en este proyecto a partir de la información obtenida con el uso de la herramienta Aimsun 8.1.

### 3.1.1. Información base

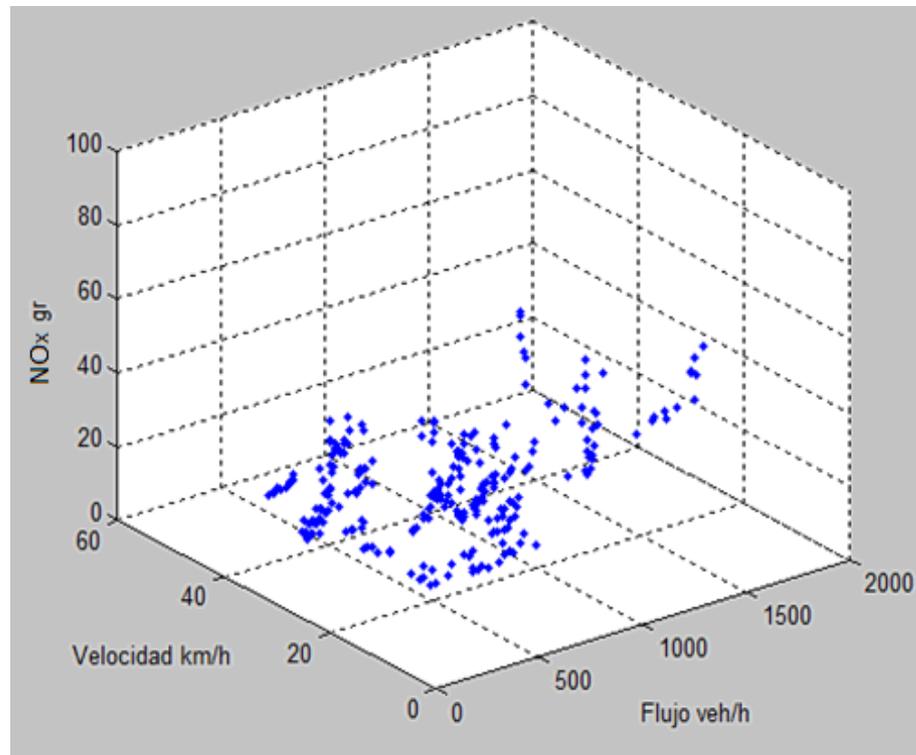
Se ha considerado los valores de las emisiones de contaminantes en los accesos de cada intersección en una longitud de 20 metros, dicha información fue recabada en períodos cada 5 minutos, permitiendo disponer de 456 pares de datos (flujo, velocidad - CO<sub>2</sub>) y 456 pares (flujo, velocidad - NO<sub>x</sub>), dando un total de 912 pares de datos que servirán para la correlación matemática de las variables, en Anexos se adjuntara dicha información.

En la siguiente figura se muestra la relación espacial que existe entre las variables de flujos, velocidades y CO<sub>2</sub>, para lo cual se utilizó la herramienta matemática Matlab.



*Figura 3-1 Relación espacial entre variables CO<sub>2</sub>  
Fuente: Autor a partir de Matlab*

En la siguiente figura se muestra la relación espacial que existe entre las variables de flujos, velocidades y  $\text{NO}_x$ , para lo cual se utilizó la herramienta matemática Matlab.



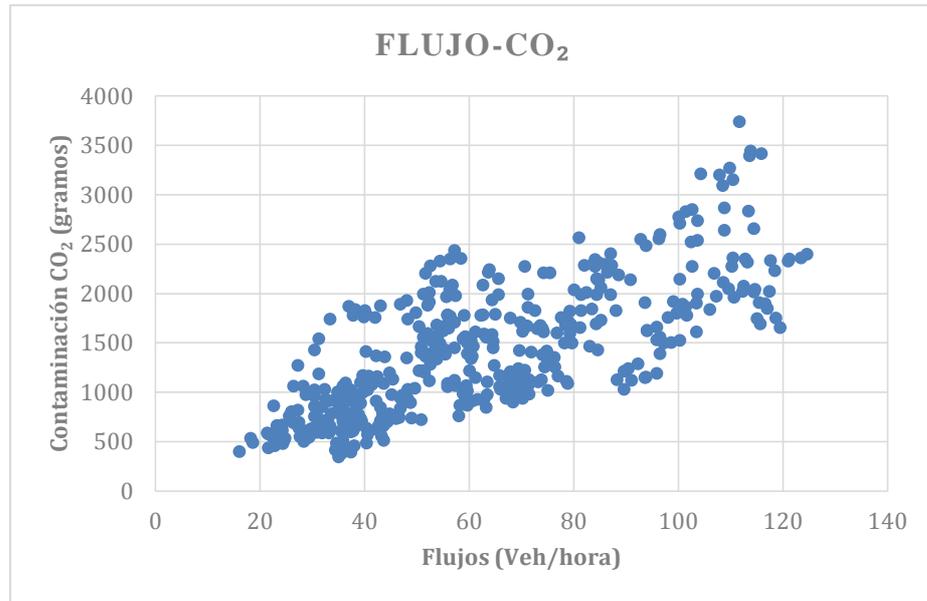
*Figura 3-2 Relación espacial entre variables  $\text{NO}_x$*

*Fuente: Autor a partir de Matlab*

### 3.1.2. Análisis de la información

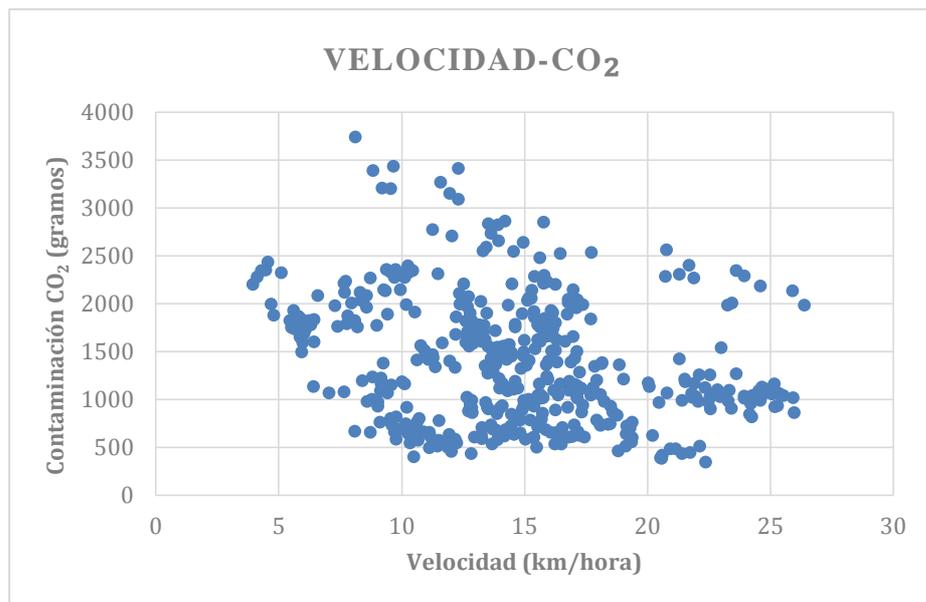
El principal reto para generar un modelo matemático representativo del fenómeno es definir y discretizar la información que presenta un comportamiento homogéneo, el problema radica en que existen comportamientos diferentes entre el flujo y el contaminante y entre la velocidad y el contaminante.

Para describir mejor lo antes descrito, en las siguientes figuras se observa el comportamiento de los parámetros que describen el comportamiento vehicular con cada una de los contaminantes por separado. De manera particular vemos que mientras el flujo vehicular se incrementa las emisiones son mayores, pero cuando las velocidades presentan los menores valores las emisiones se incrementan.



