



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres, Transporte y Logística

IMPLEMENTACIÓN DE REDUCTORES DE VELOCIDAD EN MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO.
ANÁLISIS GEOMÉTRICO, DE EMISIONES CONTAMINANTES Y CONSUMO DE CARBURANTE.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres, Transporte y Logística.

Presenta:

Ing. Cecilia Vásquez Sánchez

Dirigido por:

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

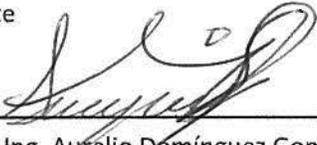
Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Presidente

M. en C. José Alfredo Zepeda Garrido
Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente

M. en C. Juan Fernando Mendoza Sánchez
Suplente



Dr. en Ing. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería



Dra. en C. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2016
México

RESUMEN

Los reductores de velocidad son dispositivos utilizados en las vialidades con el fin de reducir la velocidad de los vehículos, sin embargo, los efectos de dichos dispositivos sobre la corriente vehicular aún no están del todo claros. Por lo anterior, mediante estadística descriptiva y la estimación de modelos lineales se realiza un análisis del efecto de su geometría y espaciamiento, en el sentido de las emisiones contaminantes y del consumo de combustible, considerando como caso de estudio una calle colectora. Los resultados indican que la geometría es el factor más importante para la efectividad en la disminución de la velocidad, obteniendo una disminución de 50% a 75% de la velocidad con el uso de geometría circular y de 10% a 65% de reducción de velocidad con geometría trapezoidal. El espaciamiento entre reductores no afecta significativamente la velocidad que los vehículos tendrán al pasar sobre dichos dispositivos, pero sí influye en las emisiones contaminantes y consumo extra de combustible dependiendo de la geometría de los reductores de velocidad, a mayor ancho disminuye su eficiencia en la reducción de la velocidad, mientras que la altura del dispositivo es la variable que refleja mayor significación en la reducción de la velocidad. A partir de lo anterior, es necesario considerar en su implementación la velocidad máxima en el espaciamiento entre reductores y qué tipo y geometría del reductor, puesto a que un mayor número de aceleraciones - desaceleraciones incrementa la cantidad de emisiones contaminantes y consumo de combustible.

Palabras clave - Reductores de velocidad, flujo vehicular, variaciones en la velocidad, emisiones polucionantes, Querétaro.

SUMMARY

Speed reducers are devices used in the roads in order to reduce the vehicle's speed. However, the effects of such devices on the traffic flow are not yet entirely clear. Therefore, an analysis of the effect of geometry and spacing is made, through descriptive statistics and estimation of linear models; in the sense of pollutant emissions and fuel consumption. Considering as a case study, a collector street. The results indicate that the geometry is the most important for the effectiveness in decreasing the velocity factor; resulting in a decrease of 50% to 75% speed using circular geometry and from 10% to 65% speed reduction with trapezoidal geometry. The spacing between humps do not affect significantly the speed that vehicles will have when passing on these devices, but does influence pollutant emissions and extra fuel consumption depending on the geometry of humps, greater width decreases their efficiency in reducing speed, while the height of the device is the variable reflecting the greater significance in reducing speed. From the above, it is necessary to consider in its implementation the maximum speed in the spacing between reducers and what type and geometry of humps, since more acceleration - deceleration increases the amount of pollutant emissions and fuel consumption.

Keywords - Humps, traffic flow, variations in speed, polluting emissions, Querétaro.

DEDICATORIAS

Primeramente, a Dios por guiarme y cuidarme, a mi familia quien siempre me ha apoyado en todos mis propósitos, a mi director de tesis por su paciencia y apoyo, a mis amigos y compañeros que me apoyaron en la realización de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente el apoyo de mis padres Mauricio Vásquez Luis y Martha Sánchez Vásquez, a quienes amo y son la motivación de mis logros, a mis hermanos Luis Eduardo Vásquez Sánchez y Erika Vásquez Sánchez por sus palabras de aliento en cada paso de mi vida, de igual manera le agradezco a mis tíos, primos, amigos y compañeros que siempre han estado apoyándome y deseándome lo mejor en mi vida, a mi director de tesis el Dr. Saúl Obregón Biosca por ser mi guía y apoyo en la realización de esta investigación, a la Dra. María de la Luz Pérez Rea, Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, Mtro. José Alfredo Zepeda Garrido y Mtro. Juan Fernando Mendoza Sánchez por sus observaciones realizadas en este estudio, logrando mejorar mi tema, así mismo agradezco el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar otra meta más en mi vida profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1	ANTECEDENTES	11
1.2	JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.1	HIPÓTESIS Y OBJETIVO	15
1.1.1	HIPÓTESIS.....	15
1.1.2	OBJETIVO	15
2	ESTADO DEL ARTE	16
2.1	DISPOSITIVOS DE CONTROL DE VELOCIDAD.....	16
2.2	EXTERNALIDADES DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD	18
2.2.1	DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD.....	18
2.2.2	SEGURIDAD INDUCIDA POR LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD.	21
2.2.3	GEOMETRÍA DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD Y SU UBICACIÓN.	23
2.2.4	OTRAS EXTERNALIDADES.....	30
2.3	MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO	33
2.3.1	RECOMENDACIONES EN LA UTILIZACIÓN DE UN MICRO SIMULADOR DE TRÁFICO	34
2.3.2	EL MODELO LOOK AHEAD.....	37
2.3.3	LA VARIABILIDAD EN EL CAMBIO DE CARRIL EN LAS SECCIONES	39
2.3.4	EL MODELO DE GIPPS.....	40
2.3.5	MODELO QUARTET, (QUA92)	41
2.3.6	MODELO EMISIÓN DE CONTAMINACIÓN QUARTET	44
2.3.7	EL MODELO DE PANIS et al. (2006).....	46
3	METODOLOGÍA	47
3.1	DETERMINACIÓN DE LOS TIPOS DE REDUCTORES DE VELOCIDAD PARA ESTUDIO.	47
3.2	DETERMINACIÓN DE LA VIALIDAD DE ESTUDIO.	48
3.3	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA.	50
3.4	OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE CAMPO.	51
3.4.1	OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIALIDAD.....	51
3.4.2	OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS REDUCTORES PRESENTES EN LA VIALIDAD EN ESTUDIO.....	52
3.4.3	OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DE PUNTO DE VEHÍCULOS ANTES, SOBRE Y DESPUÉS DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD.....	54
3.5	OBTENCIÓN DE LAS SECCIONES DE ACCELERACIÓN Y DESACELERACIÓN EN LOS DIFERENTES ESPACIAMIENTOS ENTRE REDUCTORES.	57
3.6	ANÁLISIS DE DATOS, ELABORACIÓN DE CARTAS DE CONTROL, Y OBTENCIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	58
3.7	SIMULACIÓN DEL TRÁFICO EN EL PROGRAMA AIMSUN.	59
3.8	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS SIMULADOS EN AIMSUN.	60
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN.....	61

4.1.1	VALIDACIÓN DEL FLUJO VEHICULAR (q) SIMULADO EN AIMSUN.....	61
4.1.2	VALIDACIÓN DE LAS VELOCIDADES SIMULADAS VS LAS VELOCIDADES OBTENIDAS CON EL VEHÍCULO INSTRUMENTADO Y LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	62
4.1.3	VALIDACIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES	64
4.2	ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES DE PUNTO OBTENIDAS CON EL VEHÍCULO INSTRUMENTADO	66
4.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CON RESPECTO A LAS EMISIONES CONTAMINANTES.	89
4.4	DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA MÍNIMA ENTRE REDUCTORES DE VELOCIDAD, QUE DISMINUYA EL GASTO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES CONTAMINANTES OCASIONADAS POR LOS VEHÍCULOS.	93
5	CONCLUSIONES	95
6	BIBLIOGRAFÍA.....	97
7	ANEXOS	102

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO GEOMÉTRICO PARA REDUCTORES DE VELOCIDAD.	24
TABLA 2 VALORES DE ESPACIAMIENTO UTILIZADOS ACTUALMENTE EN LA INSTALACIÓN DE REDUCTORES DE VELOCIDAD (HUMP).....	29
<i>TABLA 3 JURISDICCIÓN DE LOS LINEAMIENTOS DE COLOCACIÓN DE REDUCTORES DE VELOCIDAD (HUMP).</i> .	30
TABLA 4 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS MICRO-SIMULADORES DE TRÁFICO.	36
TABLA 5 COMPARACIÓN DE LOS SIMULADORES AIMSUN Y PARAMICS.	37
TABLA 6 CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE ACUERDO AL ESTADO DEL VEHÍCULO.	43
TABLA 7 DIMENSIONES DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD Y ESPACIAMIENTO.	53
TABLA 8 TASA DE FLUJO VS VEHÍCULOS SIMULADOS EN AIMSUN.	61
TABLA 9 T DE DOS MUESTRAS PARA FLUJO REAL VS. SIMULADO.....	61
TABLA 10 T DE DOS MUESTRAS PARA VEL. REALES VS. SIMULADO.....	62
TABLA 11 T DE DOS MUESTRAS PARA VEL. REGRESIÓN VS. SIMULADO.....	63
TABLA 12 EMISIONES PROMEDIO DE MONÓXIDO DE CARBONO MEDIDAS Y LAS OBTENIDAS CON AIMSUN.	64
TABLA 13 T DE DOS MUESTRAS PARA MEDIDO VS. SIMULADO.....	65
TABLA 14 MEDIA DE VELOCIDADES MÁXIMAS Y MEDIA ESPACIAL ENTRE LOS ESPACIAMIENTOS DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD.	78
TABLA 15 VELOCIDAD PROMEDIO SOBRE LOS REDUCTORES CIRCULARES Y TRAPEZOIDALES A DIFERENTES ESPACIAMIENTOS.....	79
TABLA 16 MODELOS ESTIMADOS PARA LOS REDUCTORES CIRCULARES.	80
TABLA 17 MODELOS ESTIMADOS PARA LOS REDUCTORES TRAPEZOIDALES.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 PERFILES DE REDUCTORES DE VELOCIDAD USADOS COMÚNMENTE (EWING, 1999)	23
FIGURA 2 <i>SPEED CUSHIONS</i>	25
FIGURA 3 DIFERENCIA ENTRE UN SPEED BUMP Y UN SPEED HUMP.....	25
FIGURA 4 RED (TEJEDURA) CON EL MODELO LOOK AHEAD.....	39
FIGURA 5 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD.....	47
FIGURA 6 REDUCTOR DE VELOCIDAD	48
FIGURA 7 LOCALIZACIÓN DE LOS 100 REDUCTORES DE VELOCIDAD. RC: REDUCTORES CIRCULARES; RT: REDUCTORES TRAPEZOIDALES	49
FIGURA 8 UBICACIÓN DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD SOBRE AV. DE LA LUZ.	50
FIGURA 9 VISTA FRONTAL DE LA VIALIDAD EN ESTUDIO.	52
FIGURA 10 OBTENCIÓN DEL LARGO DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD.	53
FIGURA 11 OBTENCIÓN DEL ALTO DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD.	53
FIGURA 12. REPRESENTACIÓN DE LOS 15 REDUCTORES DE VELOCIDAD PRESENTES SOBRE AV. DE LA LUZ.	54
FIGURA 13 LOCALIZACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PUNTO SOBRE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD (HUMP) (100 FT=30 METROS).....	55
FIGURA 14 VEHÍCULO.	56
FIGURA 15 EQUIPO GPS PARA LA OBTENCIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LA RUTA.....	56
FIGURA 16 OBTENCIÓN DE LAS DISTANCIAS DE ACELERACIÓN Y DESACELERACIÓN EN TRANSCAD.....	58
FIGURA 17 USO DE SECCIONES DE ACELERACIÓN Y DESACELERACIÓN PARA LA SIMULACIÓN.	59
FIGURA 18 GRÁFICA COMPARATIVA DE LAS VELOCIDADES OBTENIDAS EN CAMPO VS LAS VELOCIDADES SIMULADAS EN AIMSUN.....	63
FIGURA 19 GRÁFICA COMPARATIVA DE LAS VELOCIDADES OBTENIDAS CON LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL Y LAS VELOCIDADES SIMULADAS.....	64
FIGURA 20 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 1.....	66
FIGURA 21 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 1.....	66
FIGURA 22 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 2.....	67
FIGURA 23 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 2.....	67
FIGURA 24 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 3.....	67
FIGURA 25 CARTA DE DESV. ESTÁNDAR DEL REDUCTOR 3.....	67
FIGURA 26 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 4.....	68
FIGURA 27 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 4.....	68
FIGURA 28 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 5.....	69
FIGURA 29 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 5.....	69
FIGURA 30 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 6.....	69
FIGURA 31 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 6.....	69
FIGURA 32 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 7.....	70
FIGURA 33 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 7.....	70
FIGURA 34 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 8.....	70
FIGURA 35 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 8.....	70
FIGURA 36 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 9.....	71
FIGURA 37 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 9.....	71
FIGURA 38 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 10.....	71
FIGURA 39 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 10.....	71

FIGURA 40 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 11.....	72
FIGURA 41 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 11.....	72
FIGURA 42 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 12.....	72
FIGURA 43 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 12.....	72
FIGURA 44 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 13.....	73
FIGURA 45 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 13.....	73
FIGURA 46 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 14.....	73
FIGURA 47 CARTA DE DESV. EST. DEL REDUCTOR 14.....	73
FIGURA 48 CARTA DE MEDIAS DEL REDUCTOR 15.....	74
FIGURA 49 CARTA DE DESV. EST. REDUCTOR 15.....	74
FIGURA 50 GRÁFICA DE CONTROL DE LAS MEDIAS PARA LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD CIRCULARES.	74
FIGURA 51 GRÁFICA DE CONTROL DE LAS MEDIAS PARA LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD TRAPEZOIDALES.....	75
FIGURA 52 GRÁFICA DE CONTROL DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD CIRCULARES.....	76
FIGURA 53 GRÁFICA DE CONTROL DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD TRAPEZOIDALES.....	77
FIGURA 54 GRÁFICA DE VELOCIDAD MÁXIMA Y MEDIA ESPACIAL.....	85
FIGURA 55 ECUACIÓN DE REGRESIÓN AJUSTADA PARA LA PREDICCIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE REDUCTORES TRAPEZOIDALES DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD MEDIA ESPACIAL.....	86
FIGURA 56 ECUACIÓN DE REGRESIÓN AJUSTADA PARA LA PREDICCIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE REDUCTORES TRAPEZOIDALES DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PROMEDIO.....	86
FIGURA 57 ECUACIÓN DE REGRESIÓN AJUSTADA PARA LA PREDICCIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE REDUCTORES CIRCULARES DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD MEDIA ESPACIAL.....	87
FIGURA 58 ECUACIÓN DE REGRESIÓN AJUSTADA PARA LA PREDICCIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE REDUCTORES CIRCULARES DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PROMEDIO.....	87
FIGURA 59 ECUACIÓN DE REGRESIÓN AJUSTADA PARA LA PREDICCIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE REDUCTORES CIRCULARES Y TRAPEZOIDALES DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PROMEDIO.....	88
FIGURA 60 ECUACIÓN DE REGRESIÓN AJUSTADA PARA LA PREDICCIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE REDUCTORES CIRCULARES Y TRAPEZOIDALES DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD MEDIA ESPACIAL.....	88
FIGURA 61 GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE LAS TRES SIMULACIONES.....	89
FIGURA 62 GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ CUANTIFICADAS DE LAS TRES SIMULACIONES.....	90
FIGURA 63 GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE NO _x DE LAS TRES SIMULACIONES.....	92
FIGURA 64 GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE LAS TRES SIMULACIONES.....	92
FIGURA 65 GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES DE LAS TRES SIMULACIONES.....	93

1 INTRODUCCIÓN

El reductor de velocidad se describe en Yu *et al.* (2011) como un dispositivo utilizado en las calles locales con el fin de reducir la velocidad de los vehículos. Existen diferentes estudios, expuestos en Chadda *et al.* (1985) quienes los analizan y exponen que los resultados de investigación y de campo reportados son contradictorios, puesto que, algunos han demostrado que los reductores de velocidad son eficaces para cumplir su finalidad, mientras que otros estudios concluyeron que estos dispositivos de control no son eficaces para la reducción de velocidades globales. Por lo anterior, en Massimiliano (2002) se menciona que las técnicas empleadas para calmar el flujo en las vialidades deben ser planificadas con el apoyo de las observaciones científicas con el fin de evaluar una disminución significativa en la velocidad, así como un análisis del verdadero costo-beneficio para la comunidad.

Un factor importante de analizar es su impacto al medio ambiente, en el sentido de las emisiones contaminantes producidas por los vehículos puesto que, tal como se señala en Mar (2001), las emisiones contaminantes generadas a nivel mundial por los autos, autobuses, camiones y otros vehículos automotores juegan un papel de progresiva importancia en el cambio del clima y contaminación del aire a nivel global.

Una forma de cuantificar las emisiones inducidas por la instalación de reductores de velocidad, es mediante la microsimulación de tráfico, la cual es una técnica conveniente que emula las operaciones reales del tráfico en un computador (TSS, 2013), éste tal como se expone en Yu *et al.* (2013) un simulador de tráfico es de fácil operación y con alta exactitud en relación con los costos que se tendrían con una prueba de vehículos en el mundo real, reduciendo a su vez lo tiempos y limitación de espacio de un vehículo de prueba. Así, la aplicación de *software* de simulación microscópica permite una fácil extracción de los datos necesarios utilizados como datos originales para la estimación, incluyendo datos del detector y datos de señal de intersección.

Sobre la base de lo mencionado anteriormente por Massimiliano (2002) y las contradicciones que señalan Chadda *et al.* (1985) en lo referente a la funcionalidad de los reductores de velocidad, esta investigación pretende encontrar qué tipo de geometría de los reductores de velocidad presentan mayor impacto en la disminución de la velocidad de los vehículos y por otro lado determinar su espaciamiento considerando los diferentes tipos de reductores que nos disminuyan las emisiones contaminantes y gasto de combustible. Para determinar lo anterior, se realizaron recorridos con un vehículo instrumentado sobre la Av. de la Luz, en el municipio de Querétaro, México. Se seleccionó dicha vialidad debido a que hay instalados dos tipos de reductores de velocidad, los de geometría circular y los de geometría trapezoidal, lo anterior para poder comparar el efecto inducido por las diferentes geometrías en la reducción de velocidad, además de sus dimensiones y espaciamientos.

1.1 ANTECEDENTES

En las últimas décadas los avances tecnológicos han evolucionado exponencialmente, creando medios de transporte más rápidos y eficientes, y tal como se menciona en Mar (2001), esto se debe a que los sistemas de transporte son una parte esencial de la vida económica y social. La Agenda 21 (Plan de acción propuesto por la ONU para el siglo XXI) señala que esto ha provocado el aumento en la necesidad de este sector, sin embargo, puesto que los transportes son en gran parte el origen de las emisiones a la atmósfera, es necesario realizar un estudio de los sistemas actuales de transporte para instalar y administrar los sistemas de circulación y transporte más eficaces y con menores externalidades negativas.

Lo sistemas de transporte en lo que concierne a los automóviles, han evolucionado también, haciéndolos más rápidos. En Quistberg y Miranda (2010) se señala que es un aspecto por considerar, ya que los choferes suelen conducir un poco más rápido de lo permitido tanto en vías rápidas como en zona residenciales,

lo que ha ocasionado según Grundy *et al.* (2009), se presenten lesiones de tráfico debidas al exceso de velocidad, las cuales son una de las principales causas de muerte y discapacidad en el mundo, sin dejar aunado la mala cultura tanto del conductor como del peatón, en donde la experiencia de algunos países como Estados Unidos; reportado en Quistberg y Miranda (2010), ha mejorado la seguridad vial a través de estrategias educacionales como campañas sociales, programas de capacitación en las escuelas, y educación de los padres acerca de la seguridad vial; por lo expuesto, surge la necesidad de reducir la velocidad de los vehículos en las vialidades de diferentes países, a través de la instalación de reductores de velocidad, semáforos ó uso de radares de velocidad para controlar y aplicar sanciones a quienes rebasen los límites de velocidad.

En países como Perú, el problema de la velocidad es un tema de interés debido al incremento considerable de siniestralidades debidas al tráfico, ocasionando como menciona Quistberg y Miranda (2010), colocación de reductores de velocidad en las calles con presencia de altos volúmenes de tráfico, sin embargo, no se obtuvieron los resultados deseados después de su colocación, lo que dio pauta a reflexionar que no sea lo más eficiente para reducir el índice de accidentes, pero sí contribuye a la reducción de velocidad. En Edmonton, Canadá, El-Basyouny (2013) reportó una investigación acerca de la percepción que se tiene con respecto a la seguridad del tráfico dentro de seis comunidades de estudio, con la finalidad de reducir la velocidad de 50 km/h a 40 km/h. Expone que el estudio fue realizado en dos etapas: pre-piloto y post-piloto. La meta se logra mediante la comparación de las respuestas obtenidas de una **primera** encuesta telefónica con preguntas sugestivas acerca de la problemática del exceso de velocidad y sus consecuencias, con una **segunda** encuesta realizada días posteriores a la primera, dando como resultado una disminución significativa en el exceso de velocidad y un aumento en las preocupaciones y seguridad. Otro estudio realizado en Portugal reportado por Marques *et al.* (2005) con la finalidad de reducir la velocidad de los vehículos y los accidentes, se llevó a cabo la instalación de señales de tráfico en diferentes lugares sobre la carretera para servir como dispositivos de reducción de velocidad, obteniendo así la disminución de las velocidades y de accidentes, pero teniendo

como efecto negativo, el aumento del tráfico y de paradas innecesarias, y por ende contribuyendo al aumento de las emisiones contaminantes. En este sentido, el incremento del tráfico induce una serie de externalidades negativas, de los cuales Tapia (1998) destaca el aumento en los sucesos no intencionados que genera una alza en las tasas de mortalidad y lesiones, obteniendo una relación cantidad-efecto. Lo anterior reafirma que el problema del tráfico no solo es un problema ambiental, sino también de carácter social, en donde se afecta a los usuarios vulnerables de manera directa ocasionando lo que se denomina como siniestralidad.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Para determinar cómo afectan los reductores de velocidad en el tiempo de viaje, es necesario obtener las demoras ocasionadas por éstos, y de esta manera predecir el porcentaje en que influyen en el congestionamiento y en la generación de emisiones contaminantes.

En el sentido de los reductores de velocidad Quistberg y Miranda (2010) mencionan que en los pueblos nacientes y zonas residenciales puede resultar importante su implementación, con el fin de disminuir el tráfico que existe en las calles y avenidas, pero, sin embargo, expone que se han realizado muy pocos estudios correctamente sobre este tema y es posible que los efectos resulten diferentes en vialidades como las de Perú, por eso es importante asegurar que las intervenciones que se proponen sean las apropiadas y que sean medidas de manera rigurosa para asegurar que realmente producen los resultados y beneficios esperados.

Como se expuso, las emisiones contaminantes son una de las externalidades negativas en el uso de los vehículos de combustión interna, y varían dependiendo principalmente del tipo de vehículo y de su velocidad. En Mar (2001) se sostiene que las emisiones contaminantes son mayores en los vehículos que

transitan a baja velocidad, cuando se encuentra encendido sin moverse (congestionamientos y transporte público cuando hace paradas) y en condiciones de arranque en frío para vehículo que emplean bujías. Resultando importante conocer el papel que juegan los reductores de velocidad, para dichas condiciones. En Yu *et al.* (2013) se menciona que para poder simular de manera más real las condiciones del tráfico, se necesita tener más información involucrada en este, por ello se pretende introducir la demora ocasionada por los diferentes reductores de velocidad, con la finalidad de mejorar la estimación del tráfico y poder detectar los problemas ocasionados por dichos dispositivos.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad existen varios factores que influyen en el aumento de las emisiones contaminantes ocasionado por los vehículos, tales como son: el clima, el tráfico, los dispositivos de control, los reductores de velocidad, entre otros. Como ya se expuso, por un lado, existen diferentes investigaciones enfocadas en determinar la cantidad de emisiones contaminantes que producen los automóviles y por el otro, las relacionadas con efecto de los dispositivos de control en el tráfico generado. Por lo anterior, es de interés determinar la relación de ambos factores para mejorar el sistema de movilidad, mitigando el efecto de los reductores de velocidad en el tráfico y cuantificando la disminución en sus emisiones contaminantes.

En muchos países son utilizados con frecuencia los reductores de velocidad en sus diferentes tipos y geometrías, con la finalidad de disminuir la velocidad de los conductores, pero debido a la falta de estudios respecto a su influencia que tienen en el del tráfico y perceptor de la generación de emisiones contaminantes, su uso se ha disparado a tal grado que en países como México, podemos encontrar hasta dos reductores consecutivamente sobre una vialidad, por ello se pretende

obtener la colocación adecuada de los reductores de velocidad con la finalidad de disminuir el tráfico y las emisiones contaminantes.