*Figura 3-3 Relación entre Flujo y CO<sub>2</sub>*

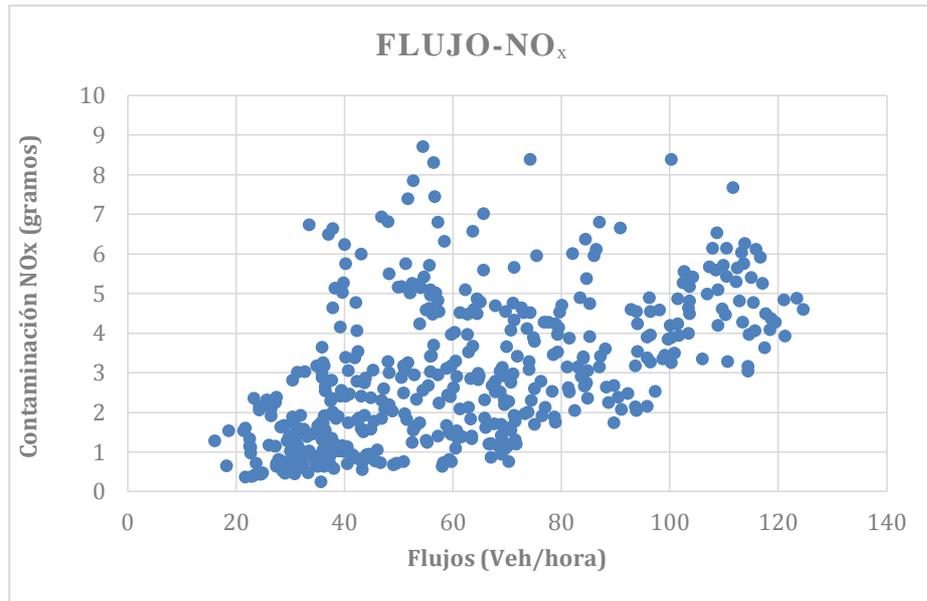
*Fuente: Autor*



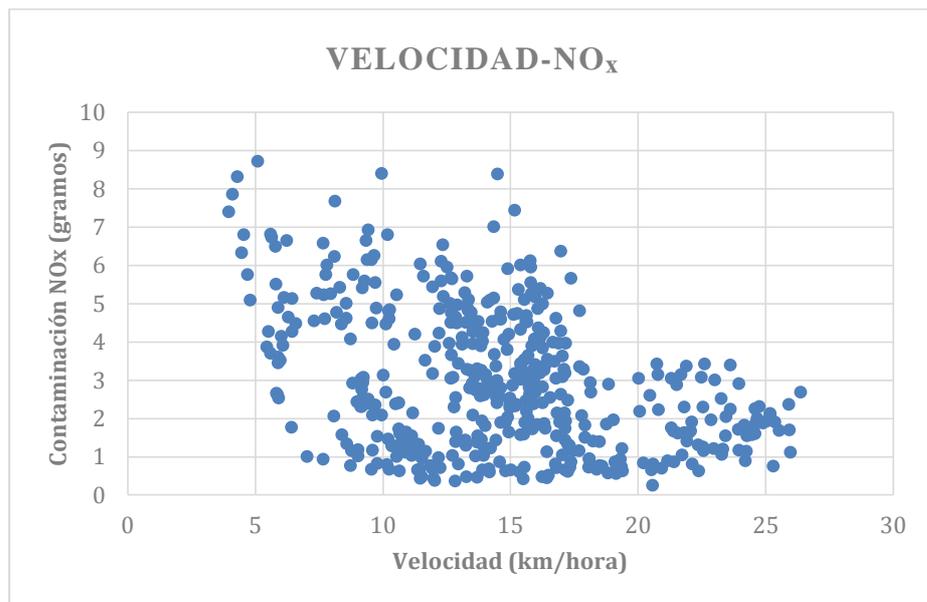
*Figura 3-4 Relación entre Velocidad y CO<sub>2</sub>*

*Fuente: Autor*

Igual comportamiento se evidencia para el NO<sub>x</sub>, tanto para el flujo como para la velocidad, en las siguientes figuras se ilustra lo dicho.



*Figura 3-5 Relación entre Flujo y NO<sub>x</sub>*  
*Fuente: Autor*



*Figura 3-6 Relación entre Velocidad y NO<sub>x</sub>*  
*Fuente: Autor*

A pesar de mostrar una clara tendencia de comportamiento en cada una de las relaciones, es notorio que existe información que no cumple dicho comportamiento por lo que se considera que debe despreciarse, para así lograr determinar una expresión matemática con la máxima bondad de ajuste.

### 3.1.3. Ecuaciones matemáticas para estimación de emisiones

Luego de un proceso de depuración de información y aplicando técnicas estadísticas de regresión lineal multivariable con apoyo de la herramienta informática Excel, se obtuvieron dos ecuaciones matemáticas que describen de manera clara y concisa la estimación de contaminantes del aire en los accesos de una intersección, es importante aclarar que el rango de aplicación óptima de las ecuaciones es para velocidades de hasta 30Km/hora y flujos de hasta 200 veh/ en 15 minutos.

Es así que considerando un nivel de confianza del 95%, se establece la siguiente ecuación para la determinación de CO<sub>2</sub> relacionada con flujos y velocidades, de manera adicional se muestran los resultados estadísticos de dicha regresión.

*Tabla 3-1 Estadísticas de Regresión para estimación de CO<sub>2</sub>*

<b>Estadísticas de la Regresión</b>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,957
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,915
R <sup>2</sup> ajustado	0,914
Error típico	132,770

*Fuente: Autor a partir de Excel*

$$\text{CO}_2 = 861.895 + 15.268F - 34.227V \quad (3.1)$$

Donde:

CO<sub>2</sub> = Estimación de Dióxido de Carbono en gramos por cada 15 minutos

F = Flujo vehicular en vehículos por cada 15 minutos

V= Velocidad media espacial en kilómetros por hora

De manera análoga considerando un nivel de confianza del 95%, se establece la siguiente ecuación para la determinación de NO<sub>x</sub> relacionada con flujos y velocidades, de manera adicional se muestran los resultados estadísticos de dicha regresión.

Tabla 3-2 Estadísticas de Regresión para estimación de  $NO_x$ 

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,951
Coefficiente de determinación $R^2$	0,904
$R^2$ ajustado	0,903
Error típico	0,429

Fuente: Autor a partir de Excel

$$NO_x = 3.082 + 0.037F - 0.159V \quad (3.2)$$

Donde:

$NO_x$  = Estimación de Dióxido de Carbono en gramos por cada 15 minutos

F = Flujo vehicular en vehículos por cada 15 minutos

V = Velocidad media espacial en kilómetros por hora

### 3.1.4. Estimación de contaminantes totales en una intersección

Una vez que se han definido las ecuaciones matemáticas para los accesos de las intersecciones, a continuación se establece una metodología para determinar las estimaciones en toda la intersección.

Una vez que se han determinado las estimaciones de contaminación en cada acceso, es necesario calcular la estimación en toda la intersección, para ello se deberá aplicar la siguiente ecuación:

$$ET_I = 4 \frac{\sum_{i=1}^I (E_A \times F_A)}{\sum_{i=1}^I (F_A)} \quad (3.3)$$

I = Número de accesos en la intersección I

$ET_I$  = Estimación total del contaminante en toda la intersección (gramos/hora)

$E_A$  = Estimación del contaminante en el acceso A (gramos en 15 minutos)

$F_A$  = Flujo vehicular del Acceso A (veh/15 minutos)

### **3.2. Metodología propuesta para EIRV que incluyan estimación de emisiones de contaminantes**

Con el objetivo de aportar con una secuencia de actividades necesarias para la correcta realización de estudios para el establecimiento de emisiones de contaminantes del aire en intersecciones de características geométricas y operativas similares a las del viario analizado, es decir de jerarquía vial Colectora, pero teniendo en consideración que para la estimación de emisiones existen restricciones en las magnitudes de flujos vehiculares y de velocidades de operación. A continuación se presenta una metodología que servirá de guía en las fases de: levantamiento de datos de campo, procesamiento de información, microsimulaciones de tránsito y estimación de emisiones de contaminantes, para ello se toma como referencia el alcance general establecido dentro de los requisitos de los Estudios de Impacto sobre la Red Vial (EIRV) para la ciudad de Cuenca, aclarando que la misma se deberá adaptar a cada caso en particular en función del tipo del equipamiento a evaluar y de los requisitos particulares que determine el GAD Municipal a través de sus dependencias encargadas de la planificación del tránsito y transporte en la ciudad.