1.1 HIPÓTESIS Y OBJETIVO

1.1.1 HIPÓTESIS

La implementación de reductores de velocidad en los modelos de microsimulación de tráfico permite cuantificar las externalidades polucionantes y posibilita la adecuación de espaciamientos en condiciones de Flujo Libre para minimizar los consumos de carburante y de emisiones contaminantes.

1.1.2 OBJETIVO

Adecuar la colocación de reductores de velocidad para disminuir las emisiones contaminantes y gasto energético inducidas por el flujo vehicular.

1.1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Cuantificar las emisiones contaminantes generadas por los reductores de velocidad.

Disminuir la velocidad vehicular hasta obtener la velocidad deseada mediante el uso de reductores de velocidad.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describe qué son los dispositivos de control de velocidad y el origen de su uso, así también se presentan las externalidades generadas por dichos dispositivos, además de la relación de su geometría y ubicación con la seguridad generada. Además, se abordan las características del programa de simulación AIMSUN utilizado en esta investigación y la descripción de algunas de sus herramientas empleadas para la cuantificación de emisiones contaminantes; éste programa nos ayudará a alcanzar nuestros objetivos y con el conocimiento de estudios relacionados al tema, se podrá adecuar mediante la simulación, la colocación de reductores de velocidad que nos disminuyan las emisiones contaminantes y gasto energético inducidas por el flujo vehicular.

2.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL DE VELOCIDAD.

En Hallmark et al. (2002) se menciona que el concepto de calmar o pacificar el tráfico se introdujo en la ciudad de Delf (Holanda) en 1970, cuando funcionarios de dicha ciudad construyeron un reductor de velocidad de 8 cms de altura, colocado al final de un callejón. El Instituto de Ingeniería de Transporte (ITE) introdujo en 1997 el término de “calmar el tráfico”, el cual es una combinación de medidas, principalmente físicas, que reducen los efectos negativos del uso de vehículos de motor, alteran el comportamiento del conductor, y mejoran las condiciones para los usuarios no motorizados de la vialidad; para poder disminuir la velocidad de los vehículos. En Molan y Kordani (2014) se señala que existen tres categorías de acuerdo al mecanismo que se utiliza que son: control de volumen, control de velocidad horizontal, y el control de velocidad vertical, dentro de esta última categoría se encuentran los vados y montículos los cuales son llamados

generalmente reductores de velocidad, en México se les conoce coloquialmente como “tope”.

En Salau et al. (2004) se expone que los reductores de velocidad desempeñan un papel importante en la aplicación de los límites de velocidad, lo que impide el exceso de velocidad de los vehículos, y contribuyen a la seguridad de peatones y daños en el automóvil. En Johansson *et al.* (2011) se explica que los reductores de velocidad son una medida física común instalada en los pasos peatonales para reducir la velocidad del vehículo por lo tanto, indican que mejoran la seguridad y la movilidad de los peatones en el cruce.

De acuerdo a Yu et al. (2011), el reductor de velocidad es un dispositivo utilizado en las calles locales con el fin de reducir la velocidad de los vehículos. En Abaza et al. (2012) se indica que las medidas de control de velocidad verticales conocidos como reductores de velocidad, son una técnica geométrica para mantener la velocidad del vehículo dentro de la velocidad de funcionamiento deseada, utilizados para disminuir la velocidad de los vehículos principalmente de aquellos que circulan cerca de residencias, aunque destacan que no son un dispositivo de control oficial del tráfico; por su parte Zainuddin et al. (2014) mencionan que los reductores de velocidad están diseñados para garantizar la seguridad de los conductores y peatones, y que su uso en calles de zonas residenciales es una forma eficaz de controlar la velocidad de los vehículos que viajan en ellos.

A partir de lo mencionado por Yu et al. (2011), Abaza et al. (2012) y Zainuddin et al. (2014) se deduce que dichos dispositivos de control son una medida física utilizada en las calles locales para disminuir la velocidad de los vehículos, lo que induce tal como mencionan Salau et al. (2004), Johansson et al. (2011) y Zainuddin *et al.* (2014) ha aumentar la seguridad de peatones y automóviles que transitan por una vialidad.

2.2 EXTERNALIDADES DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD

Existen diversos estudios acerca del impacto que tienen los reductores de velocidad en el tráfico de las vialidades, estos con diferentes enfoques, de los cuales podemos mencionar la contaminación atmosférica, contaminación sonora, velocidad de los vehículos y seguridad en la vialidad con dichos dispositivos.

Por lo anterior, se plantea en el presente apartado considerar las aportaciones en los diversos enfoques que estén relacionados con la disminución de la velocidad en las vialidades, la distribución y ubicación adecuadas, las diferentes geometrías de los reductores de velocidad y su longitud y otras externalidades como la contaminación y la disminución de los accidentes. Lo anterior da un panorama más amplio acerca de la importancia de regular la colocación de los reductores de velocidad y los parámetros ha tomar en cuenta para poder normar su colocación.

2.2.1 DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD.

En lo que respecta a la disminución de la velocidad, su importancia nace según menciona, Hallmark (2002) en los Países Bajos en la década de 1960, debido al aumento de los volúmenes de tráfico y popularidad del automóvil, provocando que se comenzaran a recibir quejas del público sobre el exceso de velocidad, y consecuentemente fue necesario implementar sistemas para pacificar el tráfico, de los cuales, según Massimiliano (2002), existen tres categorías que son:

- 1.- La ejecución de la policía.
- 2.- Los estímulos visuales (señales de advertencia y dispositivos similares).
- 3.- Los estímulos táctiles, que usan dispositivos que producen vibraciones y/o ruido en el interior del vehículo (reductores de velocidad).

Enfocándonos en la última categoría, el cual es nuestro tema de interés, podemos mencionar que existen diferentes conclusiones respecto al tema; algunos autores como Allen (1975), concluyen que los reductores de velocidad no son eficaces en la reducción de velocidad del vehículo. En este sentido, Massimiliano (2002) sostiene que muchos estudios realizados en los últimos 20 años muestran que dichos dispositivos tienen efecto limitado en la disminución de la velocidad de tráfico, especialmente en comparación con los dispositivos de control de velocidad pasiva mejor diseñada, tales como (*humps y cushions*). En sentido opuesto, en Hallmark *et al.* (2002) se expone que los reductores de velocidad reducen eficazmente la corriente vehicular tanto en pequeñas comunidades como en grandes áreas urbanizadas. Yu *et al.* (2011) nos exponen que los reductores de velocidad son un importante dispositivo de control de velocidad que se ha utilizado ampliamente para reducir la velocidad de los vehículos en las calles locales, sin embargo, en Huang *et al.* (2011) se menciona que los efectos del reductor de velocidad sobre la corriente vehicular aún no están claros puesto que se necesita más investigaciones sobre este tema.

De lo anterior, podemos inferir que es necesario hacer una investigación más detallada, en donde se analice la geometría del reductor y su relación con la eficacia en la disminución de la velocidad de los vehículos.

Diversas investigaciones se han esforzado en conocer el impacto que tienen los reductores de velocidad en la disminución de ésta, por ejemplo, Li (2012) indica que los reductores de velocidad de caucho son altamente utilizados y pueden disminuir la velocidad de un vehículo de 30-50 km/h en 5-20 km/h. En Yu *et al.* (2011) se asegura que la utilización del módulo RSA (Reduced Speed Area) bien calibrado en VISSIM, ofrece una simulación razonable de operación de los vehículos que interactúan con badenes colocados en las vialidades; así, es importante conocer también la desaceleración y aceleración que se tiene antes y después de pasar sobre un dispositivo de control de velocidad, de acuerdo a Huang *et al.* (2011) los conductores empezaron a disminuir la velocidad del vehículo unos 40 metros antes de pasar sobre un dispositivo de velocidad y después de pasar por dicho

dispositivo la longitud fue de 50 metros para que el vehículo obtuviera la velocidad de operación de la carretera, el autor también menciona que el uso de reductores de velocidad no se recomienda en carreteras con volúmenes pesados, también Massimiliano (2002) menciona que el comportamiento de los conductores de automóviles cambia después de la instalación de un badén ya que prestan más atención a la carretera que a otros usuarios de la misma.

Swanson et al. (1998) menciona que los estudios realizados en Australia, el Reino Unido y los Estados Unidos han mostrado reducciones de la velocidad en un 85 percentil, entre los reductores de velocidad de forma trapezoidal que van de 3 a 14 mph y reducciones de 6 a 27 mph en la localización del reductor de velocidad, mientras que en la comunidad de Michigan se presenta una reducción de 5 mph de la velocidad 85 percentil, así mismo indican que los estudios han demostrado que los reductores de velocidad trapezoidal más largos (*speed table*) reducen considerablemente la velocidad 85 percentil del tráfico convencional, pero añaden que solo utilizando reductores de velocidad trapezoidal o reductores de velocidad redondos, la velocidad entre estos antes y después de su colocación es prácticamente la misma.

Chadda et al. (1985) comentan que muchos resultados de los estudios de investigación y de campo reportados son contradictorios, algunos de ellos han demostrado que los reductores de velocidad son eficaces en la reducción de velocidad sin disminuir la seguridad del conductor y del vehículo bajo ciertas condiciones, mientras que otros estudios concluyeron que los reductores de velocidad no son eficaces en la reducción de velocidades globales, pero presentan un riesgo inmediato y específico para algunos vehículos (bicicletas, motocicletas, entre otros), y que además provocan la contaminación acústica en la zona residencial y otros estudios como el realizado por Ewing (1999) concluyeron que los reductores de velocidad no han tenido el efecto deseado recomendando así su eliminación.

De los estudios antes mencionados es importante determinar si el reductor de velocidad es eficaz o no, y bajo qué características se tiene un mejor funcionamiento, por ello es necesario tomar en cuenta lo mencionado por Massimiliano (2002) que las técnicas para disminuir el tráfico deben ser planificadas con el apoyo de las observaciones científicas, para evaluar el verdadero costo-beneficio para la comunidad. Este análisis debe realizarse a cabo mediante la evaluación de una disminución significativa en la velocidad del flujo de tráfico, número de los accidentes y la contaminación ambiental y acústica también, dos efectos realzados por los altos niveles de velocidad. Desde este punto de vista, la adopción de reductores de velocidad como un método pasivo para la reducción de ésta, aunque es económico, parece crear más problemas de los que resuelve.

2.2.2 SEGURIDAD INDUCIDA POR LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD.

En Allen (1975) se expone que los reductores de velocidad presentan un riesgo inmediato y específico para algunos vehículos como bicicletas, motocicletas entre otros, y recalca que son un peligro potencial para todos los vehículos, además añade que estos dispositivos causarían el aumento de la contaminación acústica en los barrios residenciales. Por su parte, Massimiliano (2002) menciona que la disminución repentina de la velocidad y la aceleración antes y después del reductor de velocidad es a menudo una fuente de accidentes, ocasionando que los conductores tiendan a realizar una serie de maniobras para reducir su incomodidad antes de llegar a la protuberancia, hecho el cual es evidente en las calles donde los reductores de velocidad no se extienden por todo el ancho de la calle.

Li (2012) sostiene que no hay ninguna especificación de diseño geométrico definido en la aplicación real, lo que resulta en una gran cantidad de riesgos de seguridad potenciales y de la contaminación acústica, pero gracias a que los reductores de velocidad disminuyen la velocidad de los vehículos estos pueden aumentar la seguridad del tráfico y del entorno. En Huang et al. (2011) se menciona que aunque los reductores de velocidad son útiles en el control de velocidad de los

vehículos, se debe prestar atención cuando se emplean para mejorar la seguridad del tráfico en las calles locales, estos no deben ser colocados en cualquier carretera sobre todo en aquellas con límites de velocidad indicados mayor a 40 km/h o en carreteras con volúmenes pesados ya que afectaría negativamente a la seguridad del tráfico, además añade Zainuddin *et al.* (2014) que los reductores de velocidad (*humps*) están diseñados para garantizar la seguridad de los conductores y peatones, pero son dispositivos que no cuentan con dimensiones estandarizadas, son dispositivos con una ubicación de instalación inadecuada, de tal manera que pueden estar demasiado cerca de un cruce, y llegan a tener rechazo por los residentes locales debido a sus efectos negativos; otros autores como Molan y Kordani (2014) indican que los reductores de velocidad son de uso generalizado en todo el mundo y que a pesar de su desempeño eficaz en el aumento de la seguridad, causan considerable daños a los vehículos y molestias a los conductores y pasajeros, así mismo hace mención que casi 1.2 millones de muertes están relacionadas con el tráfico y 50 millones de lesiones se producen cada año en todo el mundo, más de la mitad de los cuales involucran a los peatones, especialmente en los países en desarrollo, por otra parte se prevé que las muertes y lesiones por tráfico se incrementarán en un 65% en 2020 debido al rápido aumento en el uso de vehículos particulares en los países en desarrollo (Organización Mundial de la Salud 2004).

De acuerdo con el Departamento para el Transporte del Reino Unido, en su Nota 1/07 de Transporte Local para calmar o pacificar el tráfico, menciona que entre todos los dispositivos para pacificar el tráfico, los reductores de velocidad tienen el mejor rendimiento en términos de la reducción de la velocidad, el flujo de tráfico y lesiones por accidentes, así como tener mayor grado de aceptación pública.

En lo que respecta a las investigaciones relacionadas a la seguridad inducida por los reductores de velocidad, según Li (2012), Zainuddin *et al.* (2014) y Huang *et al.* (2011), podemos sostener que la seguridad generada por dichos dispositivos tiene una relación con su geometría y el flujo de tránsito presente en la vialidad donde son colocados.

2.2.3 GEOMETRÍA DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD Y SU UBICACIÓN.

Algunos autores como Massimiliano (2002) mencionan que la geometría de los reductores de velocidad es importante para garantizar la disminución de la velocidad en los vehículos, sin embargo, Zainuddin *et al.* (2014) afirman que a pesar de la importancia que tienen los reductores de velocidad como dispositivo de tráfico, existe muy poca investigación en cuanto a su diseño, esto con la finalidad de encontrar la geometría adecuada del reductor de velocidad que lo haga menos peligroso para la conducción de automóviles a una velocidad aceptable, además menciona que utilizando el 85 percentil de la velocidad en campo en conjunto con el diseño geométrico de los reductores, estos manifiestan una relación estadísticamente significativa mediante la utilización de regresión lineal múltiple, asimismo Massimiliano (2002) menciona que dispositivos más grandes en sus dimensiones, son más útiles en la reducción de la velocidad del tráfico. Por lo mencionado anteriormente es de importancia conocer la relación de la geometría y sus dimensiones de dichos dispositivos con la reducción de la velocidad del tráfico.

Cabe mencionar que existen diferentes formas en la geometría de los reductores de velocidad, estos pueden ser sinusoidales, circulares, parabólicos o trapezoidales, tales como los presenta Hallmark *et al.* (2002), y que se muestran en la Figura 1.

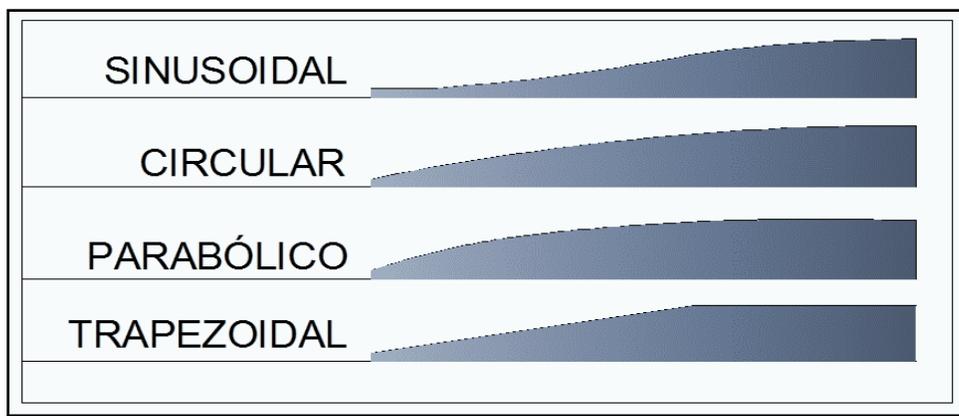


Figura 1 Perfiles de reductores de velocidad usados comúnmente (Ewing, 1999)

En Swanson *et al.* (1998) se indica que el reductor de velocidad es generalmente de 7.62 a 10.16 centímetros (3 a 4 pulgadas) de alto con una sección redondeada de 3.66 metros (12 pies) de largo del pavimento, mientras que un reductor de velocidad de sección trapezoidal es de aproximadamente 30.48 a 45.72 centímetros (12" a 18") de largo, causando una irregularidad en el pavimento mayor, la cual es sentida por el conductor, otro tipo de reductor de velocidad es la de forma trapezoidal pero con una mayor longitud plana de la parte superior, este tipo de dispositivo son típicamente de 55.8 cm (22 pulgadas) de largo con una sección plana de 3.05 m (10 pies) y se puede utilizar en las carreteras colectoras con un tránsito vehicular mayor de 12000 vehículos por día, este tipo de reductores de velocidad pueden servir como pasos peatonales, también los autores mencionan que para las calles residenciales típicas el diseño más utilizado en los reductores de velocidad es el circular y el parabólico. El diseño de la sección de los reductores de velocidad es fundamental para su eficacia. El Traffic Engineering Council (ITE, 1997), sugiere una longitud de 3.66 m (12 pies) y una altura de 7.62 a 10.16 cm (3 a 4 pulgadas) para un reductor de velocidad de forma parabólica.

Tabla 1 Especificaciones de diseño geométrico para reductores de velocidad.

Tipos	Dimensiones			Material
	Longitud (m)	Altura (mm)	Velocidad (km/h)	
HPU (2002)				
Reductor de velocidad con superficie plana	2.5-4	75-100		Mezcla asfáltica
Reductor de velocidad redondo	3.7-4	50-100		
Reductor de velocidad sinusoidal	3.8-4	75-100		
SIRIM (2009)				
Reductor de velocidad parabólico, redondo y sinusoidal	3.7-4.25	75-100	15-30	Mezcla asfáltica, concreto o caucho

Fuente: Zainuddin et al. (2014)

Además de los reductores de velocidad mencionados anteriormente, también existen los llamados *speed cushions*, los cuales son de un largo corto y se colocan varios a lo ancho de la vialidad, como se muestra en la Figura 3.



Figura 2 Speed cushions
Fuente: RoadKare International (2015).

Debido a que en la ciudad de estudio en que se realizará este proyecto no existen *speed cushions*, no se podrá analizar la separación recomendable para este tipo de dispositivo de velocidad.

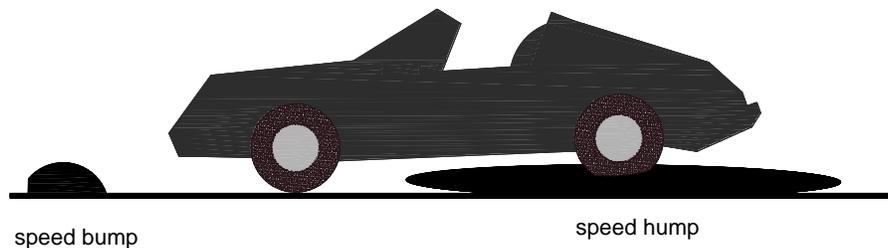


Figura 3 Diferencia entre un Speed Bump y un Speed Hump.
Fuente: Swanson et al. (1998).

Respecto a la ubicación de los reductores de velocidad, Hallmark *et al.* (2002) mencionan que la distancia de visibilidad vertical debe ser considerada al determinar la ubicación de un reductor de velocidad, consiguiendo así que a los conductores no los tome por sorpresa su presencia, así mismo el Traffic Engineering

Council (ITE, 1997), sugiere que un reductor de velocidad sea colocado a una distancia de 60.96 m (200 pies) o menos después de una señal de alto o una curva horizontal corta. Sin embargo también se sugiere que un reductor de velocidad no debe estar dentro de los 76.2 m (250 pies) de una señal de tráfico; otras consideraciones son mencionadas por Swanson *et al.* (1998) señalando que éstos dispositivos de control de tráfico permanente se deben utilizar al mínimo, así mismo su colocación debe permitir la entrada a todas las propiedades, además de no intervenir en los accesos de una arteria cercana a un destino cualquiera, para ello los autores mencionan que hay que prestar atención a la circulación, estacionamientos y necesidades de los clientes y propietarios de negocios, considerarse las necesidades de acceso a servicios comerciales, tales como recogida de basura, quita-nieve, transporte escolar, entre otros; los cambios no deben afectar indebidamente a las zonas vecinas; también añaden que la colocación de una serie de reductores de velocidad es más efectivo en la reducción de la velocidad que solo colocando un reductor de velocidad mismo que se confirma en Hallmark *et al.* (2002), mencionando que la colocación de una serie de reductores de velocidad es más efectivo en la reducción de la velocidad que la colocación de uno solo, ha esto Swanson *et al.* (1998) añaden que el espaciamiento entre los reductores de velocidad oscila entre los 60.96 a 228.6 m (200 a 750 pies), dependiendo de la velocidad deseada percentil 85 entre ellos. Así mismo se añade que la importancia de la ubicación de un reductor de velocidad radica en su efectividad para disminuir la velocidad, tal como mencionan Hallmark *et al.* (2002) si los reductores de velocidad están demasiado separados la velocidad de los vehículos entre dichos dispositivos no disminuirá y los recursos se verían desperdiciados, y a la vez, si estos se encuentran demasiado juntos, los residentes locales pueden sentir que los reductores son una molestia innecesaria y los niveles de confort serían inaceptables.

Como ejemplo de lo dicho anteriormente, se tiene el caso de Phoenix, Arizona, reportado por Ewing (1999), en donde las separaciones entre los reductores de velocidad eran de 152.4 m (500 pies), los cuales no redujeron significativamente la velocidad de los vehículos, y en cambio en Bellevue,

Washington donde la separación era de 45.72 m (150 pies), ocasionó quejas que encausaron a la eliminación de reductores de velocidad, dejando solo una separación de 91.44 m (300 pies).

El subcomité encargado de los dispositivos de control de tráfico de California, de acuerdo a ITE (1997) desarrollaron una ecuación aproximada para el espaciamiento de reductores de velocidad de 7.62 cm (3 pulgadas) de altura, la ecuación es la siguiente:

$$H_s = 0.5[2(V_{85})^2 - 700] \dots\dots\dots (1)$$

En donde:

H_s es el espaciamiento óptimo (en pies) entre reductores de velocidad de 7.62 cm (3 pulgadas) de altura y,

V_{85} es la velocidad deseada 85 percentil entre los reductores de velocidad.

Abaza et al. (2012) señalan que los espaciamientos obtenidos con la ecuación anterior, recomendada por el ITE (1997) da en general arreglos para uno, dos y tres reductores de velocidad. En Hallmark et al. (2002) se señala de la ecuación anterior, que ésta no indica si se aplica a un reductor de velocidad con perfil parabólico y/o trapezoidal, así como tampoco toma en cuenta el largo del reductor de velocidad en dirección al recorrido.

Por lo anterior, Abaza et al. (2012) recolectaron los datos de velocidades de 12 zonas con presencia de reductores de velocidad obteniendo la velocidad 85 percentil del conductor para cada uno de las áreas de estudio, una velocidad promedio ponderada se calculó teniendo en cuenta todas las ubicaciones, pudiendo obtener así un modelo de regresión apropiado de alrededor de 69.3 por ciento, el cual se muestra a continuación:

$$X = 20.5 V_1 + 9.2V_2 + 24.9V_3 - 933.6 \dots\dots\dots(2)$$

Dónde:

X: espaciamiento óptimo entre reductores de velocidad,

V₁: percentil 85 de velocidad del vehículo a 100ft. (30 m) antes del reductor de velocidad (mph),

V₂: es el percentil 85 la velocidad del vehículo en el punto medio del reductor de velocidad (mph), y

V₃: es el percentil 85 de velocidad del vehículo 100 ft. (30 m), después del reductor de velocidad (mph).

De acuerdo a los autores el modelo puede ser utilizado para calcular el espaciamiento óptimo entre reductores de velocidad, puesto que para su análisis se consideraron los espaciamientos entre los reductores analizados, así mismo dicen que la misma técnica se puede aplicar para sistemas de reductores de velocidad a través de la aplicación repetitiva del modelo, así mismo añaden que es necesario realizar nuevas mediciones de velocidad para los futuros reductores de velocidad que permitirán que el modelo pueda ser calibrado para reflejar el comportamiento de los conductores actuales, cabe recalcar que el modelo fue generado para reductores de velocidad sinusoidales.