Para su aplicación es necesario realizar un levantamiento de información primaria y secundaria confiable, tanto en aforos vehiculares como en velocidades de circulación, para lo cual se recomienda usar los formularios propuestos en el presente estudio, además es fundamental disponer de cualquier herramienta de microsimulación de tránsito que facilite el cálculo de los parámetros operacionales vehiculares dentro del área de estudio, de preferencia se debe disponer de una topografía del viario actualizada tanto en planta como en elevación, para finalizar es importante que al momento de calcular las estimaciones de contaminantes se usen las unidades adecuadas.

En la figura se pueden apreciar un esquema con el propósito de representar una metodología que considera el proceso íntegro para la determinación de estimaciones de emisiones de contaminantes del aire en EIRV, dicha secuencia de actividades está diseñada para el uso de Aimsun, pero es aplicable de manera general para cualquier tipo de herramienta informática que se use para realizar las microsimulaciones de tránsito que usen el modelo de seguimiento vehicular.



Figura 3-7 Metodología propuesta para EIRV con cálculo de Emisiones de contaminantes del aire  
Fuente: Autor

A continuación se realiza una breve explicación sobre cada una de las actividades contempladas en la metodología propuesta:

### 3.2.1. Levantamiento de información

**Red vial y emplazamientos (Topografía):** se debe obtener la topografía con el mayor nivel de detalle posible tanto en planimetría como en taquimetría, de preferencia geo referenciada, servirá también la que se pueda recolectar de *google earth* u *open Street maps*, esta información sirve para analizar las características geométricas de las vías e intersecciones en estudio y es la base para el trazado de la red en la herramienta informática.

**Inventario Vial y de transporte público (Señalización):** es necesario realizar un levantamiento de información sobre la señalización horizontal y vertical en el área de influencia directa y media del proyecto, prohibiciones de estacionamiento y datos sobre la operación del transporte público.

**Usos de Suelo (Equipamientos):** la influencia de equipamientos públicos y privados es primordial para entender las condiciones operacionales del área de estudio, por lo que es necesario analizar la dinámica del uso del suelo, y mapear los más relevantes dentro de un área de influencia directa y media.

**Aforos Automáticos:** con el propósito de analizar las variaciones horarias y diarias es necesario disponer de aforos automáticos clasificados dependiendo de la importancia del estudio, también es un insumo necesario para la determinación del TPDA, sin no se dispone de ellos se podrá utilizar información actualizada de conteos hechos en vías de condiciones geométricas y operativas semejantes a las de estudio. Los equipos deberán estar correctamente calibrados tanto en volúmenes, como en clasificaciones y en velocidades instantáneas.

**Aforos Manuales:** con el propósito de analizar la composición del tráfico, su distribución de giros y sus variaciones horarias en el periodo de estudio establecido en función del proyecto, se requiere realizar conteos manuales usando el formato indicado en el capítulo sección 1.2.1. Es importante adjuntar un esquema donde estén definidos cada uno de los movimientos direccionales. Si el estudio es vías urbanas se recomienda

que el periodo de registro sea cada 15 minutos, pero si es en vías de alta jerarquía deberá realizarse en periodos de 5 minutos, esta información es fundamental como dato de entrada al modelo de microsimulación.

**Velocidad de marcha, recorrido, instantánea:** se requiere medir la velocidad operativa de la red y las correspondientes demoras, para ello se aplicará el método del vehículo flotante, de ser posible se deberá obtener un intervalo de frecuencia de velocidades instantáneas por tipo de vehículo, para velocidades por tramos se requiere utilizar dispositivos que permitan generar un track que vincule con un sistema de geo posicionamiento, al igual que la información anterior es fundamental como dato de entrada al modelo de microsimulación, la metodología, el tamaño de la muestra se detalla en la sección 1.10.

**Conflictos vehículo-vehículo y vehículo-peatón:** es muy importante analizar los problemas operacionales que se puedan presentar en la zona de estudio, la interferencia de trayectorias entre varios modos de transporte, la seguridad en la circulación de los grupos no motorizados, conflictos con entradas y salidas de estacionamientos, etc.

### 3.2.2. Procesamiento de información

Una vez realizado el levantamiento de información, se requiere realizar su procesamiento, para lo cual se aconseja utilizar hojas electrónicas o bases de datos que permitan combinar herramientas de cálculo estadístico e interfaz gráfica, se recomienda trabajar con Microsoft Excel o Access.

**Determinación hora máxima demanda (Vehículo Liviano Equivalente):** para determinar la hora a la cual se produce el máximo movimiento de la red a analizar, se recomienda analizar la influencia del tráfico en vehículos livianos equivalentes y no en tráfico mixto, tal como se explicó en la sección 1.9.6 DEMORAS, es necesario destacar que se tiene que seleccionar de manera adecuada según el caso que corresponda.

**Variación Horaria del Tráfico:** es necesario determinar la variación de los flujos de tránsito a lo largo del período de estudio, para lo cual se recomienda usar un gráfico de líneas con marcados que presenta Excel.

**Determinación Tráfico Promedio Diario Anual:** en función del día y mes en el cual se realiza el levantamiento de información es necesario determinar el valor promedio del tráfico representativo de todo el año, para ello se recomienda seguir lo dispuesto en la sección 1.2.1.

**Movimientos direccionales “Giros” (Entradas y Salidas de la intersección):** se identifica con claridad cada uno de los movimientos direccionales de los flujos vehiculares y peatonales a analizar, se recomienda que se use un gráfico tipo circular (pastel), tanto para las entradas como para las salidas.

**Composición tráfico motorizado y no motorizado:** por el propósito de analizar la influencia del parque automotor en la zona de estudio y en función a la información levantada en campo, se debe realizar una distribución de la flota vehicular por tipos que circula por la zona de estudio, se recomienda que se use un gráfico tipo circular (pastel).

### 3.2.3. Microsimulaciones

Independientemente del tipo de microsimulador se recomienda que la evaluación se realice para los flujos correspondientes a la hora de máxima demanda y se tenga un cuidado absoluto en el ingreso de los siguientes parámetros.

#### 3.2.3.1. Información de entrada

**Características geométricas y operacionales de la vía:** se recomienda que en función de la topografía levantada se trace en el microsimulador las características geométricas de la red.

**Jerarquización y movimientos de flujos:** se refiere a ingresar las características de la vía de acuerdo a su función jerárquica, se recomienda trabajar con las capacidades

establecidas en el HCM y los flujos direccionales correspondientes a la hora de máxima demanda, tener cuidado con el ingreso de los sentidos de circulación.

**Asignación de velocidades y condiciones de tráfico:** se requiere que se ingrese las velocidades de recorrido y marcha determinadas previamente y se inserte cualquier detalle particular del comportamiento operacional, como pueden ser maniobras de estacionamiento momentáneo de vehículos, influencia de paradas de bus, salida de parqueaderos, planes semaforicos, etc.

**Características mecánicas de los vehículos:** con el propósito de estimar las emisiones, es necesario ingresar las características de rendimiento mecánico de los vehículos más representativos del parque automotor, analizar el porcentaje que trabaja con gasolina y diésel, longitud, ancho, peso, potencia, aceleración, desaceleración, etc.

#### **3.2.3.2. Validación y calibración:**

Se recomienda se siga lo dispuesto en la sección 1.9.7 con respecto al cálculo del estadístico GEH.

**Ajustes de regresión lineal con datos simulados y reales del flujo vehicular:** se requiere garantizar que los resultados de la microsimulación obedezcan a la situación real, por lo que es necesario garantizar que los valores de correlación entre los flujos vehiculares simulados y los observados en campo tengan un ajuste superior 0.90 para la hora de máxima demanda.

**Ajustes de regresión lineal con datos simulados y reales de velocidad vehicular:** se requiere garantizar que los resultados de la microsimulación obedezcan a la situación real, por lo que es necesario garantizar que los valores de correlación entre las velocidades vehiculares simuladas y las observados en campo tengan un ajuste superior 0.95 para la hora de máxima demanda.

### **3.2.3.3. Resultados Operacionales:**

Con el propósito de evaluar las condiciones operacionales del área de estudio se recomienda que se analicen los parámetros operacionales de Niveles de Servicio, relaciones Volumen / capacidad, demoras, colas, tanto para el escenario base como para el escenario donde se evalúe el impacto por el emplazamiento de algún equipamiento u situación en particular, para ello se debe tomar en consideración los fundamentos teóricos establecidos en el capítulo anterior.