Este modelo fue comparado por los autores con la ecuación 1, reportada por el ITE (1997), en la cual señalan que las separaciones óptimas obtenidas por las diferentes ecuaciones muestran diferencias menores a medida que aumentan las velocidades llegando a una diferencia de cero en 34 mph y que a medida que disminuían las velocidades los resultados mostraron diferencias significativas entre los dos modelos. En comparación con los modelos anteriores y el obtenido en nuestra investigación, nuestra variable dependiente es la velocidad sobre el reductor, obteniendo así dos modelos de regresión lineal múltiple de acuerdo al tipo de reductor, que para nuestro estudio son los circulares y los trapezoidales, para

dichos modelos se tiene como variables independientes lo que son las dimensiones del reductor, así como la velocidad máxima deseada entre reductores (ver Tabla 15 y 16). Para obtener los espaciamientos entre reductores nos podemos basar en la ecuación presentada en la Figura 59.

En Hallmark et al. (2002) se presenta un resumen de las recomendaciones de separación de los reductores de velocidad trapezoidales (*speed hump* /table) utilizado en los Estados Unidos, el cual se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Valores de espaciamiento utilizados actualmente en la instalación de reductores de velocidad (hump).

Jurisdicción	Espaciamiento (ft)
Fairfax, Virginia	No menos de 500
Kuna, Idaho	600 mínimo
Thousand Oaks, California	150 a 400
Fort Worth, Texas	300 a 1600
Pennsylvania DOT	250 a 600
Atlanta, Georgia	200 a 700
Cobb County, Georgia	300 a 500
Gwinnett County, Georgia	350 a 500
San Antonio , Texas	300 a 890
Seattle, Washington	326 a 553
Austin, Texas	300 a 500
Bellevue, Washington	200 a 300
Berkeley, California	150 a 400
Boulder, Colorado	150 a 800
Howard County, Maryland	400 a 600
Montgomery County, Maryland	400 a 600
Phoenix, Arizona	No más de 500
Portland, Oregon	300 a 600

Fuente: Ewing, 1999; Urban et al., 1999; Pennsylvania DOT, 2001; Clement, 2001; Vazquez, 2000; City of Fairfax, 2001; Marek and Walgren, 1998; Ballard, 1998; Szplett and Fuess; 1999; City of Austin, 2001.

Hallmark et al. (2002) presentan una lista de jurisdicciones utilizadas en los Estados Unidos para la colocación de un reductor de velocidad de forma trapezoidal de longitud larga (*speed table*) tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Jurisdicción de los lineamientos de colocación de reductores de velocidad (hump).

Jurisdicción	Lineamientos
Fairfax, Virginia	200' de una intersección
Thousand Oaks, California	50' a 200' de intersecciones, señales de Alto, y "curvas cerradas"
	5' a 10' de caminos de entrada
Fort Worth, Texas	300' de señales de tráfico, señales de Alto, o señales ceda el paso (<i>yield</i>)
	75' de intersecciones sin control
Pennsylvania DOT	Prohibido en curvas horizontales con radios menores de 300'
	Prohibido en grados más grandes que 8%
	150' de intersecciones sin semaforización
Gwinnett County, Georgia	250' de intersecciones semaforizadas
	Prohibido en grados más grandes que 8%
	100' a 200' de señales de alto o "pequeñas" curvaturas geométricas

Fuente: Urban et al., 1999; Pennsylvania DOT, 2001; Clement, 2001; Vazquez, 2000; City of Fairfax, 2001.

2.2.4 OTRAS EXTERNALIDADES.

En Mar (2001) se menciona que las emisiones contaminantes generadas a nivel mundial por los autos, autobuses, camiones y otros vehículos automotores juegan un papel de progresiva importancia en el cambio del clima y contaminación del aire a nivel global. Los vehículos automotores son grandes consumidores de petróleo, lo que los hace una fuente importante de bióxido de carbono; compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y óxidos de nitrógeno, precursores tanto de ozono troposférico como de lluvia ácida; el monóxido de carbono (CO); y los clorofluorocarbonos (CFC). Todos estos gases contribuyen al calentamiento por el efecto de invernadero ya sea directa o indirectamente; los CFC además contribuyen a la reducción de la capa de ozono estratosférico; Por ello el cuantificar las emisiones contaminantes que producen los vehículos permite percibir el impacto que tienen sobre el medio ambiente, y tal como exponen Keuken, et al. (2005, citado

en Torné, 2013) el tráfico es uno de los principales contaminantes del aire y de emisiones de gases de efecto invernadero, y dicha emisión según Mar (2001) varía con el escenario del vehículo, es decir, su emisión es mayor a baja velocidad, en vehículos encendidos sin moverse y en arranque en frío para vehículos que emplean bujías.

Respecto a lo anterior Menchaca y Mendoza (2013) sostienen que es de importancia la magnitud del problema en México, pues de acuerdo al inventario oficial de emisiones para México del año 1999 (INE 2000), en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), los vehículos de combustión interna fueron causantes de la emisión a la atmósfera del 99% del monóxido de carbono (CO), 64% de los óxidos de nitrógeno ($\text{NOX} = \text{NO} + \text{NO}_2$), 66% de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y 8.1% de los óxidos de azufre ($\text{SOX} = \text{SO}_2 + \text{SO}_3$)” y a pesar que los vehículos y los combustibles han sido mejorados, las emisiones contaminantes en México ha ido en aumento, ya que como señala Mar (2001), los sistemas de transporte son una parte esencial de la vida económica y social, debida a la globalización en la que nos encontramos.

Dicho esto señalamos que existen diversas investigaciones enfocadas a obtener la producción de las emisiones contaminantes de los vehículos, una de ellas, la de Michel (2004), que desarrolla análisis específicos para medir las emisiones contaminantes por medio de tres tipos de conducción (urbana, rural y de autopista) montadas para representar las condiciones reales del uso de vehículos en el tráfico, y reproducir la diversidad de estas condiciones, por medio de una estructura en forma de sub-ciclos que permite un análisis detallado de las emisiones de acuerdo a condiciones específicas (tráfico congestionado, fluido, entre otros).

Otro método es la utilización de programación lineal, sobre la cual Pérez (2010) menciona que es posible construir la tasa de emisión óptima a partir de la emisión original, para cada fuente contaminante que actúa en una región acotada de la atmósfera, en donde el criterio central es que no se rebase cierta concentración.

Cabe mencionar que los reductores no sólo impactan en el aumento de emisiones contaminantes como ya se presentó anteriormente, si no también hay que tomar ciertas consideraciones para su uso, tal como subraya Swanson *et al.* (1998) que todos los dispositivos de control verticales instalados de forma permanente deberán estar diseñados para permitir el acceso de vehículos de emergencia, además los reductores de velocidad pueden ser instalados en las carreteras que llevan 3,000-8,000 vehículos por día. Algunos de los efectos negativos de los reductores de velocidad son un aumento del nivel de ruido de los vehículos individuales cerca de los reductores de velocidad causados por el frenado y aceleración, pero no debido al sonido de los vehículos golpeando los reductores de velocidad. Los estudios han demostrado que los reductores de velocidad tienen un impacto más severo en vehículos más largos y no deben ser utilizados en rutas frecuentemente utilizadas por grandes camiones o autobuses ni en rutas frecuentes de ambulancias, así también los reductores de velocidad son un obstáculo en los países de clima frío a la hora de retirar la nieve, el autor enfatiza que a medida que más y más dispositivos para disminuir el tráfico son colocados, la cuestión de legalidad de su uso pueden convertirse en irrelevantes.

Además de lo anterior, se añade el aspecto de seguridad, como señala Abaza *et al.* (2012) que en un estudio de caso de la Revista Americana de Salud Pública mostró que la instalación de reductores de velocidad se asoció con la disminución de la probabilidad de niños siendo heridos; sin embargo en regiones con condiciones de nieve, la falta de visibilidad a lo largo de la carretera originado por el nevado es más pronunciado que en otras regiones, ocasionando el aumento a rebotar excesivamente contra los reductores de velocidad pudiendo resultar en lesiones para los pasajeros de los vehículos, especialmente entre los ancianos, por estas razones el autor considera importante tomar en cuenta las características del vehículo y las condiciones ambientales para la colocación de un reductor de velocidad.

También añadimos que para poder garantizar la seguridad en una vialidad se debe tomar en cuenta lo mencionado por Johansson *et al.* (2011) que cuando un

vehículo viaja a velocidades de 50 km/h la probabilidad de muerte de peatones es 5.8 veces mayor que a 30 km/h; en éste estudio se obtuvieron por medio de entrevistas, la percepción de los niños acerca de la velocidad que llevaba un vehículo a una distancia corta entre un cruce peatonal y de un reductor de velocidad, en este caso de “*cushions*”, a lo cual los niños dijeron que las velocidades eran más altas y que era difícil para ellos saber si el conductor del vehículo se detendría o no; con el estudio realizado se pudo notar que la velocidad de los vehículos fueron menores cuando la distancia de un reductor de velocidad y un cruce peatonal eran mayores de 10 metros aproximadamente antes de un cruce peatonal, así mismo los autores añaden que es razonable suponer que la velocidad de un vehículo en un paso de peatones depende principalmente de la altura del reductor de velocidad (*cushions*), siempre y cuando la distancia entre el cruce y el reductor de velocidad no sea bueno. Lo expuesto anteriormente lleva a los autores a deducir que a mayor distancia entre un reductor de velocidad y un paso peatonal debería hacer más fácil el cruce para los niños y ancianos ya que estos percibirían mejor si un conductor se detendrá o no, lo que aumentaría la seguridad y movilidad de los peatones.

2.3 MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

En este apartado se abordarán las características del programa de simulación AIMSUN, el cual emplearemos para reproducir los efectos de los reductores de velocidad en una vialidad. El programa se eligió por que cumple con las características necesarias para ser usado en nuestro estudio como se muestra en la Tabla 4, así mismo podemos destacar que es un programa amigable con el usuario y la extracción de datos es sencilla para su análisis, además se describirán algunas herramientas que este programa utiliza para la cuantificación de emisiones contaminantes, ya que uno de los objetivos de ésta investigación es encontrar la distancia entre reductores de velocidad que disminuya dichas emisiones producidas por los vehículos.

2.3.1 RECOMENDACIONES EN LA UTILIZACIÓN DE UN MICRO SIMULADOR DE TRÁFICO

Como se ha mencionado anteriormente el micro simulador de tráfico a utilizar en esta investigación es el programa AIMSUN, en el cuál se obtiene la producción de emisiones contaminantes a partir de los dos modelos del medio ambiente, que son el consumo de combustible y el de emisión de contaminantes. AIMSUN puede modelar la emisión de contaminantes de todos los vehículos en la simulación, de igual manera que el consumo de combustible en los diferentes estados del vehículo (ralentí, crucero, aceleración o desaceleración) y la aceleración de la velocidad del vehículo se utiliza para evaluar las emisiones de cada vehículo para cada paso de simulación. Esto se hace haciendo referencia a tablas de consulta para cada contaminante, que dan emisiones (en gr/s) para cada combinación correspondiente al comportamiento del vehículo (velocidad / aceleración). Hay diferentes tipos de tablas de consulta para cada tipo de vehículo y para cada contaminante. Por el momento, se considera un máximo de tres contaminantes, correspondientes a (monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados). Cabe mencionar que los valores que toma el programa AIMSUN para la cuantificación de emisiones contaminantes para los coches y los autobuses de gasolina son tomados del proyecto Europeo QUARTET (92).

Para cuantificar las emisiones producidas por los reductores de velocidad, se plasmará en una simulación de la manera más real posible las condiciones actuales que presentan las vialidades con reductores de velocidad; sin embargo, se sabe que no existen programas que simulen dichos dispositivos, pero se puede aplicar algún algoritmo, como el que realizó Yu *et al.* (2013) en donde con el uso de un algoritmo propuesto, pudo simular la estimación del tiempo de viaje en arterias urbanas saturadas.

A partir de estos métodos de medición y conociendo las condiciones actuales del lugar en estudio (tráfico, velocidad del flujo, capacidad vial, entre otros),

es posible determinar con precisión la afectación inducida por los reductores de velocidad en el aumento de las emisiones contaminantes y tiempos de recorrido.

La simulación microscópica es una alternativa conveniente de fácil operación y con alta exactitud en relación con los costos que se tendrían con una prueba de vehículos en el mundo real, reduciendo a su vez lo tiempos y limitación de espacio de un vehículo de prueba (Yu *et al*; 2013). Así, la aplicación de *software* de simulación microscópica permite una fácil extracción de los datos necesarios utilizados como datos originales para la estimación, incluyendo datos del detector y datos de señal de intersección.

De acuerdo con Yu *et al.* (2013), si se quiere obtener estadísticas en un estado de tráfico saturado para una unidad de vehículo individual, debemos obtener la velocidad y el tiempo de cada viaje para un vehículo en cada eslabón, y tener el flujo de tráfico y la velocidad media en cada intersección. Además, con el fin de obtener información para las decisiones efectivas de control de tráfico, los datos deben ser filtrados, analizados, y recopilados. Así también el uso de un pelotón como la unidad de adquisición de información puede reflejar de manera efectiva las características generales de las arterias urbanas saturadas.

Por lo mencionado anteriormente el uso del programa AIMSUN, resulta ser eficiente para el estudio que se pretende hacer, como podemos notar en la Tablas 4 y 5 que se presentan a continuación, se aprecia que dicho programa es amigable con el usuario, en comparación con otros simuladores, además este cuenta con dos modelos de medio ambiente descritos anteriormente, por ello el uso de este micro simulador de tráfico se ajusta a nuestras necesidades para cumplir con el objetivo que se quiere alcanzar.

Tabla 4 Características de algunos micro-simuladores de tráfico.

Característica	AIMSUN	CORSIM	DRÁCULA	PARAMICS	VISSIM
Asignación de vehículos en la red	Opción 1, Frecuencia sigue una distribución normal Opción 2, Horario predefinido	Frecuencia fija	Frecuencia fija	Opción 1, Frecuencia fija Opción 2, Horario predefinido	Frecuencia fija
Definición de arco o línea	Secuencia de secciones, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, conectores y paraderos
Prioridad en vías	Pista de uso exclusivo	Pista de uso exclusivo	Pista de uso exclusivo	Pista de uso exclusivo	Pista de uso exclusivo
Prioridad en intersecciones	Semáforos actuados	Semáforos actuados	Semáforos actuados	Semáforos actuados	Semáforos actuados
Tipo de paraderos	Tradicionales, bahías y terminales	Tradicionales	Tradicionales y bahías	Tradicionales	Tradicionales y bahías
Modelo de llegada de pasajeros al paradero	No está implementado	Siguen distribución definida por el uso	Tasa media de llegada pax/h	Tasa media de llegada pax/h	Tasa media de llegada pax/h
Pasajeros diferenciados por línea	No está implementado	Información no disponible	No se diferencian	si	si

Fuente: Burgos (2004).

Tabla 5 Comparación de los simuladores AIMSUN y PARAMICS.

Características		Simulador	
		AIMSUN	PARAMICS
Imágenes	Que soporta	.jpg, .bmp, .tiff, .ecw, etc.	Soporta imágenes: .jpg, .bmp y .dxf
	Desventajas	Se comporta de manera inestable con archivo de planos	Al no importa archivos .tiff o .ecw, es que la imágenes deben ser escaladas de manera manual y los archivos .dxf, tienen problema de inestabilidad cuando son muy pesados o tienen muchas capas.
Tamaño de la red		No tiene límites	No tiene límites
Determinación de una vía de prioridad o secundaria		Es notorio	Poco notorio
Evitar bloqueo		Uso de la opción "yellow box"	Lo trabaja de manera más detallada
La regulación de la intersecciones es bastante similar en ambos modelos			
Tiempo entre dos vehículos sucesivos que ingresan a la red		Es determinado por el usuario (Distribución uniforme, Exponencial negativa o Normal (Aimsun User Manual 2009))	Es gobernada por una distribución Binomial negativa (Zhi 2003)
Modelo de seguimiento vehicular		Modelo Gipps (Aimsun User Manual 2009)	Modelo Fritzsche (Quadstone Paramic Manual 2009)
Salidas del modelo		Visual y analítica	Visual y analítica
Desempeño de tiempo de simulación		Muy buena	Buena

Fuente: elaboración propia en base a Zúñiga (2010).

2.3.2 EL MODELO LOOK AHEAD

De acuerdo a la TSS (2004) algunos modelados como distancias entre zonas de carril, paso de la simulación, tasas de aceleración, entre otros podrían mejorar el comportamiento con el fin de minimizar el número de vehículos perdidos, además el uso de poli secciones para modelar calles ayudaría en la situación. Para evitar este comportamiento indeseable tanto como sea posible, han incluido el modelo *Look Ahead* en AIMSUN cuyo objetivo principal es hacer que los vehículos

lleguen al carril de giro antes. La idea es proporcionar a los vehículos con el conocimiento de los siguientes movimientos adicionales de inflexión.

EL modelo de *Look Ahead* consiste básicamente en cuatro puntos:

1.- En cualquier momento, cada vehículo conoce los próximos dos movimientos de giro, por lo que la decisión de cambio de carril está influenciada por los dos movimientos consecutivos.

2.- Los carriles cambiantes de las zonas 2 y 3 de cualquier sección se extiende hacia atrás más allá de los límites de la sección, que afecta, por tanto, las secciones aguas arriba.

3.- El movimiento siguiente de giro influye en las maniobras de giro por lo que el carril seleccionado de destino se realiza con base en el próximo giro.

4.- Se da mayor variabilidad a la calle con zonas de cambio con el fin de distribuir el carril de cambio de maniobras a lo largo de una distancia más larga.

Para entender mejor cómo funciona el modelo *Look Ahead*, se presenta en la Figura 4 una sección con una zona 3, la cuál será la zona en la cual el vehículo cambiará de carril para poder hacer su próximo movimiento.

Cada vez que un vehículo entra en una nueva sección o poli sección, la vuelta siguiente se vuelve el próximo movimiento y un nuevo giro adelante se calcula, así el movimiento de la segunda sección se define de la sección de entrada actual y una tercera sección se define por la segunda sección y por la próxima sección.

El comportamiento de la conducción de los vehículos es tratar de llegar a un carril factible para el siguiente movimiento en la próxima sección. Esto se ilustra en la Figura 4 en donde un vehículo en la sección 3 ya se encuentra en el carril izquierdo con el fin de estar lo más cerca posible a la izquierda de la entrada a la segunda sección, así el movimiento será de 3 a 2 y después el próximo movimiento

del vehículo será de 2 a 4, así mismo el vehículo b lo que hará es colocarse lo más posible a la derecha ya que su destino es dar vuelta por delante a la derecha.

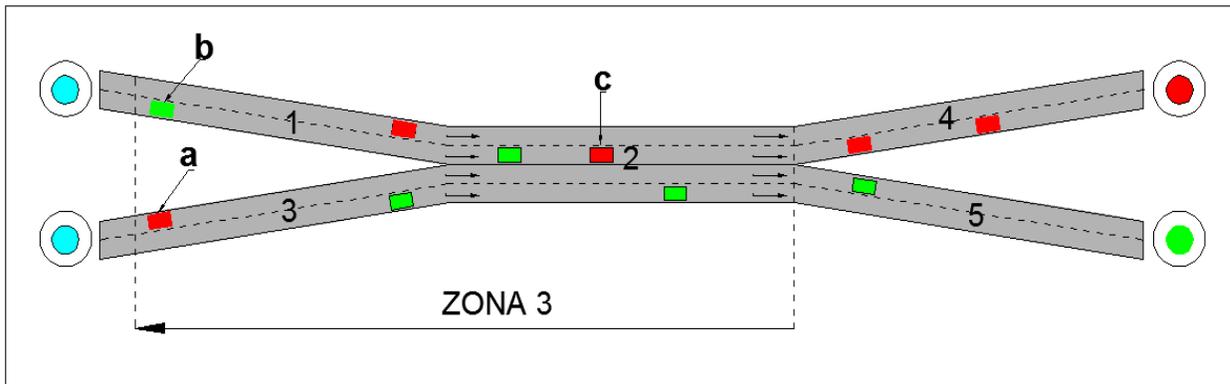


Figura 4 Red (tejedura) con el modelo Look Ahead.

2.3.3 LA VARIABILIDAD EN EL CAMBIO DE CARRIL EN LAS SECCIONES

Cuando un vehículo cruza de la zona 1 a la zona 2 se produce un cambio en el comportamiento del vehículo, ya que el siguiente turno ahora se convierte en relevante. También, cruzando desde la zona 2 a la zona 3 produce un cambio en las normas de comportamiento de los vehículos, como alcanzar el carril de giro ahora se convierte en urgente. Con el fin de distribuir estos cambios de comportamiento a lo largo de una distancia más larga, mayor variabilidad se da a las zonas de cambio de carril. Estas zonas se calculan especialmente para cada vehículo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$nVs = n*s*V \dots\dots\dots(3)$$

Distancia de la zona n para el vehículo V en la sección s (en metros) = Distancia de la zona n (en segundos) * límite de velocidad de la sección s * coeficiente del vehículo V .

Vehículo V = Coeficiente de límite de velocidad de la sección s / velocidad deseada del vehículo V en la sección s

Este algoritmo asegura que para los vehículos cuya velocidad deseada es más lento que el límite de velocidad, el carril de cambio de zonas será más largo que para los vehículos cuya velocidad deseada es mayor al límite de velocidad.

2.3.4 EL MODELO DE GIPPS

El programa AIMSUN el cuál se utilizará en ésta investigación, de acuerdo a TSS (2004), está integrado por un módulo llamado GETRAM extensión (API), un editor gráfico de la red de tráfico (TEDI), una base de datos de la red, un módulo para el almacenamiento de resultados y una interfaz de programación de aplicaciones que permite la interconexión con los modelos de asignación y para otros modelos de simulación. El módulo especial llamado GETRAM extensión (API), tiene una librería de funciones DLL que permiten al usuario desarrollar cualquier aplicación externa para tener acceso a datos internos de AIMSUN durante el tiempo de ejecución de la simulación. AIMSUN está programado en C y C ++, mismo lenguaje que permite incluir variables o controles.

El programa AIMSUN, aplica el modelo de seguimiento vehicular que se basa en el modelo Gipps (1981 y 1986). En este modelo los parámetros no son globales, pero se determina por la influencia de los parámetros locales en función del "tipo de controlador" (límite de velocidad de aceptación del vehículo), la geometría de la sección (límite de velocidad en la sección, entre otros.), la influencia de los vehículos en carriles adyacentes, entre otros.

Básicamente el modelo consiste en dos componentes, la aceleración y desaceleración. El primero representa la intención de un vehículo para alcanzar una cierta velocidad deseada, mientras que el segundo reproduce las limitaciones

impuestas por el vehículo precedente cuando se trata de conducir a la velocidad deseada.

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5 a(n)T \left(1 - \frac{V(n,t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n,t)}{V^*(n)}} \dots\dots\dots (4)$$

Este modelo establece que la velocidad máxima a la que un vehículo (n) puede acelerar durante un período de tiempo (t, t, T) en donde:

$V(n, t)$ es la velocidad de vehículo n en el tiempo (t);

$V^*(n)$ es la velocidad deseada del vehículo (n) para la sección actual;

$a(n)$ es la aceleración máxima para el vehículo n ;

T es el tiempo de reacción = actualización de intervalo = paso de simulación.

2.3.5 MODELO QUARTET, (QUA92)

El programa AIMSUN ofrece tres modelos ambientales que son:

- Modelo de consumo de combustible
- Modelo de emisiones contaminantes QUARTET
- Modelo de emisiones contaminantes Panis *et al.* (2006)

El modelo de consumo de combustible de AIMSUN asume que cada vehículo está en ralentí, cruzando a una velocidad constante, acelerando o desacelerando, por ende, el estado de cada vehículo es determinado y el modelo utiliza la fórmula adecuada para el cálculo del combustible consumido para estos estados.

Para el estado en ralentí y desaceleración del vehículo, la tasa de consumo de combustible en (ml/s) puede ser asumida como constante.

Para el estado en aceleración de un vehículo, el consumo de combustible está dado por la siguiente fórmula:

$$Fa = (C_1 C_2 av) \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

C1 y C2 son constantes;

a y v son la aceleración y la velocidad del vehículo respectivamente.

El consumo de combustible para un vehículo a velocidad de crucero, se determinó por Akcelic (1982), por la ecuación (6):

$$\frac{dF}{dt} = K_1 \left(1 + \frac{V^3}{2V_m^3} \right) + K_2 V \dots \dots \dots (6)$$

V es la velocidad a la que el combustible consumido por km es un mínimo. Por lo general se trata de unos 50 km / h.

El Departamento de Transporte (1994) del Reino Unido proporcionó las cifras de consumo de combustible para todos los coches nuevos. Entre las cifras dadas son el combustible de combustible en litros por cada 100 km, para vehículos que viajan a 90 km/h y 120 km/h. Estas cifras se pueden utilizar para determinar las constantes K_1 y K_2 mencionadas anteriormente. Podemos demostrar entonces que utilizando las tasas de consumo de combustible F_1 y F_2 en litros por 100 km/h para un vehículo viajando a una velocidad constante ya sea V_1 o V_2 respectivamente, entonces se tiene las siguientes fórmulas:

$$K_1 = \frac{(F_1 - F_2)v_1v_2v_m^3}{180 (2v_2v_m^3 - 2v_1v_m^3 + v_2v_1^3 - v_1v_2^3)} \dots \dots \dots (7)$$

$$K_2 = \frac{2F_2v_2v_m^3 - 2F_1v_1v_m^3 + F_2v_2v_1^3 - F_1v_1v_2^3}{360 (2v_2v_m^3 - 2v_1v_m^3 + v_2v_1^3 - v_1v_2^3)} \dots \dots \dots (8)$$

Como se mencionó anteriormente el consumo de combustible para cada vehículo se determinará según el estado en que se encuentre durante la simulación. Entonces el consumo de combustible para cada estado en que se encuentre el vehículo en Δt durante la simulación se utiliza las fórmulas dadas en la Tabla 6.

Tabla 6 Consumo de combustible de acuerdo al estado del vehículo.

Estado del vehículo	Consumo de combustible (ml) durante Δt
Ralentí	$F_i \Delta t$
Acelerando con aceleración \mathbf{a} (m/s/s) y velocidad \mathbf{v} (m/s)	$(c_1 + c_2 a v) \Delta t$
Cruzando a velocidad \mathbf{v} (m/s)	$(K_1(1 + (\frac{v}{2v_m})^3) + K_2 v) \Delta t$
Desaceleración	$F_d \Delta t$

Fuente: (TSS, 2013)

Donde F_i y F_d son la tasa de consumo de combustible en ml/s de ralentí y desaceleración de vehículos respectivamente, y las constantes C_1 y C_2 necesitan ser calibradas.

2.3.5.1 PARÁMETROS DE ENTRADA

Para cada tipo de vehículo se especificarán los siguientes seis parámetros de tasas de consumo de combustible en su editor:

F_i : Consumo de combustible del vehículo en estado de ralentí en ml/s.

C_1 y C_2 : Las dos contantes son para el estado de consumo de combustible en aceleración, F_a , en ml/s

F_1 : Consumo de combustible, en litros por cada 100 km, para vehículos viajando a una velocidad de 90 km/h.

F_2 : Consumo de combustible, en litros por cada 100 km, para vehículos viajando a una velocidad de 120 km/h.

V_m : Velocidad en la que el consumo de combustible ml/s, cruzando a una velocidad constante.

F_d : Consumo de combustible en ml/s en estado de desaceleración.

2.3.5.2 SALIDA

Los resultados obtenidos por el modelo de consumo de combustible son los siguientes:

- Para toda la red, se obtiene el total de km recorrido por todos los vehículos después de haber terminado su viaje y el total de combustible consumido por todos ellos en litros.
- Para cada sección y retorno se obtendrá el recorrido total en km por todos los vehículos que han pasado por esa sección y el total de combustible consumida por todos ellos en litros.
- Para cada ruta se obtendrá el total de km recorridos por todos los vehículos que han seguido ese camino y el total de combustible consumido por todos ellos en litros.

2.3.6 MODELO EMISIÓN DE CONTAMINACIÓN QUARTET

AIMSUN puede modelar las emisiones de contaminantes de todos los vehículos en la simulación en los diferentes estados anteriormente mencionados, y

para cada vehículo en cada paso de la simulación. Hay diferentes tipos de tablas de consulta para cada tipo de vehículo y para cada contaminante.

Por el momento se considera un máximo de tres contaminantes, que corresponden a los más utilizados que son: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos no quemados, pero se pueden considerar más contaminantes si es que se dispone de los datos.

2.3.6.1 PARÁMETROS DE ENTRADA

Los datos de entrada necesarios para el modelo de emisión de contaminantes en QUARTET es el siguiente:

Para cada tipo de vehículo, es decir; (coches, autobuses, camiones)

Para cada modelo de contaminante es decir (CO, NOx, HC);

1.- Nombre del contaminante

2.- Tasa de emisión para la aceleración de los vehículos en g/s (parámetro ARE en el editor)

3.- Tasa de emisión para la desaceleración de los vehículos en g/s (parámetro DER en el editor)

4.- Tasa de emisión para vehículos de ralentí en g/s (parámetro IER en el editor)

5.- Una tabla de consulta para los vehículos a una velocidad de crucero, con la velocidad en km/h en los puntos de quiebre, tasa de emisión en g/s, para un máximo de 15 flexiones.

6.- Una tabla de consulta para el impacto de pendiente sobre la contaminación que consiste en un conjunto de datos, velocidad en el punto de quiebre, pendiente en porcentaje, impacto, dependiendo de todos estos datos la contaminación se multiplicara por el impacto.

2.3.7 EL MODELO DE PANIS *et al.* (2006)

Aimsun puede modelar las emisiones contaminantes instantáneas causadas por la aceleración / desaceleración y velocidad para todos los vehículos, la simulación está basada en el artículo de Panis *et al.* (2006).

De acuerdo a Panis *et al.* (2006) consideran que la velocidad es un factor importante en las emisiones inducidas por el tráfico, particularmente de las emisiones causadas por la aceleración y desaceleración. Para poder obtener las emisiones contaminantes producidas por dichos estados, se base en una emisión instantánea relacionada con una velocidad instantánea y la aceleración del vehículo y posteriormente es integrado con un modelo de simulación microscópico.

Los contaminantes modelados fueron elegidos en base al impacto que tienen en la salud y costes externos, por lo anterior los autores consideraron los siguientes contaminantes: Dióxido de Carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas importantes (PM).

La anterior investigación encontró una ecuación general de regresión múltiple no lineal a partir de los datos de emisión de contaminantes basados en la velocidad y aceleración, obteniendo así todas las emisiones contaminantes como se muestra en la ecuación siguiente:

$$E_n(t) = \max [E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)] \dots \dots (9)$$

Donde:

$V_n(t)$ $a_n(t)$ son la velocidad instantánea y aceleración del vehículo n en el tiempo t.

E_0 es un límite inferior de emisiones (g/s) especificada para cada vehículo y contaminante.

f_1 a f_6 son emisiones constantes específicas para cada vehículo y el tipo de contaminantes es determinado por el análisis de regresión.

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los nueve pasos realizados para poder llevar a cabo este trabajo de investigación.

3.1 DETERMINACIÓN DE LOS TIPOS DE REDUCTORES DE VELOCIDAD PARA ESTUDIO.

Para llevar a cabo la determinación de los reductores de velocidad en estudio, se realizaron diferentes recorridos en la ciudad de Santiago de Querétaro, esto con el fin de detectar los tipos de dispositivos existentes sobre las diferentes vialidades recorridas.

Cabe mencionar que Galán y Vélez (2013), señalan que la sección geométrica de los reductores de velocidad por lo general es similar a un arco de círculo y se extiende en toda la sección de carretera, perpendicular a la dirección del flujo vehicular, por ello es importante tener como dato el ancho y su altura y otras medidas de ser necesario.

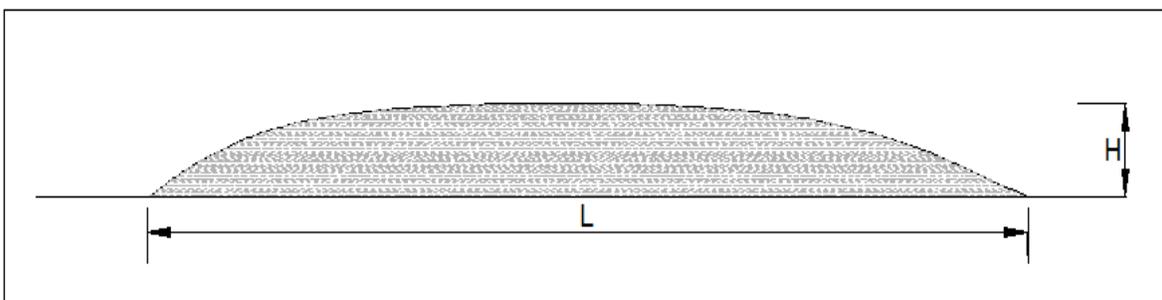


Figura 5 Sección transversal de un reductor de velocidad.
Fuente: Sistema nacional de carreteras (SINAC).

Dónde:

L: Ancho del reductor de velocidad.

H: Altura del reductor de velocidad.

De acuerdo a la norma N·PRY·CAR· 10·04·006/08 la forma y dimensiones de los reductores de velocidad son estructuras con superficies planas, que se construyen en el pavimento, con mezcla asfáltica en caliente o en frío o con concreto hidráulico simple y que cumplen con las dimensiones que se presentan en la Figura 6.

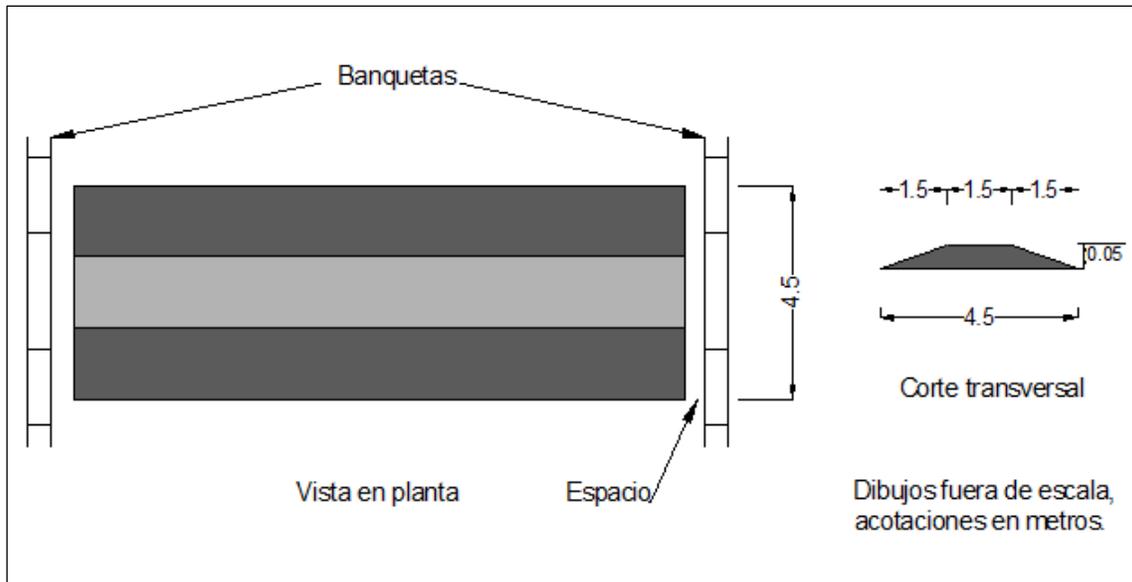


Figura 6 Reductor de velocidad

En los recorridos se encontraron el uso frecuente de dos tipos de reductores de velocidad, los circulares y los trapezoidales, por ello es que se decide estudiar estos dos tipos de geometrías.

3.2 DETERMINACIÓN DE LA VIALIDAD DE ESTUDIO.

Para la determinación de la vialidad en estudio, se inspeccionaron diferentes tramos de interés que contaran con reductores de velocidad, localizando 100 reductores de velocidad distribuidos en diferentes vialidades tal y como se

muestra en la Figura 7. Posteriormente se eligió el tramo que contara con las siguientes características:

- Ser una vialidad de importancia y accesible para llevar a cabo el estudio.
- La vialidad presente un flujo bajo a moderado.
- Contar con más de dos reductores de velocidad continuos.
- Tener sobre la vialidad los dos tipos de reductores de velocidad encontrados en la ciudad de Querétaro, los circulares y los trapezoidales.
- Poseer diferentes distancias de separación entre reductores de velocidad.

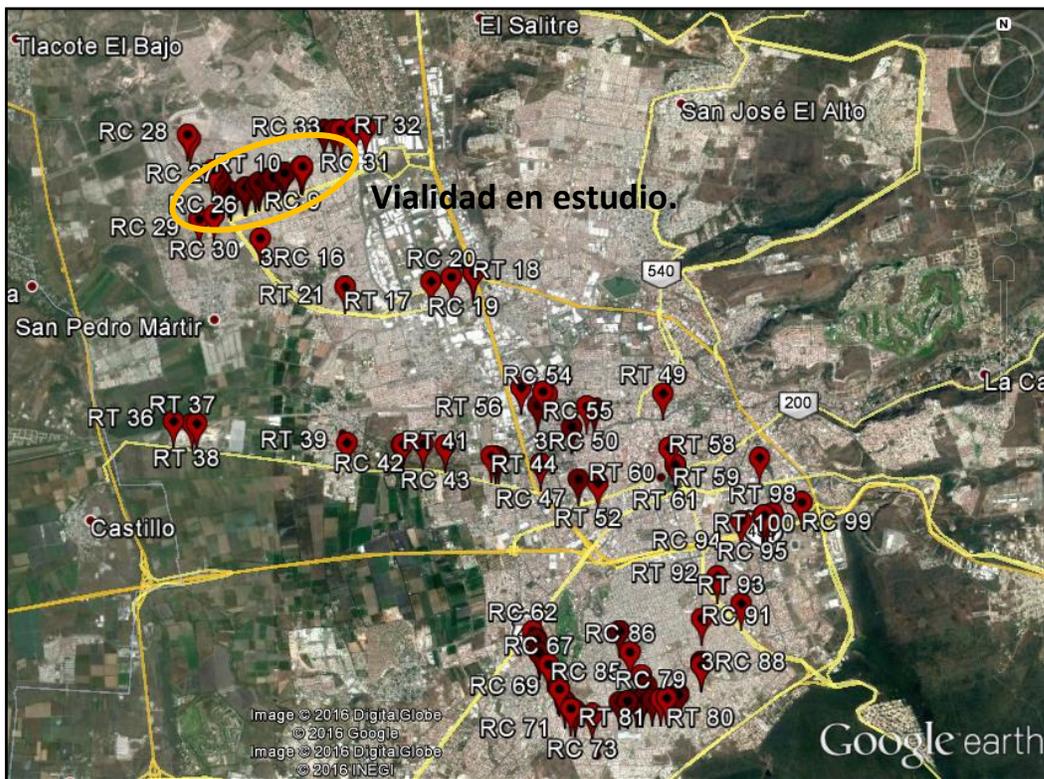


Figura 7 Localización de los 100 reductores de velocidad. RC: Reductores Circulares; RT: Reductores Trapezoidales

Por lo mencionado, se eligió la Av. De la Luz, vialidad que se localiza al norte de la ciudad de Querétaro, ésta avenida cuenta con las características mencionadas.



Figura 8 Ubicación de los reductores de velocidad sobre Av. De la Luz.

3.3 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA.

El tamaño de la muestra se basó en lo especificado en el Transportation Research Board (2000:870), en el cual nos indica que la velocidad de flujo libre (FFS) es la velocidad media del tráfico cuando los volúmenes de éste son suficientemente bajos o moderados, en la que los conductores no están influenciados por la presencia de otros vehículos, y cuando el control de tráfico de la intersección (es decir, la señal) no está presente o está a una distancia suficiente como para no tener ningún efecto en la elección de la velocidad del conductor, además señala que para determinar la FFS, se puede realizar en un segmento representativo en las horas con flujos bajos o moderados, midiendo velocidades de al menos 100 vehículos, tomados indistintamente en todos los carriles. A partir de lo expuesto, para nuestro estudio se tomó un mínimo de 100 vehículos para la muestra.

Este mínimo de muestra también es reafirmado por Abaza *et al.* (2012) indicando que 100 lecturas por ubicación para, antes de, y después de la joroba de

velocidad, fueron tomadas para su estudio, el cual tiene por objeto obtener un espaciamiento óptimo entre reductores de velocidad, en dicho estudio se obtuvo una regresión apropiada de alrededor de 69.3 % para velocidades de 85 percentil, así también añade que la toma de muestras se debe hacer solo cuando el tráfico esté en condiciones de flujo libre.

3.4 OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE CAMPO.

Para llevar a cabo la simulación de los reductores de velocidad en el programa AIMSUN, se necesita de diferentes parámetros para poder simular de la manera más real posible, para ello es necesario llevar a cabo la recabación de la información expuesta en los apartados 3.4 al 3.6.

3.4.1 OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIALIDAD.

La vialidad cuenta con tres carriles por sentido, cada carril tiene un ancho de tres metros, los cuerpos están divididos por un camellón central de aproximadamente 27 metros de ancho, la vialidad cuenta con 15 reductores, los cuales presentan diferentes dimensiones, y se encuentran localizados a diferentes separaciones entre ellos, tal y como se muestra en la Figura 9.



*Figura 9 Vista frontal de la vialidad en estudio.
Fuente: Google Earth, Av. de la Luz, Querétaro (6/2016).*

3.4.2 OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS REDUCTORES PRESENTES EN LA VIALIDAD EN ESTUDIO.

Para obtener las dimensiones de los reductores de velocidad se utilizó una cinta métrica de 50 metros de longitud, así como se llevó puesto el equipo de seguridad, (casco y chaleco), tal y como se muestra en las Figuras 10 y 11.



Figura 10 Obtención del largo del reductor de velocidad.



Figura 11 Obtención del alto del reductor de velocidad.

En la Tabla 7 se presentan las dimensiones obtenidas de los diferentes tipos de reductores de velocidad que se encuentran sobre av. de la luz.

Tabla 7 Dimensiones de los reductores de velocidad y espaciamento.

Número de reductor	Tipo de geometría	Altura (cm)	Ancho (m)	Espaciamento entre reductores de velocidad (m)
1	Circular	12	1	
2	Trapezoidal	16	6.3	33.8
3	Circular	10	1.25	182.1
4	Trapezoidal	16	6.2	76.0
5	Circular	10	1.2	178.7
6	Trapezoidal	16	6.2	109.8
7	Circular	12	1.1	186.8
8	Trapezoidal	14	8.7	380.2
9	Circular	15	1.6	
10	Trapezoidal	16	9.1	32.0
11	Circular	11	1.1	327.8
12	Trapezoidal	18	6.4	234.9
13	Circular	9	1.25	68.2
14	Trapezoidal	16	6	211.8
15	Trapezoidal	17	6.4	266.8

Sobre la vialidad en estudio se encuentran 15 reductores de velocidad de diferente geometría y con distintas dimensiones, tal y como se presenta en la Figura 12.

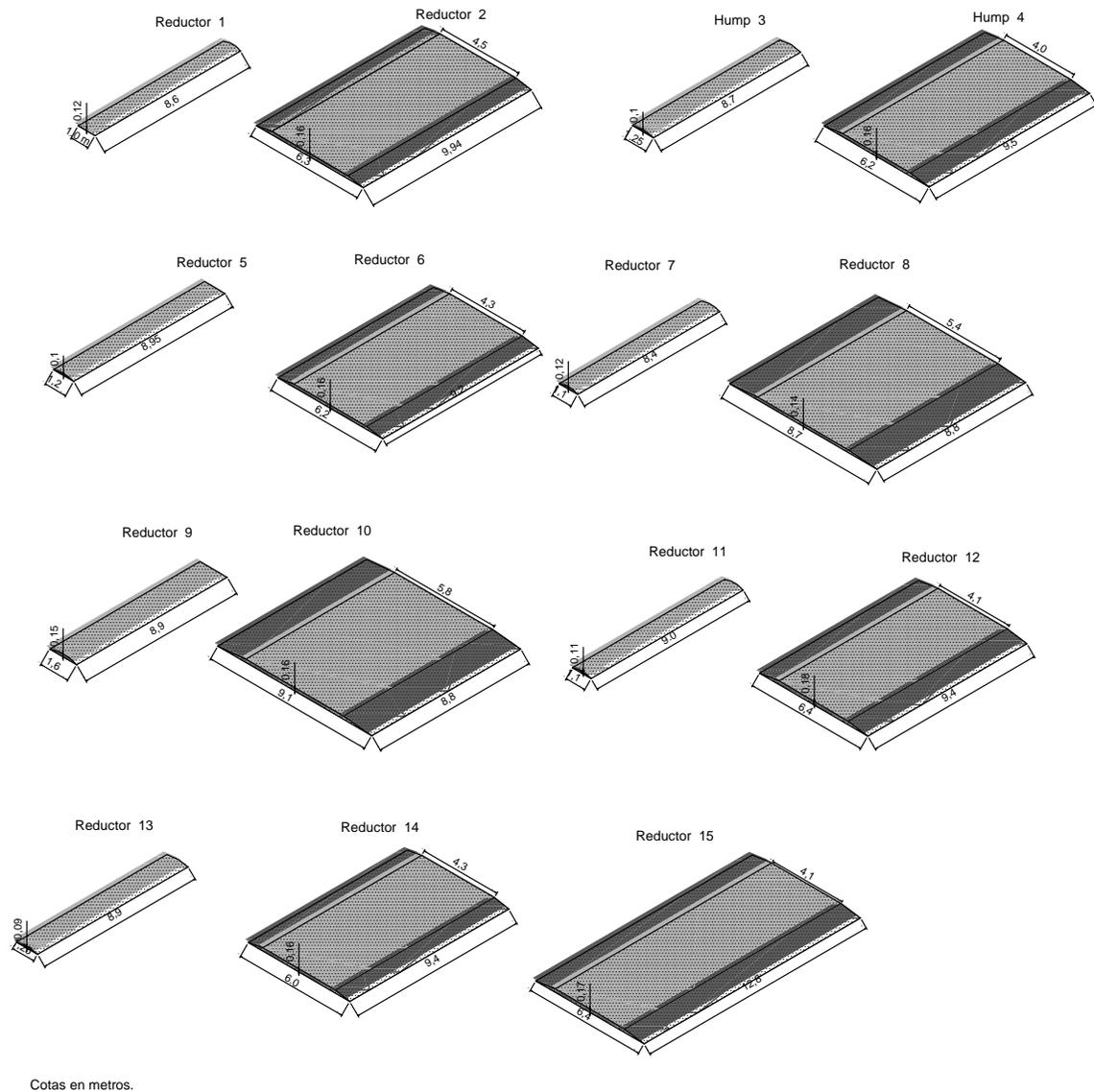


Figura 12. Representación de los 15 reductores de velocidad presentes sobre Av. de la Luz.

3.4.3 OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DE PUNTO DE VEHÍCULOS ANTES, SOBRE Y DESPUÉS DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD.

Para poder conocer la velocidad a la que transita un vehículo antes, sobre y después de pasar por un reductor de velocidad, obtendremos la velocidad de punto, la cuál de acuerdo al Transportation Research Board (2000:86), es la media

aritmética de las velocidades de los vehículos observados que pasan por un punto en una carretera, las velocidades individuales de los vehículos que pasan por un punto se registran y se promedian aritméticamente.

Abaza *et al.* (2012) recomiendan que las mediciones de velocidad de punto sean tomadas cuando los neumáticos delanteros de un vehículo pasen sobre el punto medio de la joroba (V2), ya que se espera que sea la ubicación más crítica, así también recomienda tomar mediciones de la velocidad a 100 ft. (30 m) antes y después de las jorobas (V1 y V3, respectivamente), añada también que, en la selección de los reductores de velocidad muestreados, hay que buscar la uniformidad en la geometría y características con el fin de minimizar el efecto en las mediciones de velocidad.

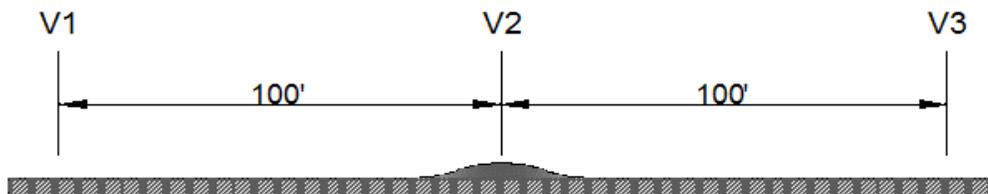


Figura 13 Localización de la velocidad de punto sobre un reductor de velocidad (hump) (100 ft=30 metros)

Para obtener una estimación imparcial y precisa de las velocidades de punto en un lugar específico, deben observarse los aspectos siguientes:

- El equipo debe estar oculto a los conductores que se acercan.
- El investigador que tuviera necesidad de observar los vehículos que se aproximan, deben ser lo menos llamativo que sea posible.
- Deben evitarse los curiosos.