### **3.2.3.4. Estimación de emisiones instantáneas "IEM"**

Se refiere a la determinación de las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, que se relacionan con el efecto de la circulación vehicular, para ello se emplearan las ecuaciones (25, 26 y 27) para estimar las emisiones tanto en los accesos como en toda la intersección, resaltando que los resultados son preliminares y en podrán ser modificados en función de la ampliación de la base de datos que se pueda generar en el mediano plazo, pero que por el momento se consideran adecuados.

## **CONCLUSIONES**

El desarrollo de la presente investigación en todas sus etapas ha estado lleno de múltiples enseñanzas, entre las que se destaca el proceso logístico para coordinar actividades con más de 150 personas para el levantamiento de información primaria, el uso de herramientas informáticas de vanguardia para el procesamiento de información así como para la determinación de los modelos matemáticos propuestos, los resultados obtenidos son satisfactorios y marcan el inicio de una línea de investigación amplia y clara, que seguramente en un mediano plazo contribuirá de manera activa al mejoramiento de la calidad de vida de los cuencanos.

Se han cumplido con todos los objetivos propuestos al inicio de la investigación, con respecto al primer objetivo específico resaltaré la calidad de la información primaria levantada en campo, por un lado gracias a la disponibilidad del talento humano suficiente que pudo proveer la Escuela de Ingeniería Civil y Gerencia de construcciones de la Universidad del Azuay y por otro lado debido el uso de equipos

de última tecnología para determinación de flujos vehiculares y velocidades de circulación, la caracterización del parque automotor de la ciudad puede mejorar si se cuenta con información precisa y detallada, lastimosamente al momento no se encuentra disponible por parte de los organismos encargados de la administración del tránsito de la ciudad.

En relación al segundo objetivo específico, las fortalezas del software de microsimulación empleado, facilitaron el proceso de calibración y validación del modelo, garantizando así que el escenario evaluado represente con un grado de exactitud adecuado a la situación real, es importante destacar que los coeficientes de regresión entre los datos simulados y los reales tanto para flujos vehiculares como para velocidades fueron superiores 0.99, lo que es un indicador de la fiabilidad de los resultados que describen el comportamiento vehicular de la zona en estudio

En lo personal el tercer objetivo específico planteado es el de mayor relevancia, el modelo matemático para la estimación de emisiones de contaminantes propuesto se lo considera preliminar, ya que es producto del análisis de un solo corredor vial de tipo colector, se comporta de manera satisfactoria bajo condiciones de flujo moderado – bajo (200veh/15 minutos) y para velocidades de aproximación en los accesos moderadas (hasta 30Km/hora), por lo que su aplicación en viarios de características similares es válida, se hace hincapié en la necesidad de ampliar la base de datos de manera continua para definir un comportamiento generalizado en la ciudad.

Refiriéndome al cuarto objetivo específico planteado, es imperioso el continuar con el establecimiento de una línea base amplia y diversa, se tendrá que analizar múltiples viarios colectores distribuidos espacialmente en toda la ciudad, con el fin de garantizar que el modelo matemático propuesto presente un comportamiento equilibrado en toda la urbe, permitiendo que las medidas de gestión de tránsito sean oportunas y enfocadas a mejorar poco a poco la calidad del aire de la ciudad y no solo a disminuir la congestión vehicular, se considera que al menos 25 km de vías colectoras deben ser analizados para generalizar resultados.

Con respecto a la primera pregunta de investigación, tomando en consideración que el 57% de la contaminación del aire está relacionada a la transportación motorizada en Cuenca, el disponer de un modelo matemático generalizado que estime las emisiones

de contaminantes es absolutamente aplicable, primero porque con la tecnología que dispone el GAD Municipal y sus empresas para el control y gestión del tráfico, permite realizar en gran parte de la ciudad un análisis de los flujos vehiculares en tiempo real permitiendo evaluar las condiciones de congestión, se considera factible mejorar el monitoreo de velocidades mediante dispositivos fijos en puntos estratégicos de la ciudad, con lo cual se tendría los insumos para retroalimentar el modelo de emisiones que permita limitar a valores permisibles los contaminantes del aire, mediante la aplicación de medidas de gestión de tránsito oportunas, como priorización semafórica, restricción vehicular en tiempo real, adaptables a lo largo del día.

Para responder la segunda pregunta de investigación, aclaro que pese a que los resultados obtenidos para el modelo matemático de estimaciones de contaminantes propuesto son extremadamente satisfactorios, no representan todavía un comportamiento generalizado de las vías colectoras de la ciudad, ya que fueron determinados a partir de flujos y velocidades moderadas, con el complemento de futuros estudios, seguramente el modelo reflejará la realidad de los ejes colectores de la ciudad.

Finalmente es muy satisfactorio el mencionar, que resultados preliminares de la presente investigación han sido aceptados dentro de la comunidad académica nacional e internacional, destacándose que este proyecto fue presentado en el mes de marzo del presente año en *The Institute of Transportation Engineers ITE Collegiate Traffic Bowl and Research Symposium 2017*, organizado por la *New York University - NYU*, bajo el nombre “*ESTIMATING AIR POLLUTION GENERATED BY THE CIRCULATION OF MOTORIZED VEHICLES IN THE CITY OF CUENCA - ECUADOR USING THE MICRO COMPUTER TRANSIT SIMULATION TOOL AIMSUN 8.1*”, adicionalmente un estudio derivado de la presente investigación ha sido expuesto en el Seminario Internacional de Gestión de Transporte organizado por la Fundación Ecos-Ecuador, Asociación de Municipalidades del Ecuador y la Escuela Politécnica de Chimborazo en el mes de Julio del presente año bajo el nombre “*ESTIMACION DE CONTAMINANTES DEL AIRE PRODUCIDAS POR TRANSPORTE PUBLICO EN COMPARACIÓN CON VEHÍCULOS PRIVADOS Y PESADOS EN LA AVENIDA 10 DE AGOSTO DE LA CIUDAD DE CUENCA, USANDO AIMSUN 8.1*”

## RECOMENDACIONES

Para futuros estudios, se recomienda que dentro del levantamiento de información primaria relacionada con aforos vehiculares, se detalle con mayor grado de precisión la composición vehicular del parque automotor, tratando de discretizar por ejemplo los vehículos livianos en autos, todo terreno y camionetas, los buses en unidades de transporte público urbano, intracantonal e interprovincial, en cuanto a los vehículos de dos ruedas es mejor levantar la información diferenciando entre motos y bicicletas, todo esto con el propósito de obtener un mayor grado de exactitud al modelo del vehículo que mejor representa a cada grupo analizado. Por otro lado es fundamental que el levantamiento de velocidades de marcha, recorrido e instantáneas se realice de manera simultánea con los aforos vehiculares de tráfico observado y se incentive una actualización de la caracterización del parque automotor de la ciudad estableciendo de manera articulada con profesionales del área de la ingeniería automotriz, cuáles serían los vehículos (marcas y modelos) más representativos de la ciudad.

Es fundamental que se realicen estudios complementarios en otros viarios de la ciudad, y así ampliar la base de datos que permitirá generalizar los resultados para toda la ciudad, se identifican 5 viarios colectores a analizar en un corto plazo, la Av. Don Bosco, la Av. Unidad Nacional, Av. Paseo de los Cañaris, Av. Yanahurco, entre otras, también se considera relevante realizar análisis en viarios e intersecciones con flujos vehiculares de mayor intensidad y a velocidades de circulación más altas, esto permitirá ampliar el rango de aplicación del modelo matemático, por lo que se sugiere que se cree una línea de investigación en esta área por parte de la Escuela de Ingeniería Civil y Gerencia de Construcciones de la Universidad del Azuay, para así dar un acompañamiento continuo en el proceso de consolidación de una base de datos confiable y efectiva.

Sería muy conveniente para futuros estudios realizar un análisis comparativo de los resultados que describen el comportamiento vehicular usando otras herramientas informáticas de microsimulación como son Sidra, HCS, Transyt o Vissim, y evaluar sus resultados en comparación con lo que establece Aimsun, y así adaptar la metodología propuesta si fuera necesario.