Considerando las recomendaciones de Abaza *et al.* (2012), y con la finalidad de conocer mucho mejor el comportamiento de los vehículos que transitan en vialidades con presencia de reductores de velocidad y así poder simular los más apegado a la realidad en el programa AIMSUN los efectos de los reductores de

velocidad, se utilizará en este estudio el método del vehículo flotante en el cual el vehículo de prueba está instrumentado con un sistema de posicionamiento global (GPS), con el que se registraran las velocidades a cada segundo, obteniendo la medición de las velocidades sobre los reductores, y las velocidades antes y después de dichos dispositivos, este método de prueba es muy utilizado para la obtención de tiempo de recorrido, velocidad a lo largo de una ruta, congestionamiento de una ruta o datos sobre velocidades y retardos, el cuál es considerado uno de los métodos más flexibles o adaptable y de los más usados ampliamente. El estudio es realizado por dos personas, un anotador y el conductor del vehículo. El procedimiento requiere que el conductor controle la velocidad del vehículo, sea que este se mantenga “flotando” en el tránsito (en este caso el rebasa tantos vehículos como vehículos rebasen al vehículo de prueba), o que conduzca el vehículo a lo largo de la ruta, conservando la velocidad promedio del resto de los vehículos.



Figura 14 Vehículo.

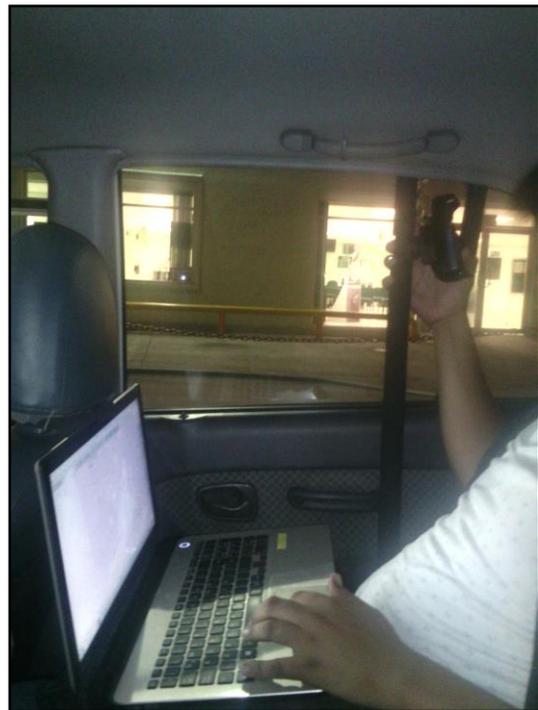


Figura 15 Equipo GPS para la obtención de las velocidades en la ruta.

Las horas para hacer un estudio de velocidad de punto, dependerá del objetivo del mismo. Un estudio general para establecer límites de velocidad, para obtener datos básicos o revisar tendencias, deberá llevarse a cabo durante uno de los tres períodos siguientes fuera de las horas de máxima demanda:

- (10:00 a 12:00 hrs.)
- (15:30 a 17:30 hrs.)
- (20:00 a 22:00 hrs.)

Los recorridos con el vehículo instrumentado para este estudio, fueron hechos en los tres periodos antes mencionados. Cabe mencionar que también se obtuvo el flujo vehicular (q) de la vialidad en estudio.

3.5 OBTENCIÓN DE LAS SECCIONES DE ACELERACIÓN Y DESACELERACIÓN EN LOS DIFERENTES ESPACIAMIENTOS ENTRE REDUCTORES.

De los 100 recorridos realizados sobre Av. de la Luz con el vehículo instrumentado, se obtuvieron 100 mapas en el programa TransCAD (ver Figura 16), en el cual se extrajeron las secciones de aceleración y desaceleración en los espaciamientos entre reductores, dicha información obtenida fue promediada para obtener las secciones con las que se simuló en el programa AIMSUN.

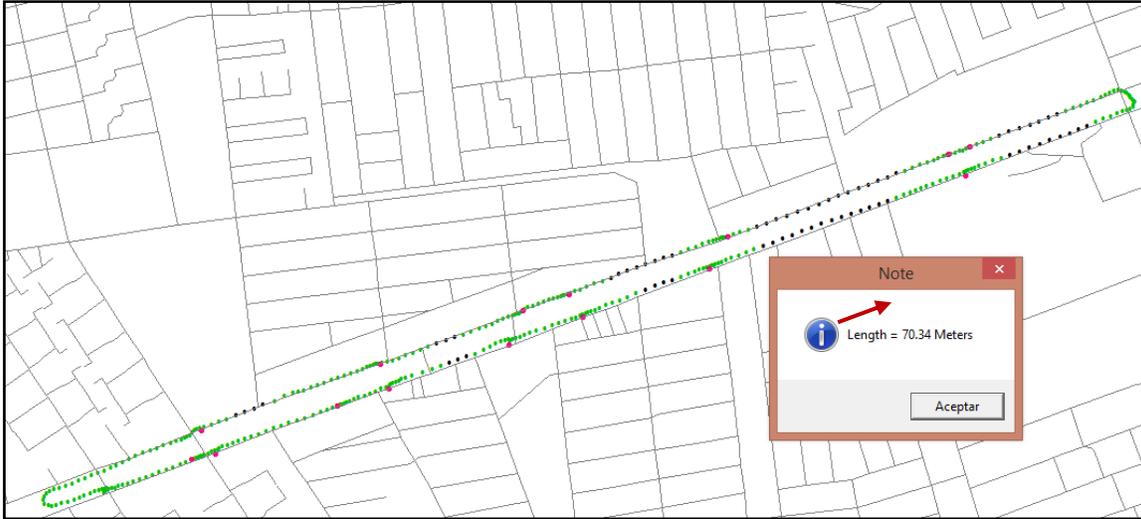


Figura 16 Obtención de las distancias de aceleración y desaceleración en TransCAD.

3.6 ANÁLISIS DE DATOS, ELABORACIÓN DE CARTAS DE CONTROL, Y OBTENCIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.

En el proceso de la información de las velocidades de punto obtenidas a cada segundo en los recorridos con el vehículo instrumentado, se obtuvieron las velocidades máximas, velocidades media espacial promedio en los espaciamentos, y velocidades sobre los reductores, apoyándonos con el programa TransCAD (ver Figura 16) en los que se superpusieron las velocidades de punto de los recorridos con los puntos de localización de los reductores de velocidad, sobre un mapa en formato .shp obtenido del INEGI.

La elaboración de las cartas de control fue para descartar aquellas secciones en los recorridos que presentaran anomalías en los datos recabados y la obtención de los modelos de regresión lineal múltiple serán un apoyo en la comprensión de los efectos que tienen los reductores de velocidad de acuerdo a sus dimensiones y tipo en la velocidad que los vehículos tendrán al cruzar por dichos dispositivos.

3.7 SIMULACIÓN DEL TRÁFICO EN EL PROGRAMA AIMSUN.

Se realizó la simulación de tres escenarios en el programa AIMSUN, el escenario 1 esta simulado con la información recabada en campo de la Avenida de la Luz, que es la simulación apegada a la realidad, el escenario 2 está basado en simular las velocidades sobre los reductores de velocidad obtenidas mediante los modelos de regresión lineal múltiple mencionados anteriormente y por último el escenario 3 en el que se propuso un espaciamiento y tipo de reductor que minimice las emisiones contaminantes y el gasto de combustible, dicha propuesta está basada en los resultados obtenidos de la simulación del escenario 1.

Para las simulaciones se tomó en cuenta las velocidades máximas entre reductores, las velocidades sobre los reductores, las dimensiones de los dispositivos en estudio, así como también las distancias de aceleración y desaceleración obtenidas en campo.

Para los tres escenarios obtuvimos los datos de salida de los dos modelos de medio ambiente; consumo de combustible y emisiones contaminantes.

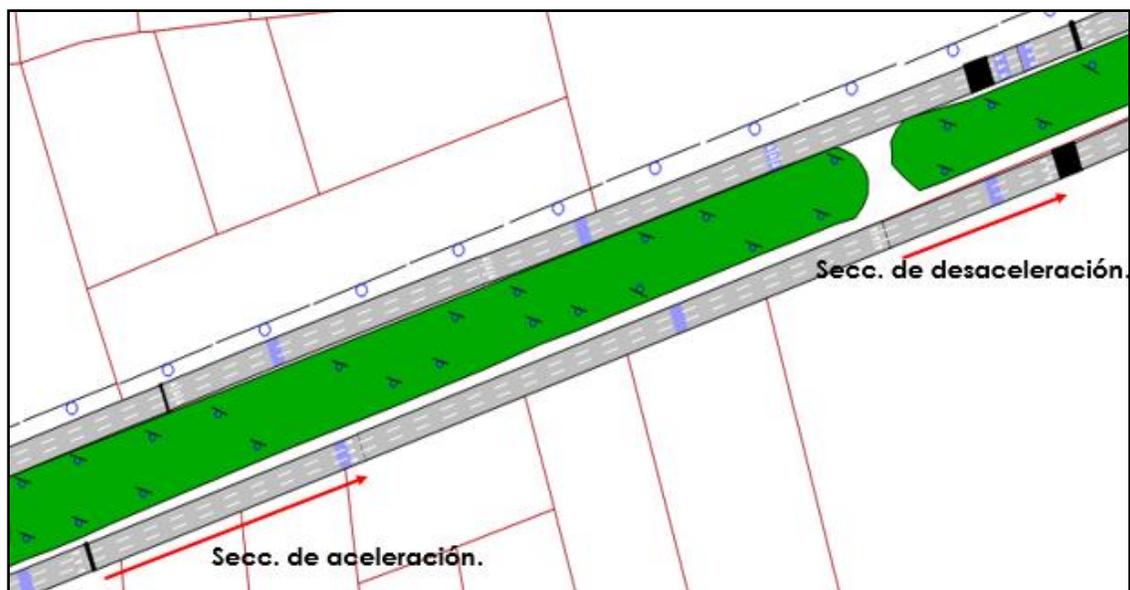


Figura 17 Uso de secciones de aceleración y desaceleración para la simulación.

3.8 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS SIMULADOS EN AIMSUN.

Se compararon los resultados obtenidos de los modelos de medio ambiente del programa AIMSUN de los tres escenarios simulados, esto con el fin de obtener el porcentaje de disminución de emisiones contaminantes del escenario 3 (propuesta de separación entre reductores de velocidad) con respecto a la simulación del escenario 1 (Simulación apegada a la condición real de la corriente vehicular).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentará la calibración tanto del flujo vehicular como de las velocidades antes, sobre y después, de los reductores de velocidad simulados en AIMSUN, así mismo se describe la validación de las emisiones contaminantes cuantificadas por el programa antes mencionado. Por otro lado, se mostrarán los análisis realizados a las velocidades obtenidas por el vehículo instrumentado con GPS, y se darán a conocer los modelos de regresión múltiple logrados en nuestra investigación, y por último se proporcionarán los espaciamientos propuestos entre reductores de velocidad que nos disminuyeron las emisiones contaminantes y gasto de combustible.

4.1 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

4.1.1 VALIDACIÓN DEL FLUJO VEHICULAR (q) SIMULADO EN AIMSUN

La tasa de flujo (q) que se obtuvo en campo y los vehículos simulados en AIMSUN se presentan en la Tabla 9.

Tabla 8 Tasa de flujo vs vehículos simulados en AIMSUN.

Tasa de flujo (q), vehículos/hora		Vehículos simulados en AIMSUN, vehículos/hora	
Automóviles	Autobuses	Automóviles	Autobuses
Sentido: De Oeste a Este			
660	56	635	51
Sentido: De Este hacia Oeste			
796	60	812	58

A partir de los datos obtenidos en campo, con los resultados de la simulación del Escenario 1 (simulación real) en AIMSUN se prosiguió a realizar la prueba T de dos muestras para demostrar que las muestras son iguales, dicha prueba fue realizada en el programa Minitab el cuál arrojó los siguientes resultados (ver Tabla 9):

Tabla 9 T de dos muestras para Flujo Real vs. Simulado

	N	Media	Desv. Estándar	Media del error estándar
FLUJO REAL	4	393	391	195
SIMULADO	4	389	393	196
IC DE 95% PARA LA DIFERENCIA: (-708, 716)			Prueba T de diferencia = 0	
VALOR T = 0.01		Valor p = 0.989		GL = 5

La prueba T de dos muestras indica que si el valor de P es mayor a 0.05 para un índice de confianza del 95% las muestras son iguales, de lo contrario indicaría que las muestras tienen una diferencia significativa, por lo anterior damos por hecho que las dos muestras son iguales y por lo tanto la simulación del Escenario 1 queda bien calibrada respecto al flujo (q) obtenido en Av. de la Luz.

4.1.2 VALIDACIÓN DE LAS VELOCIDADES SIMULADAS VS LAS VELOCIDADES OBTENIDAS CON EL VEHÍCULO INSTRUMENTADO Y LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.

Para verificar que los vehículos simulados en AIMSUN están cruzando sobre los reductores a las velocidades que se obtuvo en campo, así como alcanzando las velocidades máximas entre reductores, se realizó la prueba T para dos muestras, los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10 T de dos muestras para Vel. Reales vs. Simulado

	N	Media	Desv. Estándar	Media del error estándar
VEL. REALES	29	25.6	13.0	2.4
SIMULADO	29	24.4	12.4	2.3
IC DE 95% PARA LA DIFERENCIA: (-5.43, 7.94)			Prueba T de diferencia = 0	
VALOR T = 0.38		Valor p = 0.708		GL = 55

De acuerdo al valor P obtenido de la prueba T de dos muestras, ya que el valor es mayor a 0.05 para un índice de confianza del 95% se da por entendido que las dos muestras son iguales y con ello validamos la simulación en AIMSUN.

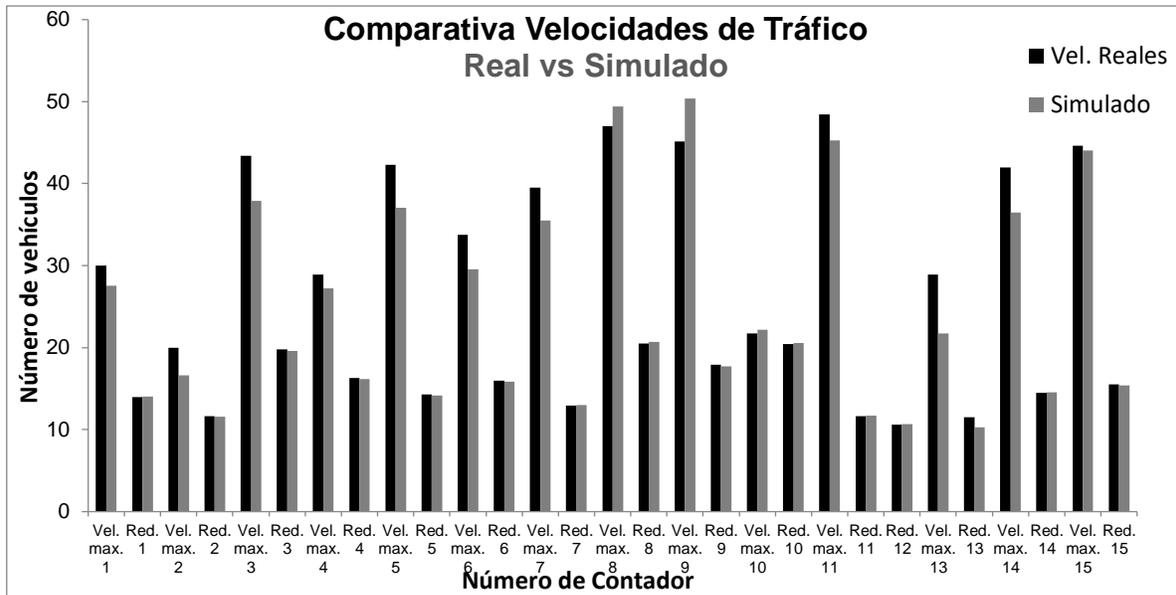


Figura 18 Gráfica comparativa de las velocidades obtenidas en campo vs las velocidades simuladas en AIMSUN.

Para verificar que los vehículos simulados en AIMSUN para el Escenario 2, están cruzando sobre los reductores a la velocidad obtenida con los modelos de regresión lineal múltiple se validaron los resultados con la prueba T de dos muestras obteniendo los siguientes resultados como se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11 T de dos muestras para Vel. Regresión vs. Simulado

	N	Media	Desv. Estándar	Media del error estándar
VEL. REGRESIÓN	29	25.2	14.0	2.6
SIMULADA	29	23.9	13.2	2.4
IC DE 95% PARA LA DIFERENCIA: (-5.87, 8.43)			Prueba T de diferencia = 0	
VALOR T = 0.36		Valor p = 0.722		GL = 55

Al tener un valor de P igual a 0.722, en la prueba T de dos muestras nos indica que las muestras son iguales, lo que nos valida la calibración de las velocidades en AIMSUN basadas en los modelos de regresión lineal múltiple para nuestro Escenario 2.

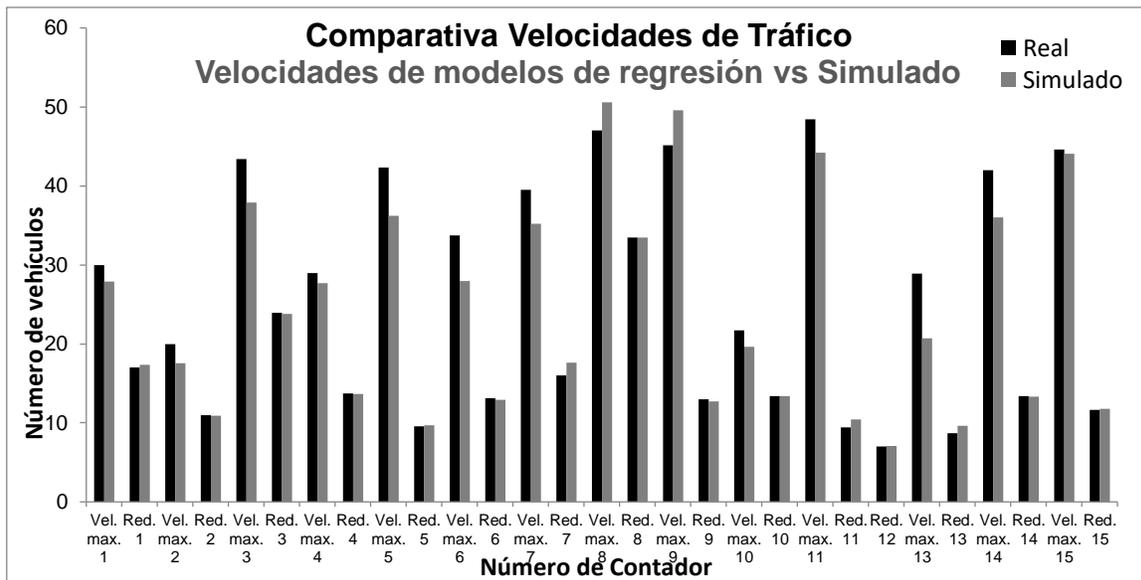


Figura 19 Gráfica comparativa de las velocidades obtenidas con los modelos de regresión lineal y las velocidades simuladas.

4.1.3 VALIDACIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES

De acuerdo a Piña (2013) los resultados de las emisiones promedio de monóxido de carbono obtenidas de la simulación en el programa AIMSUN y las medidas reales de las calles Hidalgo y Tecnológico son las que se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12 Emisiones promedio de monóxido de carbono medidas y las obtenidas con AIMSUN.

Hora	Mg/ m3 simulado en AIMSUN, emisiones promedio de monóxido de carbono.	Mg/ m3 medición real.
7:15-7:30	2.46406053	2.07286551
7:30-7:45	2.764186633	2.67654489
7:45-8:00	3.016393443	1.87202752
8:00-8:15	3.755359395	3.88464164

Para observar la relación de los datos antes mencionados Piña (2013) utilizó el *software* de estadística Minitab, para realizar la prueba de t-pareada y comprobar las hipótesis siguientes:

Hipótesis nula H0 = las muestras son iguales

Hipótesis alternativa H1= las muestras son diferentes

Prueba T e IC de dos muestras: Medido, Simulado

T de dos muestras para Medido vs. Simulado

Calle Hidalgo con Av. Tecnológico

Tabla 13 T de dos muestras para Medido vs. Simulado

	N	MEDIA	DESV. ESTÁNDAR	MEDIA DEL ERROR ESTÁNDAR
MEDIDO	4	2.627	0.906	0.45
SIMULADO	4	3.0	0.552	0.28
IC DE 95% PARA LA DIFERENCIA: (-1.846, 1.099)			Prueba T de diferencia = 0	
VALOR T = -0.70		Valor P = 0.520		GL =4

De acuerdo a lo que arroja la prueba T, de dos muestras presentada en la Tabla 13, estimada en Minitab, el valor P de la prueba = 0.520 es mayor que $\alpha = 0.05$ por lo tanto no hay evidencia suficiente para rechazar H0.

Esto significa que no se rechaza (por definición nunca se acepta una hipótesis, simplemente “no se rechaza”) que las dos muestras “simulado” y “medido” son iguales dentro del intervalo de confianza del 95%

Por lo tanto, el dispositivo construido por Piña (2013) queda validado para las emisiones de monóxido de carbono de acuerdo con la simulación de referencia realizada en AIMSUN.

4.2 ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES DE PUNTO OBTENIDAS CON EL VEHÍCULO INSTRUMENTADO

A continuación, se presentan las cartas de medias y desviación estándar obtenidas a partir de las velocidades obtenidas sobre los quince reductores analizados.

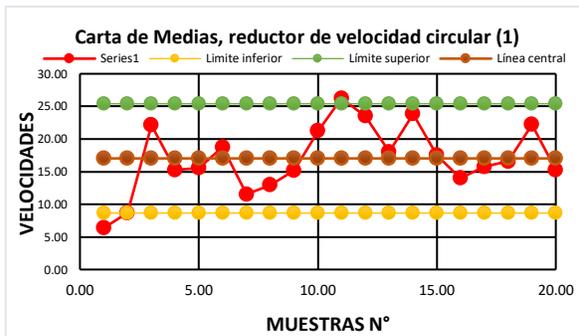


Figura 20 Carta de medias del reductor 1.

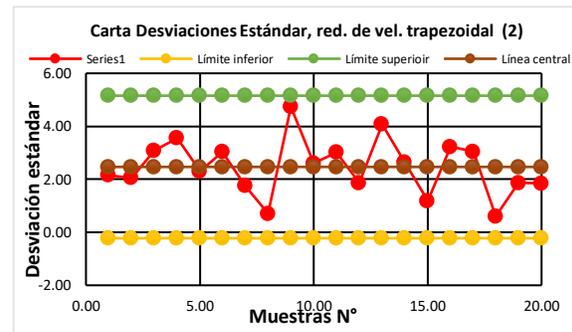


Figura 21 Carta de Desv. Est. del reductor 1.

Las cartas de control fueron realizadas para los quince reductores de velocidad para facilitar la visualización de anomalías en los datos que fueron confirmados con lo visto en campo, ya que durante los recorridos realizados se presentaron algunas paradas o disminuciones de la velocidad del vehículo instrumentado por factores ajenos a los reductores de velocidad, como fueron el paso de peatones y tiempos de semáforo.

De lo mencionado podemos notar que el reductor 1 presentado en la Figura 20, de la carta de medias se nota que dos puntos se salen de los límites de aceptación, cabe mencionar que las cartas tienen un nivel de confianza del 99.7%, por lo anterior se tomó la decisión de eliminar los datos obtenidos con el reductor 1 en la elaboración de los modelos de regresión lineal múltiple para los reductores de velocidad circulares, puesto que al comparar los datos con lo observado en campo se verificó que en ese reductor se presentaron varias paradas debidas a pasos

peatonales y vehículos que cruzaban puesto el reductor está colocado antes de una intersección.

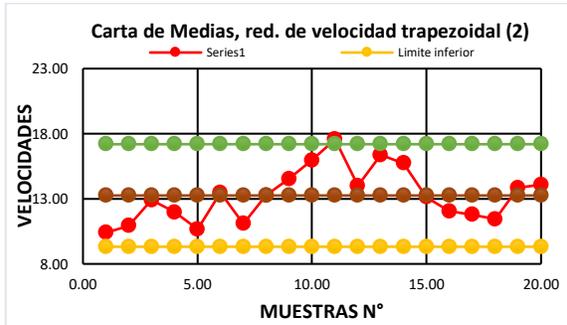


Figura 22 Carta de medias del reductor 2.

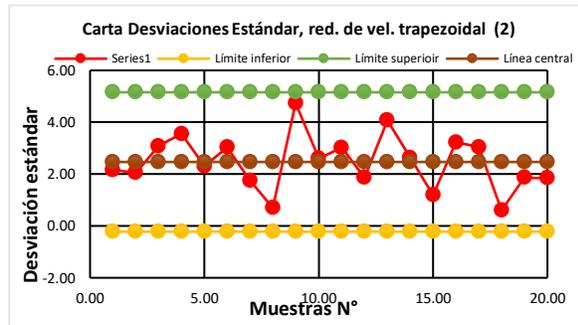


Figura 23 Carta de Desv. Est. del reductor 2.

En la Figura 22 observamos que también hay un punto que se sale del límite superior de aceptación de la carta de medias, y al compararlo con lo observado en campo se debió a que hay una parada de autobuses sobre el reductor 2 que es de tipo trapezoidal, lo que generó que los vehículos se detuvieran y por consiguiente nuestro vehículo instrumentado igual, ocasionando paradas ajenas al reductor de velocidad, por ello se eliminó este reductor de velocidad para el modelo de regresión lineal múltiple de los reductores trapezoidales.

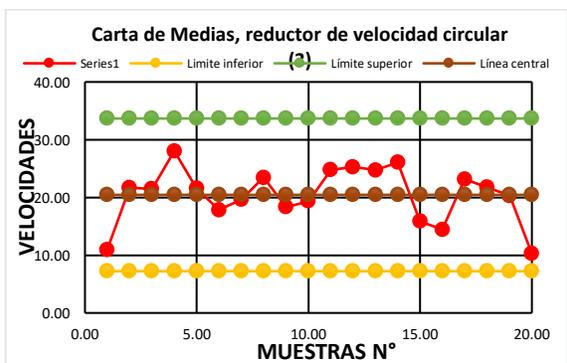


Figura 24 Carta de medias del reductor 3.

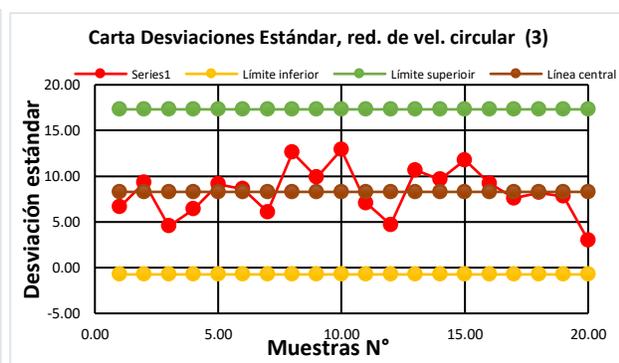


Figura 25 Carta de Desv. Estándar del reductor 3.

En las Figuras 24 y 25 se puede apreciar que los puntos de las cartas de control de medias y desviación estándar para el reductor 3 de tipo circular, están todos dentro de los límites de aceptación tanto inferior como superior, además se comparó con lo observado en campo notando que no se presentaron paradas ni disminuciones de velocidad ajenas a los reductores de velocidad, por ello, estos datos fueron utilizados en la elaboración del modelo de regresión lineal múltiple para reductores circulares.

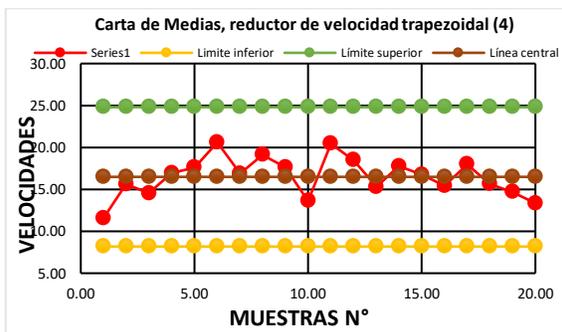


Figura 26 Carta de medias del reductor 4.

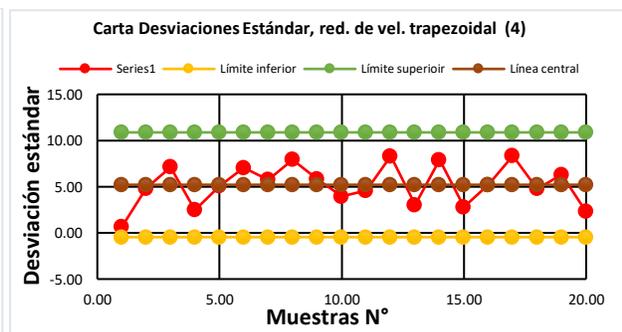


Figura 27 Carta de Desv. Est. del reductor 4.

Tal como se analizaron los resultados de los reductores 1, 2, y 3, se estudiaron los reductores 4-15, encontrando que los reductores 1,2,7,8,12 y 14 presentaron puntos fuera de los límites de aceptación en las cartas de control, por lo que los datos de velocidades registradas en estos reductores por el GPS del vehículo instrumentado, no fueron utilizados en la realización de los modelos de regresión lineal múltiple ya sea del tipo circular o trapezoidal, con el fin de tener una mejor precisión en la variable dependiente de los modelos, que es la velocidad sobre el reductor.

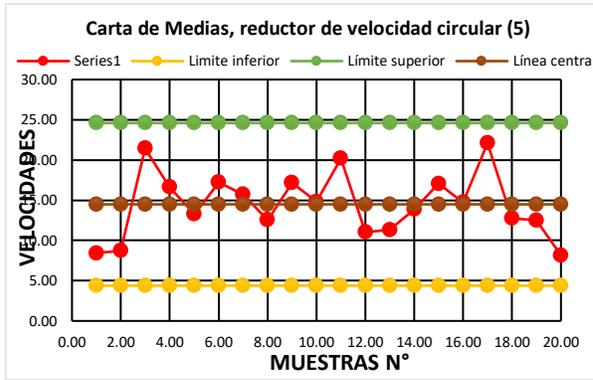


Figura 28 Carta de medias del reductor 5.

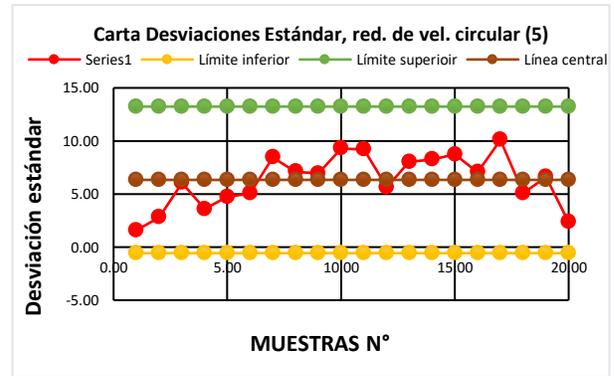


Figura 29 Carta de Desv. Est. del reductor 5.

Los datos del Reductor de velocidad número 5, se encuentran dentro de los límites de aceptación, como se muestra en la Figura 28 y 29.

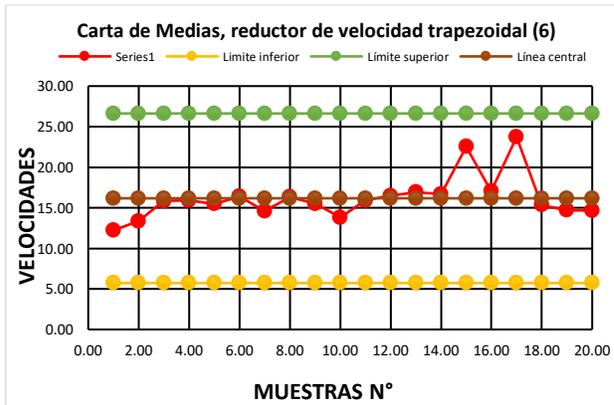


Figura 30 Carta de medias del reductor 6.

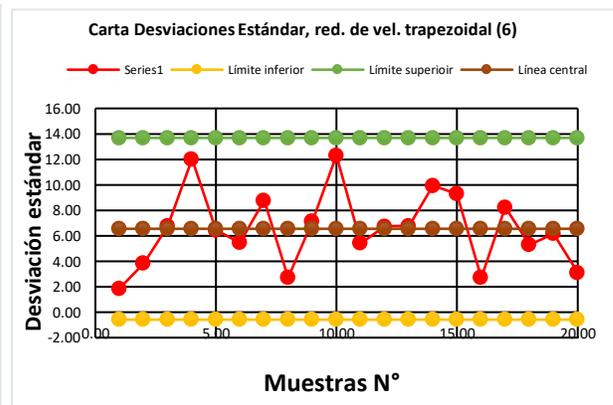


Figura 31 Carta de Desv. Est. del reductor 6.

Los datos del Reductor de velocidad número 6, se encuentra dentro de los límites de aceptación (ver Figura 30 y 31).

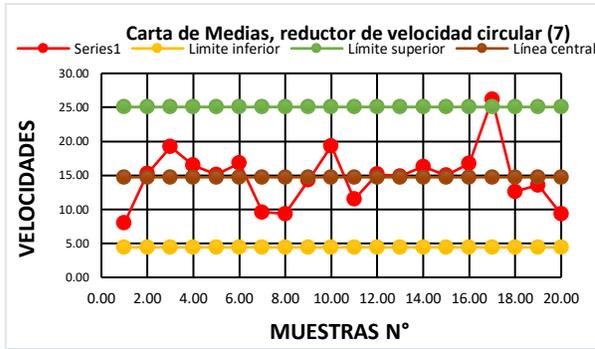


Figura 32 Carta de medias del reductor 7.

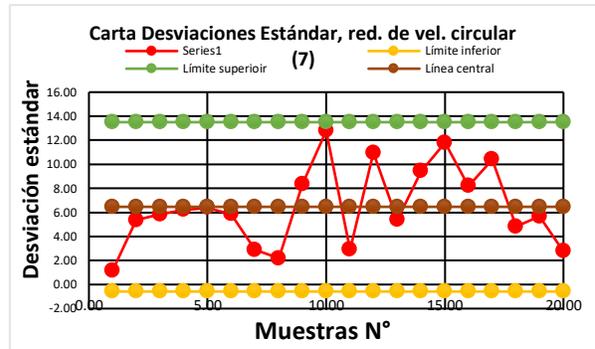


Figura 33 Carta de Desv. Est. del reductor 7

Los datos del Reductor de velocidad número 7, se encuentra fuera de los límites de aceptación (ver Figura 32).

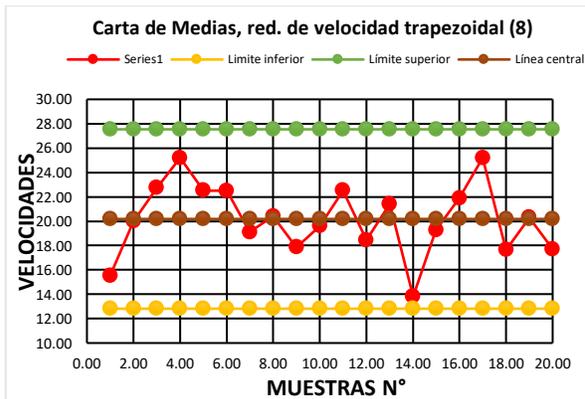


Figura 34 Carta de medias del reductor 8.

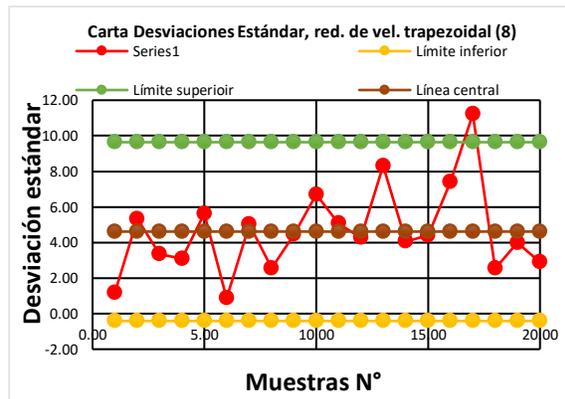


Figura 35 Carta de Desv. Est. del reductor 8.

Los datos del Reductor de velocidad número 8, se encuentra fuera de los límites de aceptación (ver Figura 35).

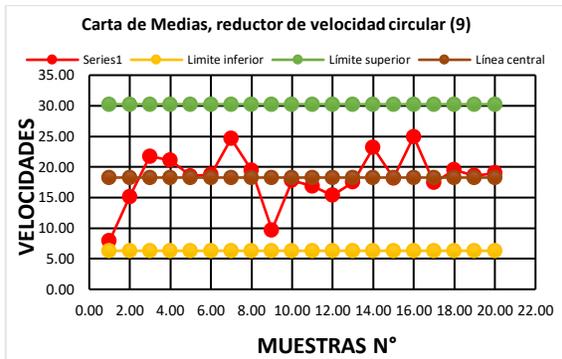


Figura 36 Carta de medias del reductor 9.

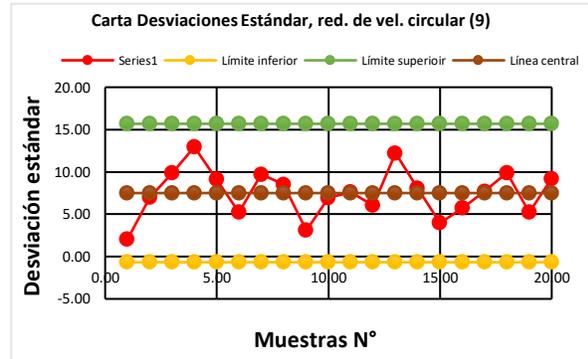


Figura 37 Carta de Desv. Est. del reductor 9.

Los datos del Reductor de velocidad número 9, se encuentra dentro de los límites de aceptación (ver Figura 36 y 37).

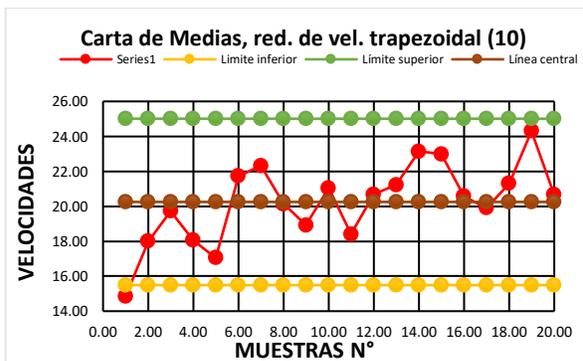


Figura 38 Carta de medias del reductor 10.

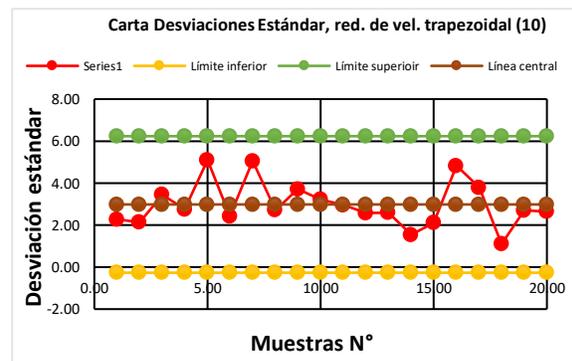


Figura 39 Carta de Desv. Est. del reductor 10.

Los datos del Reductor de velocidad número 10, se encuentra dentro de los límites de aceptación (ver Figura 38 y 39).

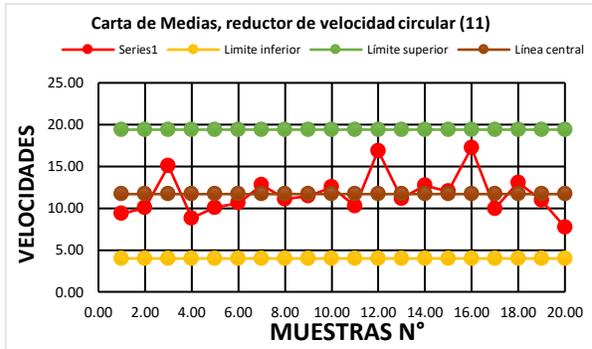


Figura 40 Carta de medias del reductor 11.

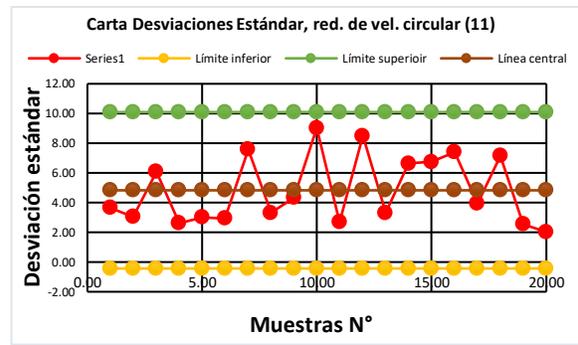


Figura 41 Carta de Desv. Est. del reductor 11.

Los datos del Reductor de velocidad número 11, se encuentra dentro de los límites de aceptación (ver Figura 40 y 41).

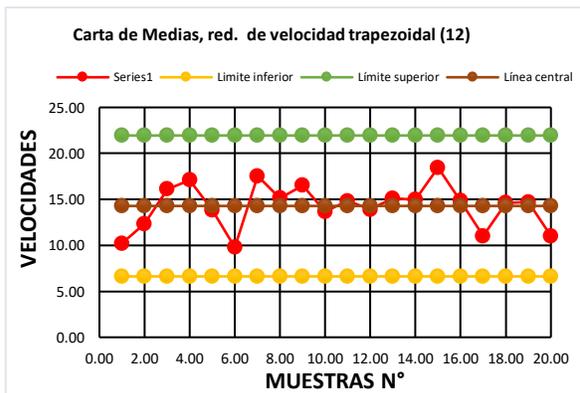


Figura 42 Carta de medias del reductor 12.

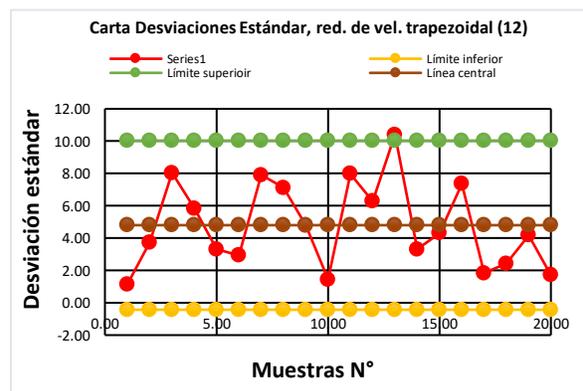


Figura 43 Carta de Desv. Est. del reductor 12.

Los datos del Reductor de velocidad número 12, se encuentra fuera de los límites de aceptación (ver Figura 43).

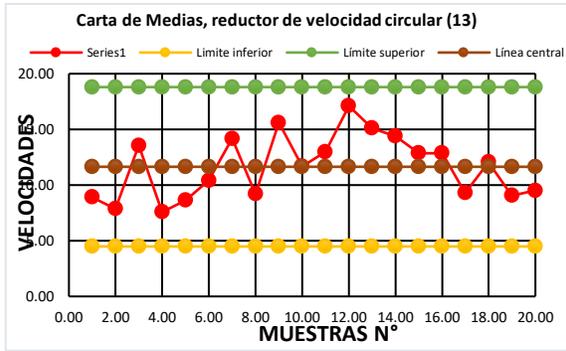


Figura 44 Carta de medias del reductor 13.

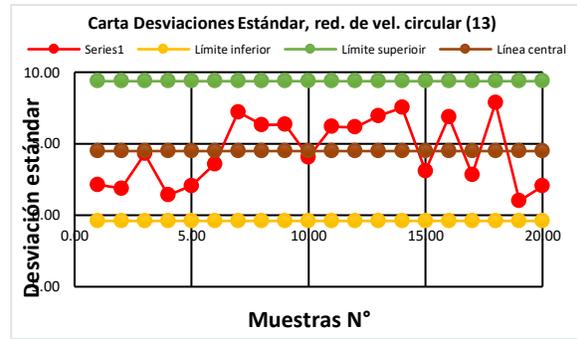


Figura 45 Carta de Desv. Est. del reductor 13.

Los datos del Reductor de velocidad número 13, se encuentra dentro de los límites de aceptación (ver Figura 44 y 45).

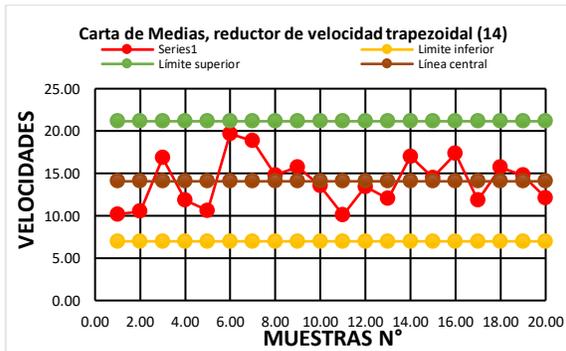


Figura 46 Carta de medias del reductor 14.

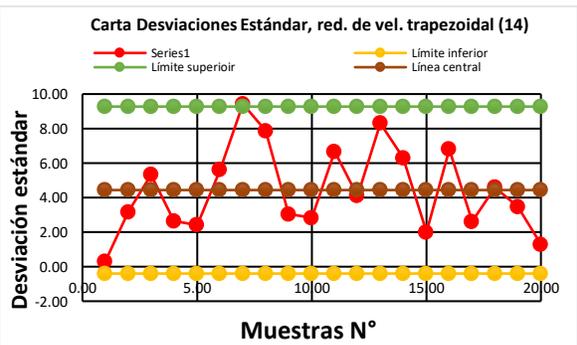


Figura 47 Carta de Desv. Est. del reductor 14.

Los datos del Reductor de velocidad número 14, se encuentra fuera de los límites de aceptación (ver Figura 47).

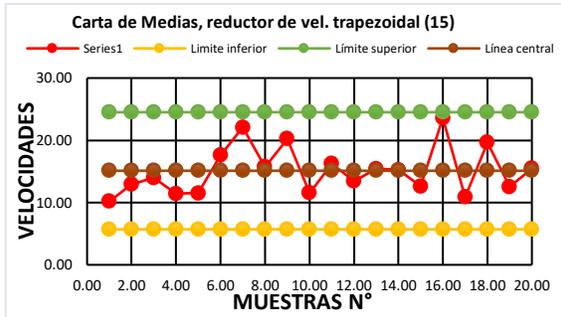


Figura 48 Carta de medias del reductor 15.

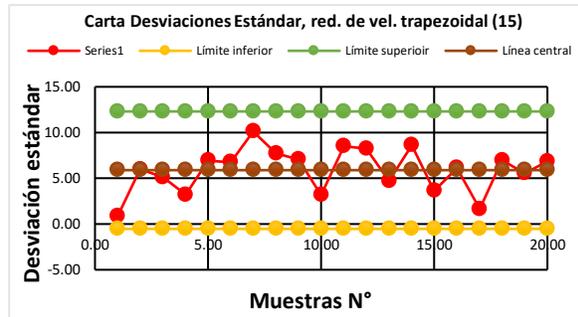


Figura 49 Carta de Desv. Est. reductor 15

Los datos del Reductor de velocidad número 15, se encuentra dentro de los límites de aceptación (ver Figura 48 y 49).

A continuación se presenta en las figuras 50 a 53 la visualización de todas las cartas de control por tipo de reductor y carta de control.

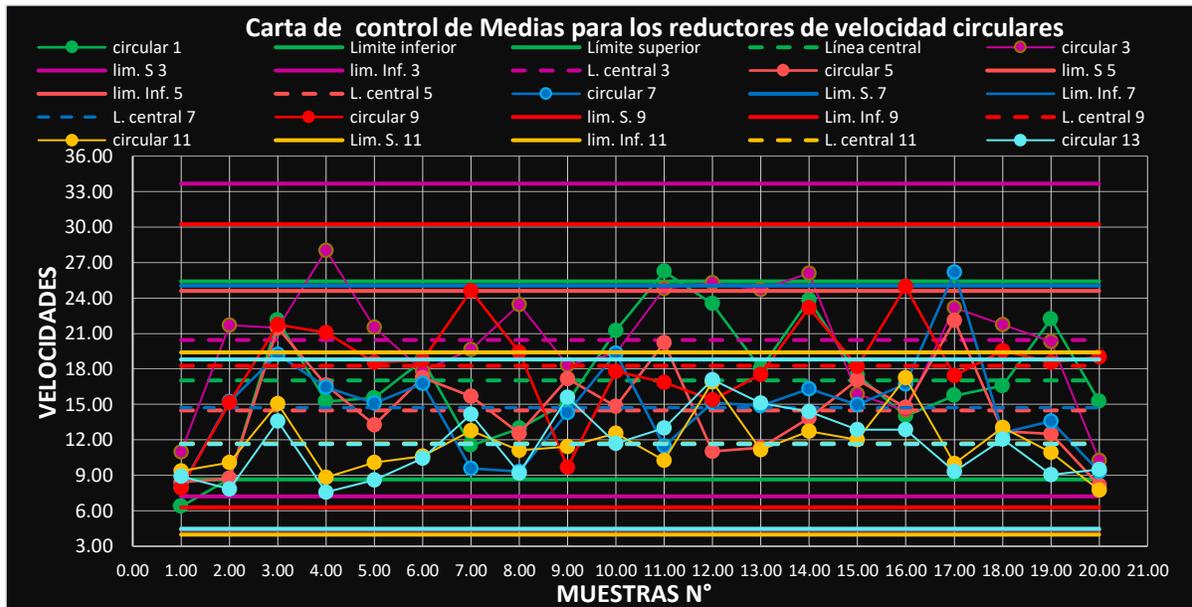


Figura 50 Gráfica de control de las medias para los reductores de velocidad circulares.