Expertos internacionales como es el caso de la Dra. Angélica Lozada Cuevas, Directora de Investigaciones de Ingeniería de Transporte de la Universidad Nacional Autónoma de México, en entrevista realizada para el presente proyecto el 06 de Noviembre de 2016 en Ciudad de México DF, ha recomendado el profundizar el análisis y el establecer un modelo de comportamiento típico de la ciudad, en la que se considere condiciones muy particulares de la ciudad en cuanto a composición y caracterización del parque automotor, condiciones geográficas de ciudad de montaña y escala poblacional intermedia, lo cual convertiría a Cuenca como una ciudad piloto y pionera en el estudio de esta área del conocimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. (2011). *Anuario de Ventas 2011*. Quito: AEADE.
- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. (2014). *Anuario de Ventas 2014*. QUITO: AEADE.
- Banco de Desarrollo de America Latina - CAF. (2010). *Análisis de la movilidad urbana, espacio, medio ambiente y equidad*. Bogota: CAF.
- Banco de Desarrollo de América Latina - CAF. (2011). *Desarrollo Urbano y Movilidad en América Latina*. Panama: Norma Color .
- Banco Interamericano de Desarrollo - BID. (2014). *Cuenca Ciudad Sostenible - Plan de Acción*. Cuenca: Gráficas Hernandez, Cuenca – Ecuador.
- CA O’Flaherty, MGH Bell, PW Bonsall, GR Leake, Ad MAy, Ca NashBurlington. (2003). *Transport Planning and Traffic Engineering*. Burlington: Elsevier Butterworth - Heinemann.
- Cal&Mayor, R. (2007). *Ingenieria de Transito: Fundamentos y aplicaciones*. Mexico: Alfaomega.
- Christopher Kettell, TRL; Mark Brackstone, Jordi Casas and Josep Maria Aymami, TSS-Transport Simulation Systems; Roland Leigh and Ed Lamb, University of Leicester. (2015). *Real-time simulation for pollution reduction*. Leicester city: Association for European Transport.
- Comisión Nacional de Transporte Terrestre, Transito y Seguridad Vial. (2009). *RESOLUCIÓN NO. 114-B-DIR-2009-CNTTSV*. Quito: CNTTSV.

- Empresa de Movilidad de Cuenca - EMOV -EP. (2014). *Inventario de emisiones atmosféricas del canton Cuenca*. Cuenca: EMOV-EP.
- Empresa de Movilidad de Cuenca - EMOV -EP. (2015). *Informe de Calidad de Aire de Cuenca - 2015*. Cuenca: EMOV - EP.
- Garber, N. (2009). *Traffic & Highway Engineering*. Toronto - Canadá: Cengage Learning.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca. (2015). *Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca*. Cuenca: GAD Cuenca.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). *Censo de Población y vivienda en el Ecuador*. Quito: INEC.
- Luc Int Panis, Steven Broekx, Ronghui Liu. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science Direct*, Volumen 371 Numbers 1 - 3 .
- Ministerio de Planificación y Cooperación - Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte. (1998). *Metodología Normalizada para Estudios*. Santiago: MIDEPLAN - SECTRA.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2012). *Norma Ecuatoriana Vial*. Quito: MTOP.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2012). *Reglamento Técnico Ecuatoriano de Seguridad Vial*. Quito: INEN.
- Moyano Tobar, C. (2015). *Análisis Crítico sobre Normativa Local, Nacional e Internacional de Estudios de Impacto Vial*. Informe sobre trabajo de Asignatura: Gerencia, evaluación y logística aplicada a proyectos de tráfico, Cuenca.
- Quintero Ange; Plamar Matilde, Andueza Pedro; Casanova Leonardo; Díaz Mary. (2008). Evaluación de Experiencia obtenida en los Estudios de Impacto Vial y propuestas para su ejecución e implementación. *Revista Ciencia e Ingeniería*. Volumen 29. N°3, 243 - 248.
- Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá. (2005). *Manual de planeación y diseño para la Administración del Tránsito y el transporte*. Bogotá: C&M Asociados.
- SIT, L. (2013). *Manual Aimsun version 8.1*. BOGOTÁ.

Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington DC: TRB.

Willumsen, L. G., & Ortuzar, J. d. (2008). *Modelos de Transporte*. España: Publican - Ediciones de la Universidad de Cantabria.

## GLOSARIO DE TERMINOS

**Aimsun.** Software de Micro simulación de tránsito y transporte (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks).

**Análisis Macroscópico.** Estudia el comportamiento de los automóviles y sus conductores a gran escala, dependiendo de las condiciones de tráfico en cada situación. Este análisis es el más grande que se puede realizar en un estudio vehicular que relacione los flujos, velocidades medias espaciales y sus densidades.

**Análisis Microscópico:** Estudia de la manera más discreta el comportamiento individual de cada uno de los vehículos que intervienen en el flujo de tráfico, aplicando la teoría de seguimiento vehicular y del cambio de carril.

**Arcos – Secciones.** Es un grupo de carriles adyacentes donde los vehículos se mueven en la misma dirección.

**Aforo de tránsito.** Conteo de los vehículos que pasan por uno o varios puntos de una vía durante un período de tiempo.

**Aforo permanente.** Aforo de volúmenes de tránsito que se efectúa durante una semana, mes o año para conocer sus patrones de variación.

**Agencia Nacional de Tránsito – ANT.** Institución que regula, administra y controla el cumplimiento de lo dispuesto por la ley de transporte terrestre, tránsito y seguridad vial del Ecuador.

**Análisis de alternativas.** Estudio detallado y una evaluación de varias opciones disponibles para el propósito de seleccionar una de ellas para su implementación.

**Análisis de costo-beneficio.** Técnica analítica que compara los costos sociales y los beneficios (medidos en términos monetarios) de programas propuestos. Las pérdidas y ganancias están incluidas y los beneficios netos creados por una acción son calculados.

**Análisis de demanda.** Estudio de los factores que afectan la demanda, llevado a cabo por medio de la recolección de datos y la utilización de varias técnicas analíticas para comprender la demanda que puede ser de transporte o peatonal.

**Análisis de regresión multivariable.** Técnica estadística para estimar la mejor relación matemática entre una variable dependiente y una o más variables independientes.

**Área de estudio.** Área perfectamente delimitada que es destinada para la evaluación del proyecto.

**Asignación de viajes (limitación de la capacidad).** Proceso iterativo por el cual el volumen distribuido a una ruta se compara con la capacidad de tal ruta y la velocidad en la ruta es ajustada, por consiguiente, para reflejar sus características de velocidad, volumen y densidad. Nuevas rutas de duración mínima se calculan al principio de cada iteración.

**Base de datos.** Banco de información a partir de la cual se pueden tomar las decisiones de gestión de tránsito, es una recopilación no redundante de partidas de datos procesables por uno o varios programas de computador.

**Brazos del nodo.** Accesos a la intersección, incluye ángulo de entrada, número de carriles y movimientos en las entradas y salidas del nodo.

**Calibración.** Asignación de valores numéricos observados en el mundo real a ciertas constantes de un modelo matemático o simbólico.

**Calibración de modelo.** Consiste en determinar que los resultados de un programa de computadora de simulación se comportan como la situación que se está analizando en la realidad, de no ser así se aplican correcciones y ajustes a las condiciones operacionales.

**Calidad del tránsito.** Efectividad de la circulación del tránsito que se manifiesta generalmente por su fluidez y libertad de maniobra.

**Capacidad vial.** Máximo número por hora de personas o vehículos que lógicamente se pueda esperar pasen por un punto o tramo uniforme de un carril o calzada durante un período de tiempo dado, en condiciones imperantes de vía, tránsito y control, el intervalo de tiempo utilizado en la mayoría de análisis es de 15 minutos.

**Carril de giro a derecha.** El que está reservado para los vehículos que giran a la derecha.

**Carril de giro a izquierda.** El que está reservado para los vehículos que giran a la izquierda.

**Carril de paso directo.** Carril que se añade a una intersección para favorecer el movimiento directo o de frente. Carril destinado al movimiento de tránsito directo.

**Caso de Estudio.** Es un método de investigación de una situación compleja basado en el entendimiento de dicha situación, que se obtiene a través de su descripción y análisis.

**Central de control semafórico.** Sala que contienen el equipo de cómputo, pantallas, mapas y mandos para controlar un sistema computarizado de semáforos.

**Centroide.** Punto dentro de una zona de tráfico o distrito escogido como representativo del centro de las actividades generadoras de viajes de la zona, sirve para concentrar una demanda de viajes o transporte.