En la Figura 50 se presenta las cartas de control de medias de todos los reductores de velocidad circulares, con el fin de observar el comportamiento de este tipo de dispositivos y visualizar las velocidades mínimas y máximas encontradas al cruzar por dichos dispositivos.

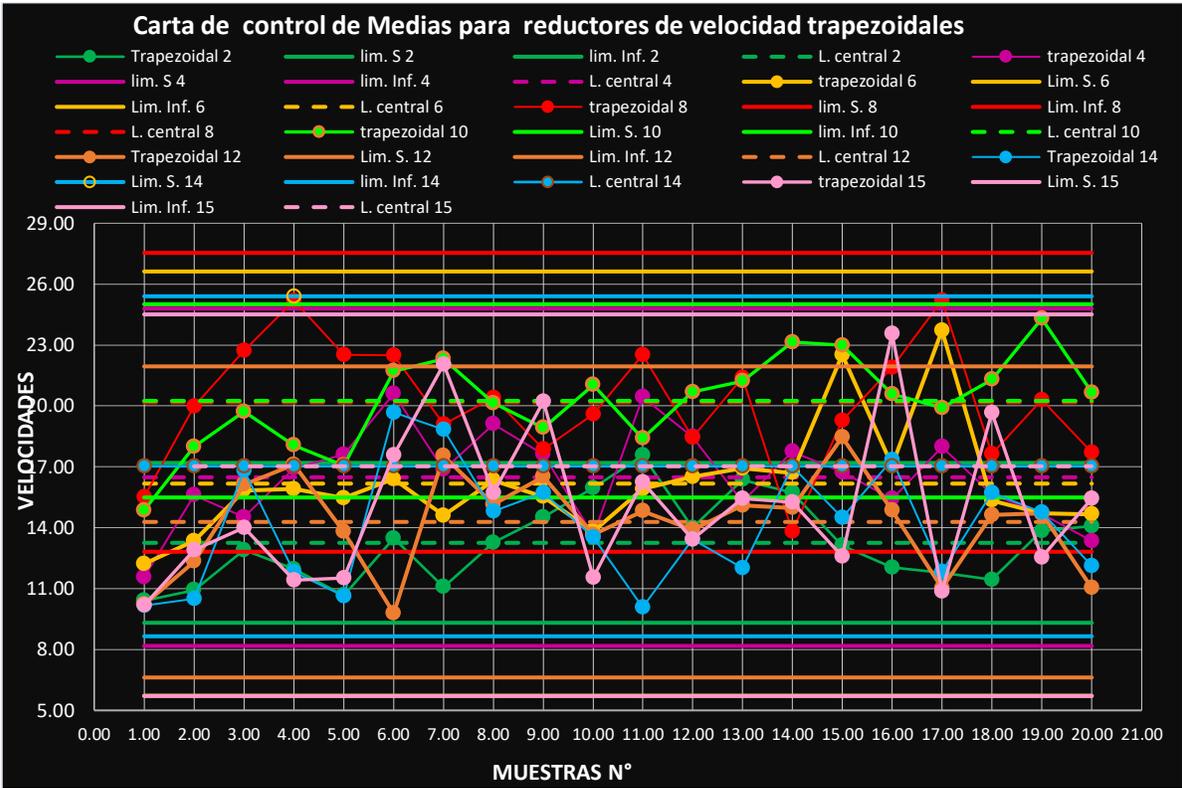


Figura 51 Gráfica de control de las medias para los reductores de velocidad trapezoidales.

De la Figura 51, podemos observar que las velocidades mínimas y máximas presentes en los reductores de velocidad trapezoidales presentan un rango menor en comparación con los reductores de velocidad circulares, llegando a concluir que el efecto de los reductores trapezoidales sobre la velocidad es menos variable en comparación con los reductores circulares.

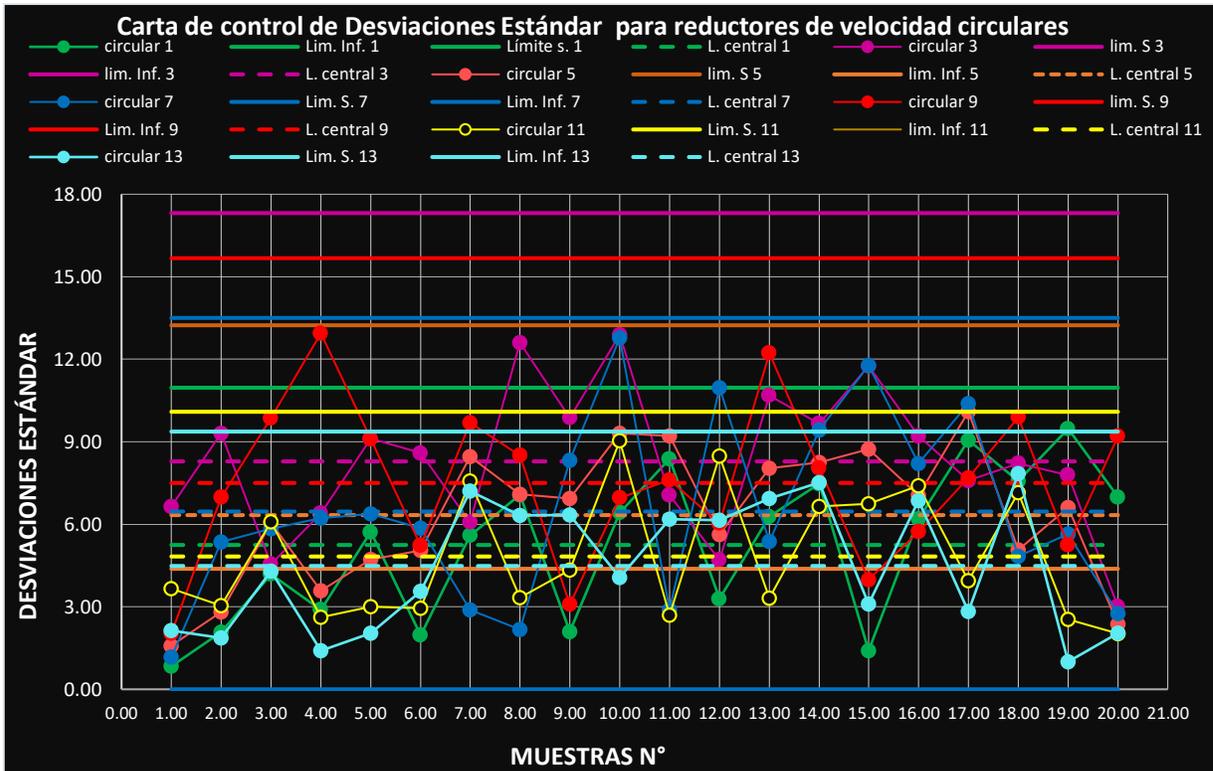


Figura 52 Gráfica de control de las desviaciones estándar de los reductores de velocidad circulares.

En la Figura 52 se muestran las cartas de control de desviación estándar de todos los reductores de velocidad circulares, ésta representación se hizo para visualizar fácilmente el comportamiento y la variabilidad de las velocidades encontradas al cruzar por dichos dispositivos, de la cuál podemos destacar que este tipo de dispositivos presenta mayor variabilidad con respecto a los reductores de velocidad trapezoidales (ver Figura 53).

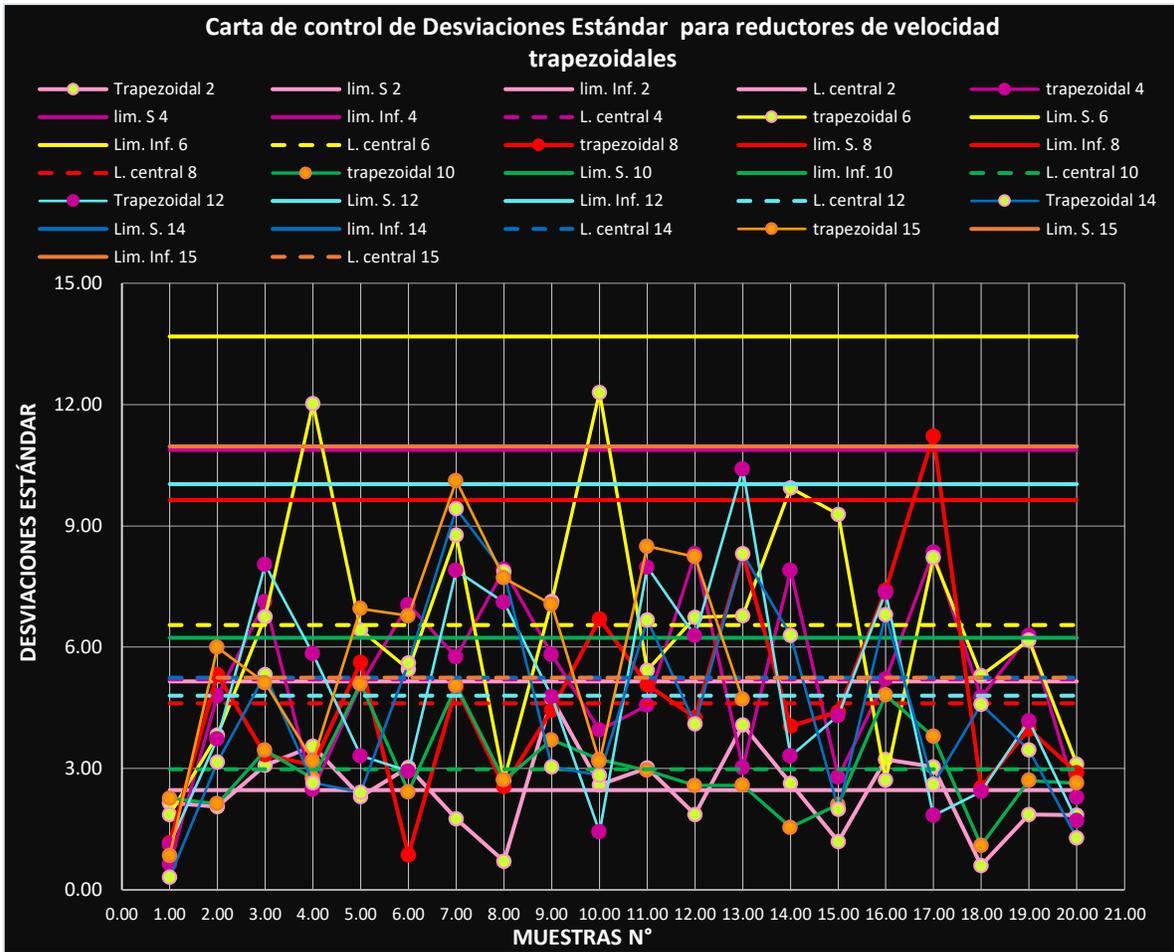


Figura 53 Gráfica de control de las desviaciones estándar de los reductores de velocidad trapezoidales.

A partir de los cien recorridos en el vehículo instrumentado (ida y vuelta) sobre la avenida de estudio, se obtuvo la velocidad media temporal, la velocidad máxima y la velocidad a la cual los vehículos atraviesan por los reductores de velocidad a diferentes espaciamientos, tal como se muestra en las Tablas 14 Y 15.

Tabla 14 Media de velocidades máximas y media espacial entre los espaciamientos de los reductores de velocidad.

Número de reductor	Espaciamiento (m)	Velocidad máxima promedio (km/h)	Velocidad media espacial promedio (km/h)
	X_1	Y_1	Y_2
3	182.1	43.39	30.76
4	76.0	28.94	17.72
5	178.7	42.30	29.09
6	109.8	33.76	20.25
9	221.0	45.17	34.24
10	32.0	21.72	16.87
11	327.8	48.42	34.51
13	68.2	28.90	19.46
15	266.8	44.60	32.57

Fuente: Elaboración propia.

De los datos recolectados en campo se obtuvo una velocidad máxima de 55 km/h en un espaciamiento de 327.8 metros entre los reductores 7 y 8, y considerando los cien recorridos se obtuvo la media de la velocidad máxima para los espaciamientos entre los reductores, las cuales se muestran en la Tabla 13.

Tabla 15 Velocidad promedio sobre los reductores circulares y trapezoidales a diferentes espaciamientos.

Número de reductor	Altura (cm)	Ancho (m)	Espaciamiento (m)	Velocidad promedio sobre el reductor (km/h)
	x_1	x_2	x_3	y
REDUCTORES CIRCULARES				
3	10	1.25	182.1	19.79
5	10	1.2	178.7	14.29
9	15	1.6	221.0	17.9
11	11	1.1	327.8	11.65
13	9	1.25	68.2	11.50
REDUCTORES TRAPEZOIDALES				
4	16	6.2	76	16.29
6	16	6.2	109.8	15.98
10	16	9.1	32	20.41
15	17	6.4	266.8	15.51

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos presentados en las Tablas 14 y 15 se obtuvieron modelos de regresión lineal múltiple que auxiliaran en la predicción de la velocidad que se tendrá sobre un reductor de velocidad dependiendo de su geometría y dimensiones, en las cuales se propone la velocidad máxima que se quiera entre reductores.

Cabe mencionar que en las Tablas 14 y 15 se muestra un resumen de los datos recolectados, presentándose en velocidades promedio, y los modelos fueron realizados con todas las velocidades obtenidas de los 100 recorridos con el vehículo instrumentado con GPS.

Tabla 16 Modelos estimados para los reductores circulares.

	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3			Modelo 4		
Término	Coef.		Valor T	Coef.		Valor T	Coef.		Valor T	Coef.		Valor T
Constante	-62.060	***	-9.47	-55.71	***	-8.51	-135.21	***	-30.25	-136.11	***	-30.31
	(6.55)			(6.55)			(4.470)			(4.49)		
Altura (cm)	-10.040	***	-9.59	-9.83	***	-8.64	-22.962	***	-30.67	-25.11	***	-30.77
	(1.050)			(1.14)			(0.749)			(0.816)		
Ancho (cm)	1.118	***	9.42				2.6044	***	30.98			
	(0.119)						(0.084)					
Semi-perímetro (cm)				1.022	***	8.4				2.6872	***	31.04
				(0.122)						(0.0866)		
Espaciamiento (m)	0.091	***	5.6	0.074	***	4.54	0.3228	***	27.46	0.3241	***	27.52
	(0.016)			(0.016)			(0.012)			(0.0118)		
Vel. Máxima (km/h)							0.1019	***	3.29	0.1051	***	3.41
							(0.031)			(0.0309)		
Velocidad media espacial (km/h)	0.875	***	16.81	0.9323	***	17.67						
	(0.052)			(0.0528)								
S =4.83793	R-Sq=	R-Sq(adj)=	S	R-Sq=	R-Sq(adj)=	S	R-Sq=	R-Sq(adj)=	S	R-Sq=	R-Sq(adj)=	S
	54.55%	54.12%	=4.75593	55.19%	54.77%	=2.49922	80.48%	80.21%	=2.49597	80.53%	80.26%	

Nota: ***, **, *==>Significación al nivel 1%,5%,10%

En la Tabla 16, se observa que, en todos los modelos estimados para los reductores de geometría circular, la altura es la variable clave en la disminución de la velocidad de los vehículos, conjuntamente con la adecuación de un ancho que no afecte la eficiencia del reductor en disminuir la velocidad. Esta variable presenta signo positivo, lo que nos indica que a mayor ancho hay un aumento en la velocidad de los vehículos al pasar por este tipo de reductores (circulares), similar a lo que refleja la variable semi-perímetro, a mayor longitud induce un aumento en la velocidad. Respecto a las variables de espaciamiento y velocidad máxima, ambas presentan signo positivo, y muestran una relación de que a mayor espaciamiento es mayor la velocidad máxima (ver Figura 54), reflejando en los modelos estimados que a mayor espaciamiento y mayor velocidad se obtendrá una velocidad mayor sobre un reductor circular.

En el modelo dos, la magnitud de los coeficientes de espaciamiento y velocidad media espacial del vehículo son de 0.074 y 0.9323 respectivamente. Dichos coeficientes reflejan que el espaciamiento es el parámetro con menor peso con respecto a los demás modelos, mientras que la velocidad media espacial muestra mayor peso en el modelo dos respecto al resto de modelos que incluyen como parámetro la velocidad máxima. Lo anterior se puede interpretar en que la velocidad media espacial es un parámetro de relación del tiempo con la distancia entre espaciamientos, por ello, en dicho modelo el coeficiente de espaciamiento es casi insignificante, en comparación con los coeficientes que se tiene para este parámetro en el modelo tres y cuatro. Entonces, el hecho de que los coeficientes de espaciamiento en el modelo uno y dos no reflejen un peso considerable, no significa que no repercutan en la velocidad que se tendrá sobre el reductor circular, ya que la velocidad media espacial y velocidad máxima está relacionada con el espaciamiento entre reductores. De los modelos de la Tabla 16, el modelo cuatro es el que presenta la menor desviación estándar y el mayor R-Sq considerándolo así el modelo que mejor predice la variable respuesta (velocidad sobre el reductor). Los signos de los coeficientes son consistentes con el objetivo del modelo. Por lo anterior, el modelo muestra que, a mayor altura del reductor, éste disminuye más la velocidad del vehículo que pasará sobre el reductor circular, y mayor longitud del

semi - perímetro en este tipo de geometría, disminuye su eficiencia en la reducción de la velocidad.

Cabe mencionar que para el modelo de los reductores trapezoidales los parámetros utilizados para la altura de dicho dispositivo recomendado es de 15 a 18 cm y con una relación de pendiente de 9 a 14%, esto con el fin de garantizar una disminución de velocidad del 55 al 75% entre espaciamentos, para el caso de los reductores se recomienda utilizar una altura de 11 a 15 cm con anchos de 125 a 140 cm, cabe señalar que la altura y ancho utilizados dependerá significativamente del espaciamento entre este tipo de reductores, además sugerimos utilizar este tipo de dispositivos para espaciamentos no menores a 100cm, por lo expuesto.

Tabla 17 Modelos estimados para los reductores trapezoidales.

Término	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5		Modelo 6							
	Coef.	Valor T	Coef.	Valor T	Coef.	Valor T	Coef.	Valor T	Coef.	Valor T	Coef.	Valor T						
Constante	96.10 (10.8)	***	8.92 (9.15)	91.40 (9.15)	***	9.98	791.00 (124)	***	6.40	71.03 (9.99)	***	7.11	447.00 (141)	***	3.18	139.60 (10.2)	***	13.62
Altura (cm)	-6.32 (0.666)	***	-9.49 (0.59)	-6.066 (0.59)	***	-10.28	-46.87 (7.54)	***	-6.21	-4.788 (0.645)	***	-7.42	-25.68 (8.58)	***	-2.99	-6.898 (0.652)	***	-10.58
Ancho (cm)	0.03036 (0.008)	***	3.75 (0.0012)	0.02376 (0.0012)	***	20.69				0.05213 (0.0087)	***	5.99						
Ancho menor (cm)	-0.0115 (0.014)	*	-0.82							-0.0422 (0.0145)	***	-2.91						
Espaciamiento (m)							0.2193 (0.0415)	***	5.28				0.1035 (0.0472)	**	2.19			
Vel. Máxima (km/h)										0.1334 (0.0295)	***	4.52	0.2569 (0.0359)	***	7.15	0.2669 (0.0359)	***	7.45
Pendiente %							-3.378 (0.0415)	***	-7.69				-2.569 (0.495)	***	-5.19	-1.499 (0.0843)	***	-17.79
Velocidad media espacial (km/h)	0.2592 (0.0335)	***	7.74 (0.0329)	0.2544 (0.0329)	***	7.72	0.2592 (0.0335)	***	7.74									
S=2.404	R-Sq=69.28%	R-Sq(adj)=68.85%	S=2.403	R-Sq=69.21%	R-Sq(adj)=68.35%	S=2.404	R-Sq=69.28%	R-Sq(adj)=68.85%	S=2.278	R-Sq=71.99%	R-Sq(adj)=71.57%	S=2.771	R-Sq=64.07%	R-Sq(adj)=63.57%	S=2.789	R-Sq=63.47%	R-Sq(adj)=63.1%	

Nota: ***, **, * ==> Significación al nivel 1%, 5%, 10%

A partir de la Tabla 17, de los seis modelos estimados, el valor y signo de sus coeficientes reflejan que a mayor altura y pendiente en el reductor de velocidad aumenta su eficiencia en la disminución de la velocidad, mientras que los coeficientes de ancho, espaciamiento y velocidad máxima muestran signo positivo,

lo cual nos indica que, entre mayor sea el valor de dichas variables, la velocidad sobre el reductor trapezoidal será mayor. A partir de los modelos de la Tabla 16, se determina que el modelo cuatro es el que presenta la menor desviación estándar y el mayor R-Sq considerándolo así el modelo de mejor predicción de la variable respuesta (velocidad sobre el reductor). Los signos de los coeficientes son consistentes con el objetivo del modelo, y reflejan que, a mayor altura del reductor, éste será más eficiente en la disminución de la velocidad del vehículo, al igual que la variable ancho menor, entre mayor sea su longitud se disminuye la velocidad de los vehículos. Contrario a lo anterior, a mayor ancho disminuye su eficiencia en la disminución de la velocidad. Entonces son de importancia las dos últimas variables, ya que el ancho menor no puede ser igual o mayor al ancho, así mismo notar que el peso absoluto del coeficiente del ancho es mayor al peso del coeficiente del ancho menor. Cabe señalar que en este modelo despreció la variable de espaciamento, y se incorpora la variable de velocidad máxima, la cual muestra signo positivo, indicándonos que a mayor velocidad entre espaciamentos habrá un aumento en la velocidad sobre el reductor trapezoidal, además con esta variable es posible estimar el espaciamento.

De los dos tipos de reductores analizados se puede apreciar que los circulares son más eficientes en la disminución de la velocidad de los vehículos, mientras que el espaciamento como variable en el modelo no influye significativamente en la velocidad en la que los vehículos pasarán por un reductor. La altura del dispositivo, es la variable de mayor influencia en la disminución de la velocidad de los vehículos.

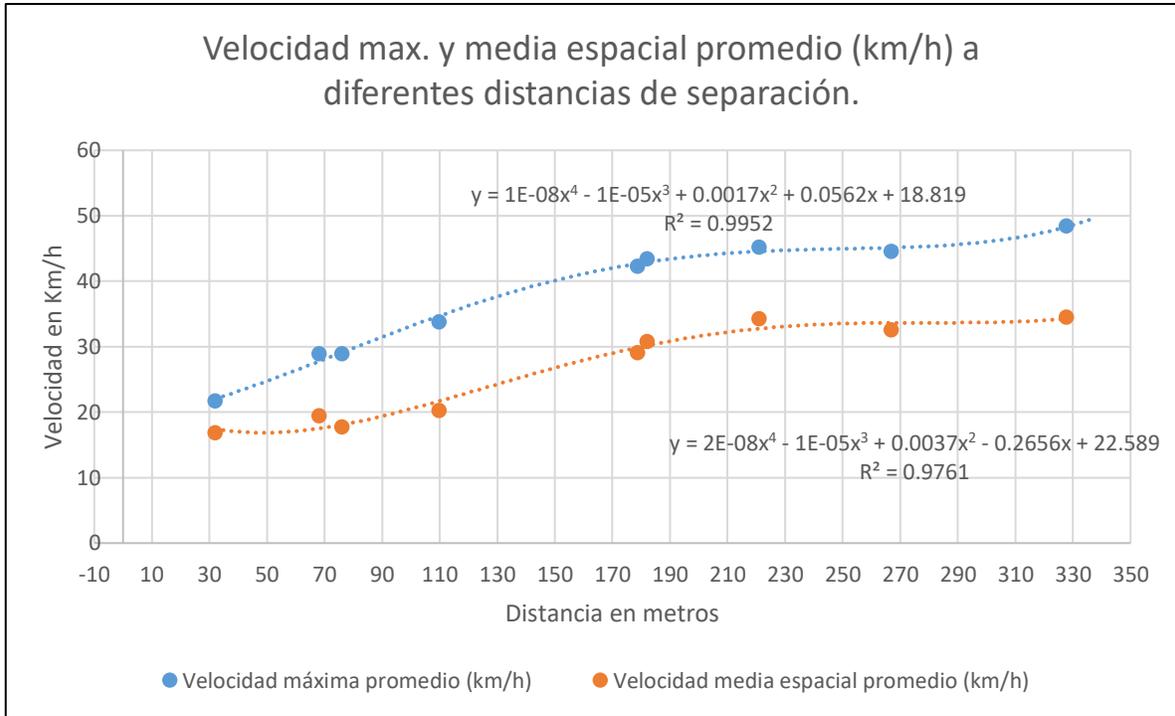


Figura 54 Gráfica de velocidad máxima y media espacial.