**Ciclo semafórico.** Tiempo total que requiere una sucesión completa de los intervalos de un semáforo.

**Circulación.** Movimiento de peatones o vehículos por una vía en particular.

**Circulación estable.** Aquella en la que un pequeño aumento en la demanda de tránsito no afecta la velocidad de los vehículos.

**Circulación inestable.** Aquella en la que un pequeño aumento en la demanda de tránsito produce una gran disminución en las velocidades de los vehículos, lo que a su vez causa altas densidades e interferencias internas.

**CO - Monóxido de carbono.** Gas incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados, se produce por la combustión deficiente de sustancias como gas, gasolina, keroseno, carbón, petróleo, tabaco o madera.

**CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono.** Es un gas incoloro, inodoro que se encuentra en la naturaleza y para el presente estudio se lo considera como un gas de efecto invernadero producido por la quema de combustibles fósiles producto de la combustión interna de los motores de los vehículos.

**Cola de vehículos.** Fila de vehículos detenidos o casi detenidos.

**Composición del tránsito.** Tipos de vehículos de que consta el tránsito y sus respectivos porcentajes.

**Condiciones de control.** Hace referencia a los dispositivos de control, tales como los semáforos, señales restrictivas y las velocidades límite.

**Condiciones de tránsito.** Se refiere a la distribución del tránsito en el tiempo y el espacio, su composición en tipos de vehículos como livianos, camiones, autobuses, entre otros.

**Condiciones imperantes en la vía.** Características habituales de la vía que afectan la circulación del tránsito y que permanecen sensiblemente invariables hasta que la vía se deteriora, se repara o se reconstruye.

**Confiabilidad – Nivel de Confianza.** Probabilidad de que una función específica sea desarrollada sin falla y dentro de los parámetros de diseño por el período de tiempo proyectado, en las condiciones actuales de operación.

**Conflicto.** Dificultad que surge cuando dos o más vehículos o un vehículo con un peatón compiten por el mismo espacio en la vía.

**Congestión de tránsito.** Situación que se origina cuando la demanda de tránsito en una vía excede el volumen máximo que puede circular por un punto de ésta.

**Conjunto de datos reales.** Información de campo levantada (aforos, velocidades, colas, demoras) que sirve de punto de comparación con los datos simulados y validar la exactitud de la información obtenida para la toma de decisiones.

**Contador de tránsito.** Instrumento que realiza aforos de tránsito automáticamente.

**Conteo.** En lo concerniente al transporte, un proceso que cuenta un desplazamiento particular de personas o vehículos que pasan a través de un punto dado durante un período fijo de tiempo. Puede ser un valor direccional o de doble sentido.

**CORINAIR.** Programa concertado de vigilancia continua y de evaluación de la transmisión a larga distancia de los contaminantes atmosféricos de la ciudad de Medellín -Colombia.

**Costo de operación vehicular.** Corresponde al valor en pesos que se deriva de la administración y explotación de los vehículos que prestan el servicio en condiciones normales.

**Demanda de tránsito.** Número de vehículos que requiere pasar por un punto de una vía durante la unidad de tiempo.

**Demanda total de viajes.** Número potencial de viajes que probablemente serían efectuados por personas que no viajan, debido a la inconveniencia, falta de

conocimiento, inaccesibilidad, o falta de disponibilidad de las modalidades actuales o de habilidades para utilizarlas.

**Demora.** Es el tiempo de recorrido adicional que resulta cuando un vehículo va a menor velocidad que la esperada por sus ocupantes debido a causas relacionadas con la vía, el tránsito o su regulación.

**Demora en cola (intersección).** Tiempo que transcurre desde que un vehículo se une a una cola en el acceso a una intersección, hasta que entra en la intersección, menos el tiempo que tomaría normalmente recorrer la misma distancia a flujo libre.

**Densidad.** Es el número de vehículos que ocupan una longitud específica de una vía en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro, ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada.

**Densidad a capacidad.** Densidad a la que se alcanza la capacidad de una vía.

**Densidad media de tránsito.** Número promedio de vehículos que están en un tramo de calzada o carril, durante un período de tiempo dado, dividido entre la longitud del tramo.

**Desviación estándar.** Es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Es el promedio o variación esperada con respecto a la media aritmética.

**Detector de aforos o velocidades.** Dispositivo que se coloca en una vía para registrar automáticamente el paso o presencia de vehículos.

**Detector neumático.** Conformados por una manguera flexible que se coloca en forma transversal sobre la vía, la cual transmite los impulsos de aire ocasionados por la presión al paso de los vehículos. Según el número de impulsos de aire y cierta programación, como distancia entre ejes, se puede registrar la cantidad y el tipo de vehículo.

**Escenario estocástico.** Es aquel cuyo comportamiento está determinado tanto por las acciones predecibles del proceso de micro-simulación como por elementos aleatorios que pueden presentarse en el desarrollo del mismo.

**Equivalencia a vehículos de pasajeros.** Representación de vehículos grandes, tales como autobuses y camiones y que son equivalentes a un número de automóviles (carros de pasajeros) para usar en el análisis de nivel y capacidad de servicio.

**Estación de aforo.** Lugar fijo de una vía donde se realizan aforos de volúmenes de tránsito.

**Estacionamiento.** Lugar donde se proporciona espacio para estacionar, autorizado por la autoridad de tránsito.

**Estadística descriptiva.** Rama de las matemáticas que trata de la recopilación, el análisis, la interpretación y la presentación de una cantidad de datos numéricos.

**Estimación del error estándar.** Una medida estadística de las diferencias posibles entre los valores actuales y estimados de una variable.

**Estudios de impacto sobre la Red Vial (evaluación de impacto).** En planeación del transporte, aquella parte del proceso en la cual se hace una evaluación de los efectos de un proyecto de transporte existente o propuesto, sobre factores o variables sociales, económicas y ecológicas, por ejemplo, acerca de la contaminación del aire, consumo de energía, accidentes y efectos socioeconómicos.

**Estudio de origen-destino.** Estudio de orígenes y destinos de viajes de vehículos y pasajeros. También puede incluir el propósito y la frecuencia de viajes.

**Estudio de Tránsito.** Investigación de las características del tránsito, tales como volumen, velocidad, demoras, accidentes, etc.

**Estudio de velocidades y demoras.** El que mide la velocidad y demoras medias de una corriente vehicular.

**Factor de crecimiento.** Coeficiente por el que se multiplica el valor del volumen de tránsito actual para obtener el valor correspondiente a una fecha futura.

**Flujo de tránsito.** Volumen de tránsito medido en un lapso menor de una hora.

**Flujo continuo.** Flujo vehicular que se produce en vías que no tienen elementos fijos que obstaculicen el volumen de tránsito y que provoquen interrupciones, tales como semáforos.

**Flujo discontinuo.** Flujo vehicular que se produce en vías que tienen elementos fijos que provocan la interrupción del tráfico de manera periódica. Estos elementos son semáforos, señales de Pare y otros tipos de control. Tales mecanismos producen paradas del tránsito, independientemente de la cantidad de vehículos que existe.

**Flujo de saturación.** Máximo número de vehículos que puede pasar por uno o más carriles de un acceso a una intersección semaforizada, en ciertas condiciones, por hora de verde, descontando los tiempos perdidos por arranque de cola y despeje.

**Flujo libre.** Característica de una corriente vehicular, donde la interferencia entre vehículos es prácticamente nula y no hay controles que la restrinjan.

**GEH.** Estadística de validación llamada así por su inventor Geoffrey E. Havers, toma en cuenta el error relativo y no depende de valores nulos que pueden aparecer, generalmente se acepta que un modelo de asignación de tráfico estará satisfactoriamente calibrado si: al menos el 60% de los arcos tienen un GEH inferior a 5.0, el 95% de los arcos tienen un GEH inferior a 10.0, todos los arcos tienen un GEH inferior a 12.0.

**Grado de saturación.** Relación entre la demanda de tránsito, expresada en volumen y el flujo de saturación correspondiente. Se aplica al acceso a una intersección semaforizada, a un carril o a un grupo de carriles del acceso.

**Hora de máxima demanda.** Hora del día en que circulan los flujos o volúmenes de tránsito máximos.

**Horas valle.** Horas del día que no son las de máxima afluencia del tránsito.

**IEM.** Modelo de Emisiones instantáneo para CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

**Impacto ambiental.** Efectos que produce la acción humana en el medio ambiente.

**Ingeniería de tránsito.** Rama de la ingeniería que tiene por objeto propiciar el movimiento seguro y eficiente de peatones y vehículos en vías terrestres.

**Intersección.** Lugar donde dos o más vías se unen o cruzan. Comprende todo el espacio destinado a facilitar los movimientos de los vehículos que giran y los que siguen de frente.

**Intersección a desnivel.** La que tiene, por lo menos, un paso a desnivel.

**Intersección a nivel.** La que no tiene pasos a desnivel.

**Intersección semaforizada.** La que está regulada por uno o más semáforos.

**Intervalo de aforo.** Intervalo de tiempo durante el cual se hacen los aforos. Normalmente el período de estudio se divide en intervalos de tiempo, con el fin de conocer el patrón de comportamiento de la variable que se está midiendo en el estudio respectivo.

**Intervalo de semáforo.** Período de tiempo durante el cual el semáforo no cambia sus indicaciones.

**Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial.** Conjunto de preceptos destinados a ordenar el tránsito, promulgados por la entidad legislativa de un Estado o de sus subdivisiones políticas, en este caso el Ecuador.

**Límite de velocidad.** Velocidad máxima autorizada para cada sección de tramo, determinada principalmente por el alineamiento, el perfil y la estructura.

**Modelo de simulación.** Modelo simbólico que representa un sistema real, reproduciendo consecutivamente los sucesos de interés que tienen lugar en el sistema real.

**Modelo de tráfico.** Ecuación matemática o de método gráfico, usada para simular movimientos de tráfico, especialmente en áreas urbanas o en una vía rápida.

**Movimiento vehicular.** Flujo o volumen de vehículos que circulan hacia una dirección en particular.

**MP – Material Particulado.** Es una mezcla de partículas sólidas y líquidas, una vez en el aire pueden cambiar en concentración, de tamaño y forma, algunas partículas suficientemente grandes y oscuras pueden ser visibles (como las corrientes de humo o de hollín), otras por su tamaño, pueden ser detectables solamente por medio de un microscopio electrónico.

**Nivel de confianza.** Probabilidad expresada en porcentaje de que el parámetro estimado no rebase el error máximo tolerable.

**Nivel de servicio.** Medida cualitativa que describe las condiciones de circulación de una corriente vehicular, caracterizada generalmente por ciertos parámetros como velocidad y tiempo de recorrido, libertad para maniobrar, interrupciones de la circulación, comodidad y seguridad.

**Nodo.** Es un punto o un área de la red en la que se enlazan secciones y donde los vehículos se desplazan a su siguiente sección, tiene una o más secciones de origen, una o más secciones de destino y un conjunto de giros que unen las entradas y salidas.

**NO<sub>x</sub> – Óxido de Nitrógeno.** Son generados cuando el nitrógeno reacciona con el oxígeno del aire bajo las condiciones de alta temperatura y presión que se presentan

dentro del motor. Las emisiones de estos óxidos de nitrógeno contribuyen también a la creación del smog, así como a la formación de la lluvia ácida.

**Ola verde.** Sucesión de indicaciones verdes de semáforos que van apareciendo a lo largo de una vía a ciertos intervalos para que grupos de vehículos puedan avanzar por la vía sin detenerse a una velocidad determinada.

**Par vial.** Sistema vial formado por dos calles paralelas, cercanas y con sentidos opuestos de circulación.

**Parámetro microscópico.** Uno de los que caracterizan la interacción de vehículos individuales dentro de la corriente vehicular, tales como el intervalo, el paso del vehículo y la brecha.

**Parque automotor.** Número total o de cierta clase de vehículos automotores registrados en un país, región o ciudad.

**Percentil.** En un grupo de valores se llama percentil al valor que no es excedido por un porcentaje dado del número total de valores. Así, el percentil 85 de las velocidades es la velocidad no superada por el 85% de los vehículos observados y rebasada por el 15%.

**Período de estudio.** Tiempo para el cual se hace la determinación del volumen peatonal o vehicular. La duración del período de estudio se define en función de la finalidad del estudio o tamaño de la muestra.

**Período de máxima demanda.** Intervalo de tiempo durante el cual se presentan los máximos flujos de vehículos o de usuarios de transporte. Cuando el período de tiempo es una hora se conoce como Hora de Máxima Demanda (HMD), Hora Pico u Hora Punta.

**Período normal.** Períodos de tiempo fuera del tiempo de máximo tráfico (o tiempo pico).

**Período valle.** Período de tiempo durante el cual se presentan las condiciones mínimas de tránsito o de movimientos de usuarios de transporte. Si el período de tiempo es una hora se llama Hora Valle.

**Plan de señales.** La duración y asignación de los tiempos para la secuencia de todas las señales que regulan el tránsito de una intersección controlada por semáforo.

**Planeación de rutas.** Compilación de las rutas más eficaces desde los puntos de origen hacia los destinos planeados.

**Planeamiento (vías).** Formulación de las características generales de un sistema vial y de un plan de acción para guiar su desarrollo, conservación y explotación. Se espera que sus resultados tengan vigencia a largo plazo.

**Proceso estocástico o al azar.** Incluye variables al azar y una producción que no se reproduce.

**Programa de optimización semafórica.** Programa que calcula los períodos (ciclos, intervalos, desfases) de un sistema de semáforos coordinados que optimizan cierto indicador de efectividad.

**Proyección de demanda.** Técnica para calcular el número de usuarios potenciales de un sistema y sus horas y rutas deseadas de viaje.

**Punto de conflicto.** Punto o área reducida donde se intersecan o confluyen trayectorias de vehículos.

**R<sup>2</sup> (R cuadrado).** Coeficiente de determinación estadística determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo, entre más cercano este el valor a 1 más cercanos están los valores comparados.

**Razón beneficio/costo.** Relación entre el beneficio alcanzado o que se espera obtener de una inversión (reducido a términos monetarios) y el costo de la misma.

**Red vial.** Disposición de un sistema de vías que sirve a un área determinada.

**Regulación del tránsito.** Conjunto de medios destinados a ordenar la circulación.

**Relación Volumen / Capacidad.** Proporción de la capacidad de una vía o elemento de ella que se está utilizando, es decir, el volumen de tránsito que circula dividido entre la capacidad correspondiente.

**Replicación.** Proceso mediante el cual se trata de emular el comportamiento operacional vehicular o peatonal, dentro de cada replicación se tiene una semilla que contiene un modelo matemático particular de comportamiento.

**Restricciones al tránsito.** Medidas que se toman para entorpecer la circulación. Se usan mucho en calles residenciales para evitar que el tránsito de paso las utilice.

**Rotonda – Redondel.** Es una forma de intersección canalizada a nivel que disponen de una isleta central en la cual los vehículos son guiados hacia un camino circular unidireccional que sirve para distribuir las maniobras de giros provenientes de los accesos, los cuales son controlados por señales de Ceda el Paso y tienen prioridad los vehículos circulando en la zona interior.

**SCOOT - *Split Cycle Offset Optimization Technique*.** Es un sistema adaptativo de control de señales de tránsito urbano, es adaptable y responde automáticamente a las fluctuaciones de tráfico.

**Semáforo.** Dispositivo que proporciona indicaciones visuales para el control del tránsito de vehículos y peatones en intersecciones. Las indicaciones se hacen a través de luces con lentes de diferentes colores. El color verde corresponde a la indicación de “siga” y el color rojo a “pare”; el color amarillo normalmente sirve de transición entre las fases de “siga” y “pare”. Los lentes con luces de colores diferentes se ordenan verticalmente en una secuencia convencional y preestablecida de la siguiente manera: rojo, amarillo y verde.

**Semáforo accionado por el tránsito.** Semáforo donde los intervalos y fases varían de acuerdo a las demandas del tránsito, registradas por actuaciones en detectores o botones de contacto.

**Semáforo accionado totalmente por el tránsito.** Aquel que recibe accionamientos de los detectores instalados en todos los accesos a la intersección que regula.

**Semáforo de tiempos fijos.** Aquel que dirige el tránsito conforme a ciclos e intervalos establecidos previamente.

**Series temporales.** Un proceso analítico que separa los efectos de tendencia, temporada y ciclo, y es provechoso en el avalúo de demanda de transporte.

**Simulación de tránsito.** Representación del tránsito por un modelo simbólico que, mediante un programa de computador, reproduce consecutivamente los sucesos que suelen tener lugar en el tránsito vehicular.

**SO<sub>2</sub> - Dióxido de azufre.** Gas incoloro con un característico olor asfixiante, es el principal causante de la lluvia ácida ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico. Es liberado en muchos procesos de combustión de materiales como el carbón, el petróleo, el diésel o el gas natural.

**Tasa de flujo.** Número total de vehículos o peatones que pasan durante un período inferior a una hora, expresado en vehículos por hora.

**Teoría de Seguimiento vehicular.** Tipo de análisis que procura definir en términos matemáticos la forma en que un vehículo sigue a otro, para de ahí inducir la dinámica de una corriente vehicular.

**Tiempo de marcha.** Período durante el cual el vehículo está en movimiento. Se obtiene restando del tiempo de recorrido, el tiempo cuando el vehículo está detenido (demora por tiempo de parada).

**Tiempo de recorrido.** Tiempo que transcurre mientras un vehículo recorre cierta distancia, incluyendo el invertido en paradas imputables a la vía, al tránsito o a su regulación.

**Tiempo de viaje.** Tiempo que tarda una persona o vehículo en realizar un viaje, es decir, en ir del origen al destino del mismo, incluyendo todas las demoras ocasionadas.

**Tiempo perdido (semáforo).** Tiempo en que una intersección semaforizada no es usada efectivamente por ningún movimiento vehicular. Es igual a los tiempos perdidos por despeje y por arranque de cola.

**Tránsito.** Acción de pasar por vías y parajes públicos. Es un término más general que circulación.

**Tránsito anual.** Es el número total de vehículos que pasan durante un año por un punto de control.

**Tránsito calmado.** Consiste en reducir el volumen y velocidad del tráfico hasta hacerlo más civilizado y compatible con el resto de funciones y actividades sociales que se desarrollan en los espacios públicos de las calles dedicados a la convivencia.

**Tránsito cautivo.** Una persona que no tiene un automóvil privado o no puede manejar (por cualquier motivo), y quien debe usar tránsito para hacer el viaje deseado.

**Tránsito convergente.** El que ingresa en una calzada y se inserta en la corriente vehicular que va por ésta mediante una maniobra de confluencia.

**Tránsito convertido.** El originado por el abandono del uso de otros modos de transporte.

**Tránsito de paso.** Tránsito que circula por cierta zona pero cuyo origen y destino se encuentran fuera de la misma.

**Tránsito desviado.** Vehículos que cambian su ruta para evitar demoras o pueden obligados a cambiar su ruta.

**Tránsito diario.** Es el número total de vehículos que pasan durante un día por un punto de control.

**Tránsito exclusivo.** Derecho de paso que es completamente separado por niveles o cuyo acceso es controlado, y se usa exclusivamente por tránsito categoría A.

**Tránsito expreso.** El que recorre largas distancias, prácticamente sin detenerse y a velocidades relativamente altas.

**Tránsito generado.** El tránsito que origina indirectamente una mejora en el sistema vial que aumenta a su vez la intensidad de la explotación o uso del terreno.

**Tránsito horario.** Es el número total de vehículos que pasan durante una hora por un punto de control.

**Tránsito inducido.** El que no existía antes y se origina por la construcción o mejora de una vía.

**Tránsito local.** El que tiene su origen y destino dentro del área que se considera.

**Tránsito mensual.** Es el número total de vehículos que pasan durante un mes por un punto de control.

**Tránsito pendular.** El que está constituido principalmente por vehículos que llevan (como conductores o pasajeros) viajeros cotidianos, es decir, personas que realizan el mismo viaje, ida y vuelta, todos los días

**Tránsito promedio diario anual (TPDA).** Promedio de los volúmenes de tránsito que circulan en 24 horas durante un año.

**Tránsito semanal.** Es el número total de vehículos que pasan durante una semana por un punto de control.

**UTRAQ - Urban Traffic Management and Air Quality.** Proyecto que utiliza datos atmosféricos generados por satélite para diseñar la gestión del tráfico y estrategias para reducir los niveles de contaminación, es financiado en parte por la Agencia Espacial Europea.

**Validación de datos.** Trata de determinar si el modelo de simulación conceptual (en oposición al programa de computadora) es una representación exacta del sistema en estudio. Si un modelo es válido, entonces la decisión tomada con el modelo debe ser similar a las que se harían experimentando físicamente con el sistema.

**Viaje.** Desplazamiento de una persona desde un origen hasta un destino, usando uno o varios modos de transporte para cumplir un propósito específico o realizar una actividad determinada.

**Vehículo flotante.** Vehículo usado en los estudios de tiempos de recorrido y demora, que “flota” en la corriente vehicular o trata de sobrepasar un número de vehículos igual a los que lo sobrepasan.

**Vehículo piloto.** El que se usa en estudios de ingeniería de tránsito para la medida de ciertas variables, observando características de su marcha.

**Velocidad de diseño.** La seleccionada para proyectar y relacionar entre sí las características físicas de una vía que influyen en la marcha de los vehículos.

**Velocidad de Marcha Promedio: Distancia total recorrida por todos los vehículos en el volumen de tránsito, dividida por el tiempo de viaje total para todos los vehículos.**

**Velocidad de operación.** Máxima velocidad media de marcha que pueden mantener con seguridad los conductores en condiciones habituales, sin exceder la velocidad directriz o de diseño.

**Velocidad de Proyecto:** Es la velocidad máxima (segura) que se puede mantener sobre un tramo específico de vía cuando las condiciones son lo suficientemente favorables para que las características de diseño de la vía gobiernen la operación del vehículo.

**Velocidad de Punto:** Velocidad a la cual un vehículo pasa en un punto de la vía.

**Velocidad de recorrido.** Cociente que resulta de dividir el espacio andado por un vehículo entre el tiempo de recorrido correspondiente a ese espacio, incluyendo demoras producidas por paradas. Es realmente la media espacial de las velocidades instantáneas del vehículo cuando recorre ese espacio.

**Velocidad media espacial.** Es la velocidad media a lo largo de un tramo. Para un vehículo, es la relación entre la longitud del tramo y el tiempo de marcha o recorrido del vehículo. Para una corriente vehicular es la media de las velocidades instantáneas de los vehículos que se encuentran en un tramo en un momento dado. Se estima dividiendo la longitud del tramo entre el promedio de los tiempos de marcha o de recorrido del número de vehículos observados.

**Velocidad media temporal.** Para un vehículo, es la media de sus velocidades ponderadas por la duración de esas velocidades en un período de tiempo dado. Para una corriente vehicular, es la media aritmética de las velocidades individuales de los vehículos en un punto de la vía durante un período de tiempo dado. Se puede calcular de medidas directas de velocidades puntuales, o estimarse a partir de medidas de tiempos de recorrido en un tramo de vía generalmente corto. Excepto en el caso improbable en que todos los vehículos vayan a la misma velocidad, la velocidad media temporal es algo mayor que el estimativo correspondiente de la velocidad espacial debido a las propiedades de las medias aritméticas y armónicas.

**VOC - Compuestos Orgánicos Volátiles.** Corresponden a cualquier compuesto de carbono que participan en la formación de ozono troposférico, las principales fuentes antropogénicas constituyen los procesos de combustión del tráfico y las industrias.

**Volumen de tránsito.** Número de vehículos o peatones que pasan por un punto de una vía o cualquiera de sus partes por unidad de tiempo, que suele ser un día o más de una hora.

**Volumen de tránsito mixto.** Volumen que comprende vehículos ligeros y pesados.

**Volumen en la hora pico.** El que circula durante la hora pico.

**Volumen horario de máxima demanda (VHMD).** Máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril o de una calzada durante 60 minutos consecutivos.

**Volumen horario de proyecto (VHP).** Volumen de tránsito horario que se utiliza para determinar las características geométricas de la vía.

**Volumen horario máximo de tránsito.** Permite determinar el máximo volumen de tránsito registrado durante el período del estudio, y a través de éste se identifica cuál es la hora pico. Se expresa en vehículos por hora.

**Volumen horario máximo anual (VHMA).** Máximo volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril o de una calzada durante un año determinado, es decir, es la hora de mayor volumen de las 8,760 horas del año.