En cuanto a la velocidad máxima y media espacial en los espaciamientos entre reductores de velocidad analizados, se tiene un comportamiento polinómico de cuarto orden, como se puede apreciar en la Figura 54. Es decir que ambas velocidades se comportan de manera similar, en donde a mayor espaciamiento hay un aumento en la velocidad máxima y media espacial.

En cuanto a la predicción del espaciamiento entre reductores ya sean circulares o trapezoidales, se realizaron gráficas de línea ajustada, en las cuales se tiene como variable predictoría a la velocidad media espacial y velocidad máxima entre dichos dispositivos, para los cuales se obtuvo la información que se presenta de la Figura 55 a la 60.

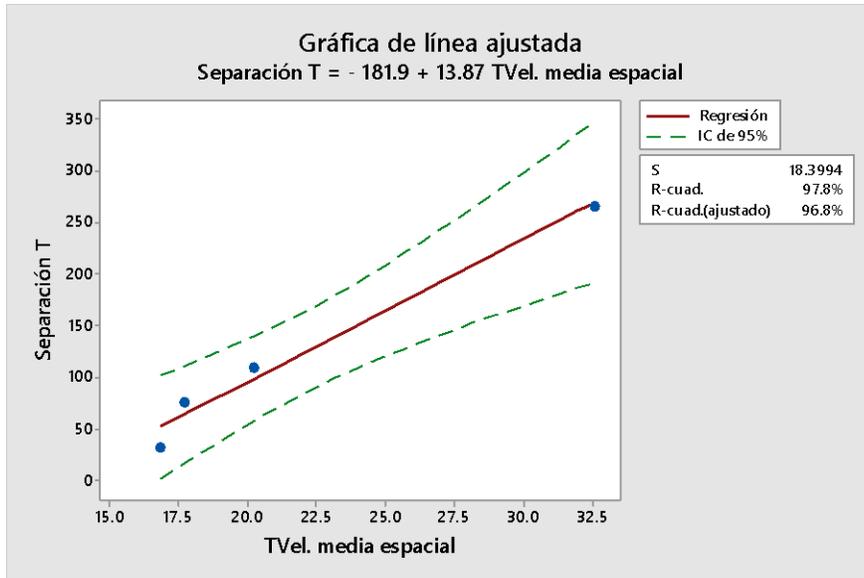


Figura 55 Ecuación de regresión ajustada para la predicción del espaciamiento entre reductores trapezoidales dependiente de la velocidad media espacial.

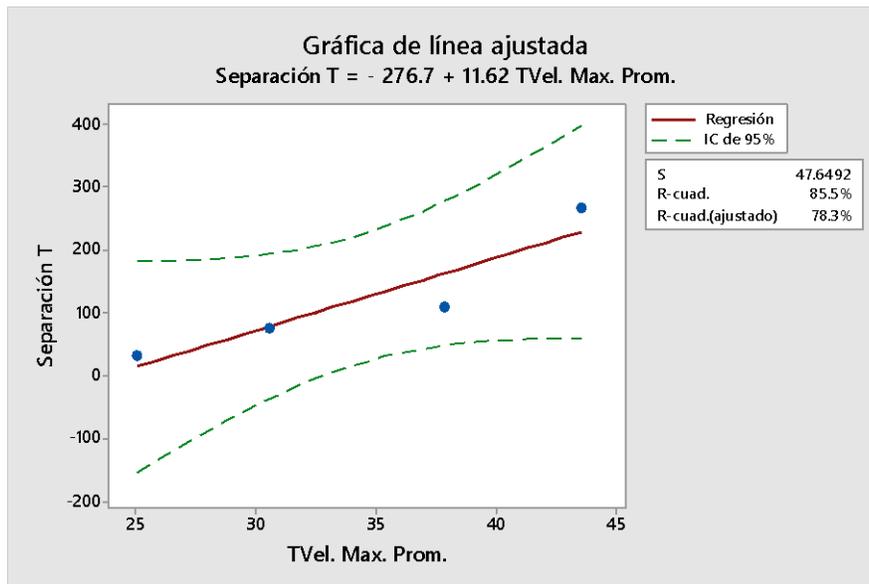


Figura 56 Ecuación de regresión ajustada para la predicción del espaciamiento entre reductores trapezoidales dependiente de la velocidad máxima promedio.

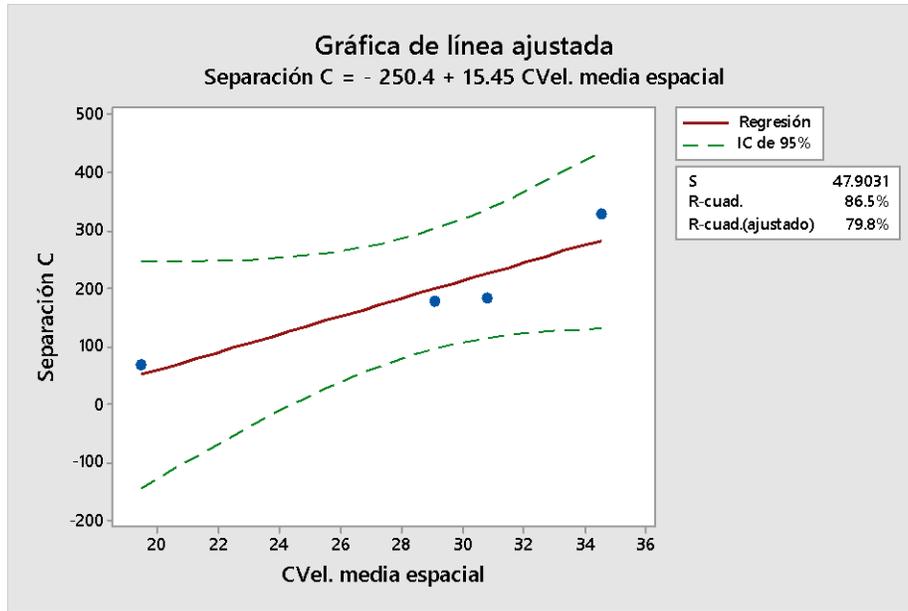


Figura 57 Ecuación de regresión ajustada para la predicción del espaciamiento entre reductores circulares dependiente de la velocidad media espacial.

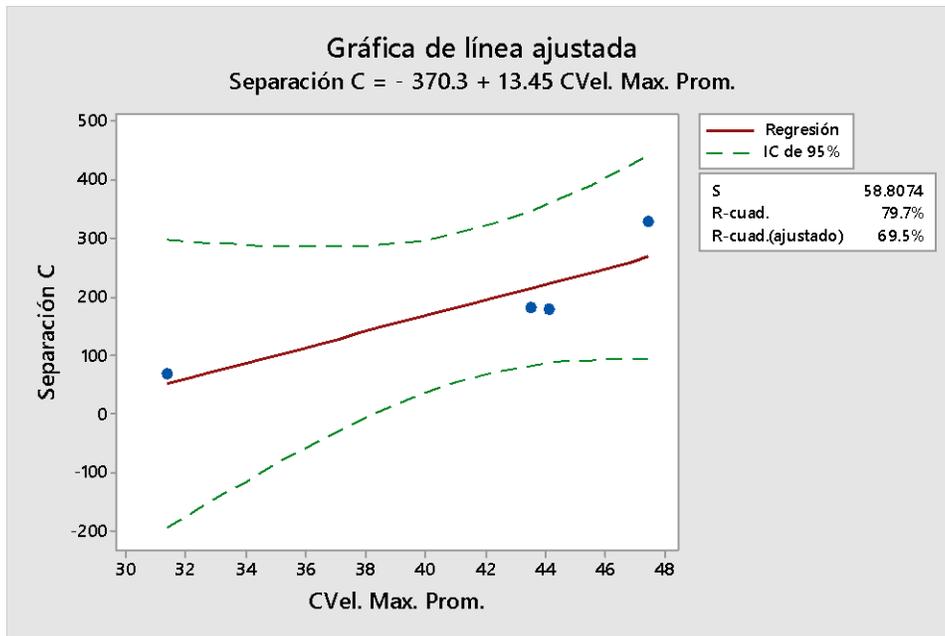


Figura 58 Ecuación de regresión ajustada para la predicción del espaciamiento entre reductores circulares dependiente de la velocidad máxima promedio.

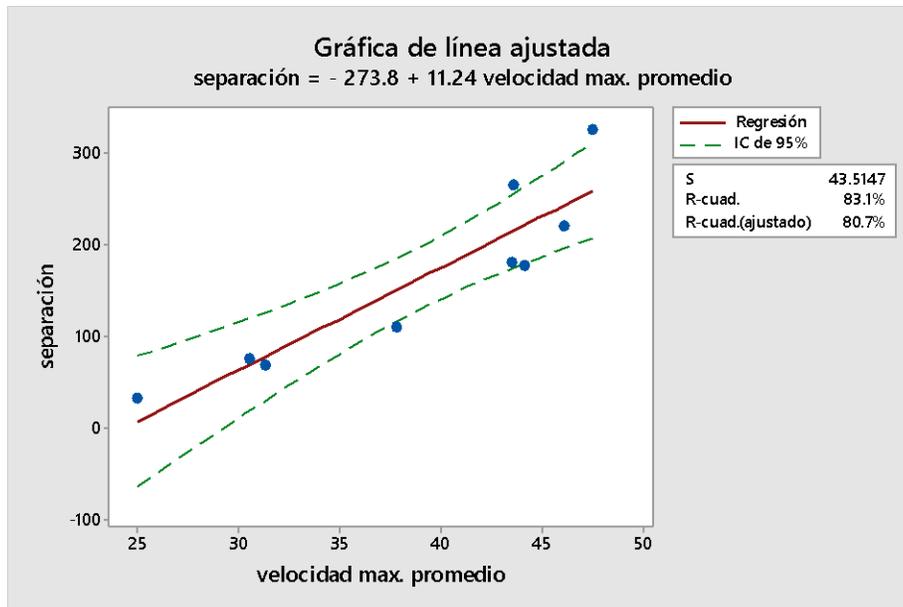


Figura 59 Ecuación de regresión ajustada para la predicción del espaciamiento entre reductores circulares y trapezoidales dependiente de la velocidad máxima promedio.

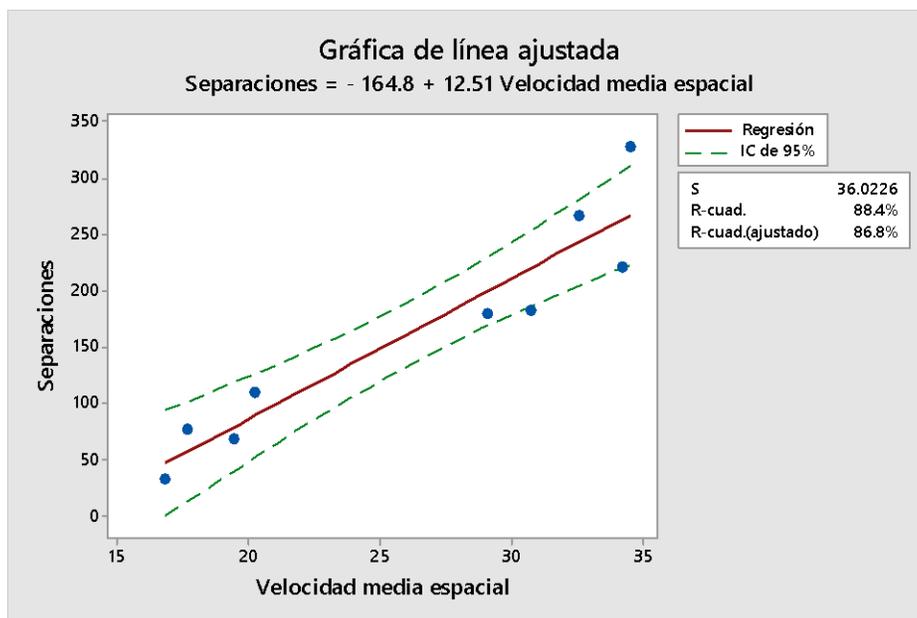


Figura 60 Ecuación de regresión ajustada para la predicción del espaciamiento entre reductores circulares y trapezoidales dependiente de la velocidad media espacial.

Los espaciamientos obtenidos con las ecuaciones para reductoras circulares o trapezoidales son muy similares, notándose que a velocidades menores a 50 km/h los espaciamientos entre reductores trapezoidales son ligeramente más grandes en comparación con los espaciamientos entre circulares y al contrario de lo anterior a velocidades mayores a 50 km/h los espaciamientos entre reductoras circulares son ligeramente mayores a los espaciamientos entre reductores trapezoidales.

4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CON RESPECTO A LAS EMISIONES CONTAMINANTES.

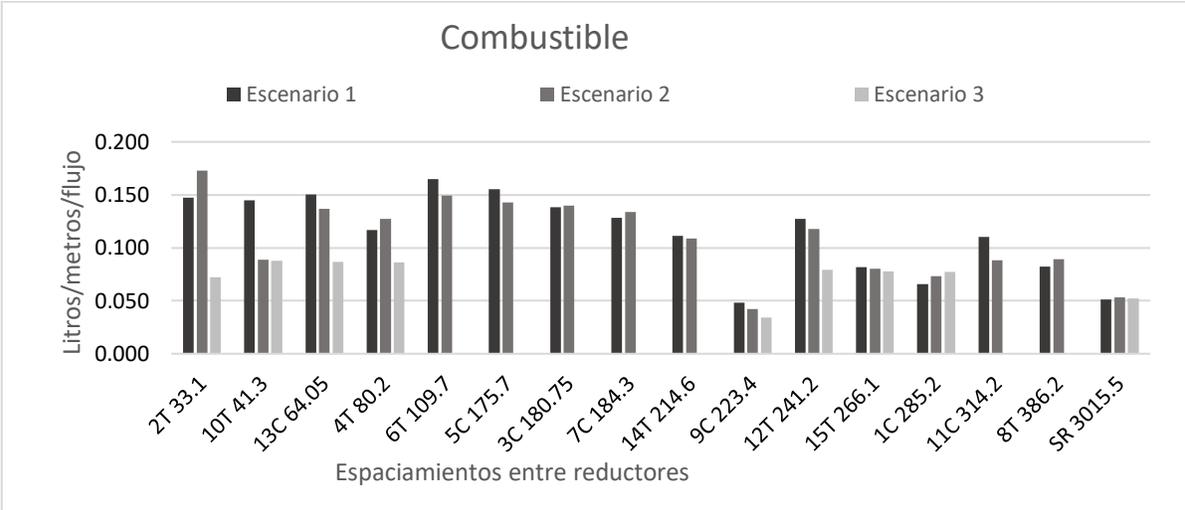


Figura 61 Gráfica de comparación de consumo de combustible de las tres simulaciones.

De las tres simulaciones de tráfico, en la Figura 61 se muestra que el consumo de combustible. En el Escenario 1 y 2 resulta muy similar el consumo, y al compararlo con el Escenario 3 se obtiene una disminución en el gasto de combustible del orden del 17%. Se observa que a mayor espaciamiento hay una reducción de gasto de combustible, tal como se presenta en el noveno reductor circular (9C), mostrándose una disminución significativa en el consumo, lo anterior

se debe a que las velocidades alcanzadas en campo y posteriormente simuladas son del orden de los 50km/h, además, corriente arriba del noveno reductor no existe ningún otro reductor de velocidad, por lo tanto, el gasto de gasolina se debe a un tramo con velocidad constante y a una sección de desaceleración, añadiendo que para éste reductor no hay desaceleración abrupta, así la velocidad promedio sobre dicho reductor es de 17.9 km/h. Por lo anterior, destacamos que se observó que en los espaciamientos con reductores trapezoidales se presenta una disminución en el gasto de combustible, debido a que no hay una desaceleración brusca a la hora de llegar a dicho tipo de dispositivo (sección de desaceleración es menor a la sección de desaceleración para un reductor circular). Por lo anterior, para la simulación propuesta se opta por emplear dicho tipo de geometría en los reductores de velocidad, así como un espaciamiento que permita alcanzar los 50 km/h, como se menciona en la metodología.

En una sección de la vialidad en estudio no hay instalados reductores de velocidad y es denominada en la Figura 61 como “SR” (sin reductores). En ella se aprecia como el consumo de combustible en las tres simulaciones son similares, debido a que la velocidad en dicha sección se define a partir de la velocidad de recorrido que se obtuvo en campo (75 km/h). La información sobre el consumo de combustible fue obtenido de Ferrerira (1982) y del DTRU (1994).

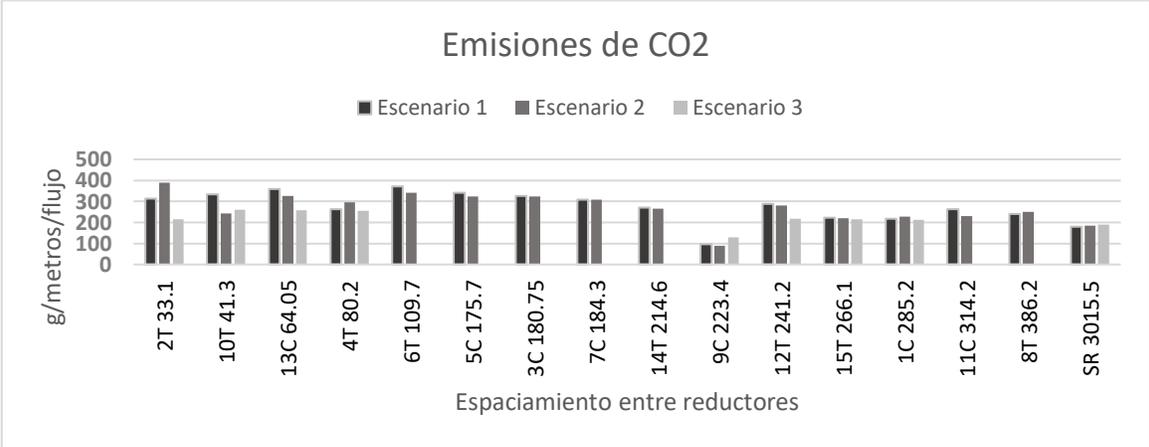


Figura 62 Gráfica de comparación de emisiones de CO₂ cuantificadas de las tres simulaciones.

Respecto a las emisiones de CO₂ cuantificadas a través de las simulaciones, se puede apreciar en la Figura 62 que hay una disminución considerable de emisiones de CO₂ en el Escenario 3. También se observa en el reductor 11 como existe un aumento en emisiones de CO₂ al igual que un aumento de gasto de combustible como se muestra en la Figura 61, se debe a que las velocidades promedio sobre este reductor son de 9.46 km/h como dato utilizado en el Escenario 1 y una velocidad promedio de 11.65 km/h como dato empleado para el Escenario 2, notando que al inducirse una desaceleración considerable para cruzar por dicho reductor las emisiones y gasto de combustible se incrementan, caso similar con el reductor 12 en el que se tienen velocidades promedio sobre el reductor menores a 10.58 km/h para las dos simulaciones (Escenario 1 y 2). Así mismo nota un aumento en el reductor 8 pero en este caso se debe a que la distancia de desaceleración es más reducida (66.4m) la cual es la distancia promedio de desaceleración obtenida de los datos recabados en campo. Dicha distancia es la utilizada para disminuir la velocidad máxima promedio en dicho espaciamiento, la cual es de 47km/h, a una velocidad de 33km/h en el Escenario 1 y a 20.52 km/h en el Escenario 2. Como se aprecia en la Figura 61 y 62 se incrementan ligeramente los valores en el Escenario 2, entendiéndose que hay una mayor desaceleración en la simulación de este espaciamiento, ya que la velocidad promedio sobre el reductor para el Escenario 2 es de 20.52 km/h, es decir, 12 km/h menos que el valor empleado en la simulación del Escenario 1. Los parámetros empleados en la cuantificación de las emisiones son los reportados en (TSS, 2013).

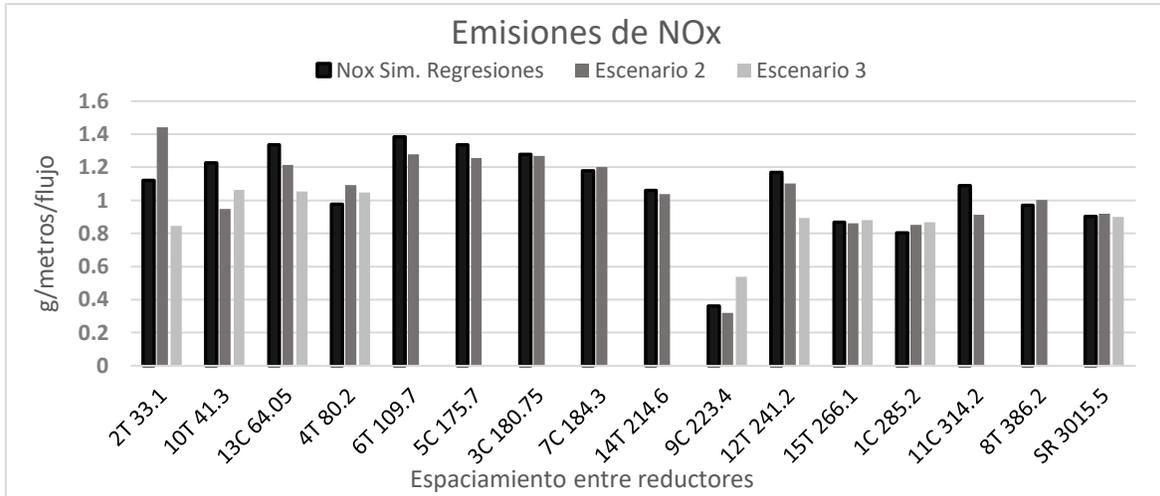


Figura 63 Gráfica de comparación de las emisiones de NOx de las tres simulaciones.

En las Figuras 63, 64 y 65 se observa que las cuantificaciones de los óxidos de nitrógeno, material particulado y de compuestos orgánicos volátiles son muy similares y están ligados con las velocidades alcanzadas por los vehículos en cada espaciamiento, aceleración, desaceleración y tipo de reductor. En las mismas Figuras, se muestra que en la simulación del Escenario 3 (la cual corresponde a la simulación con los espaciamientos propuestos), en el tramo sin reductores (SR), se percibe un leve incremento en los parámetros correspondientes en cada Figura.

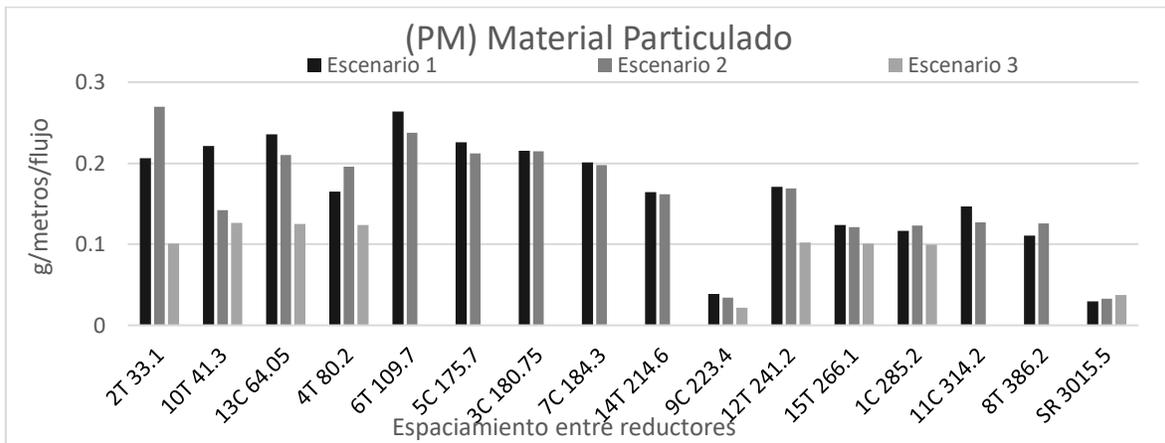


Figura 64 Gráfica de comparación de las emisiones de material particulado de las tres simulaciones.

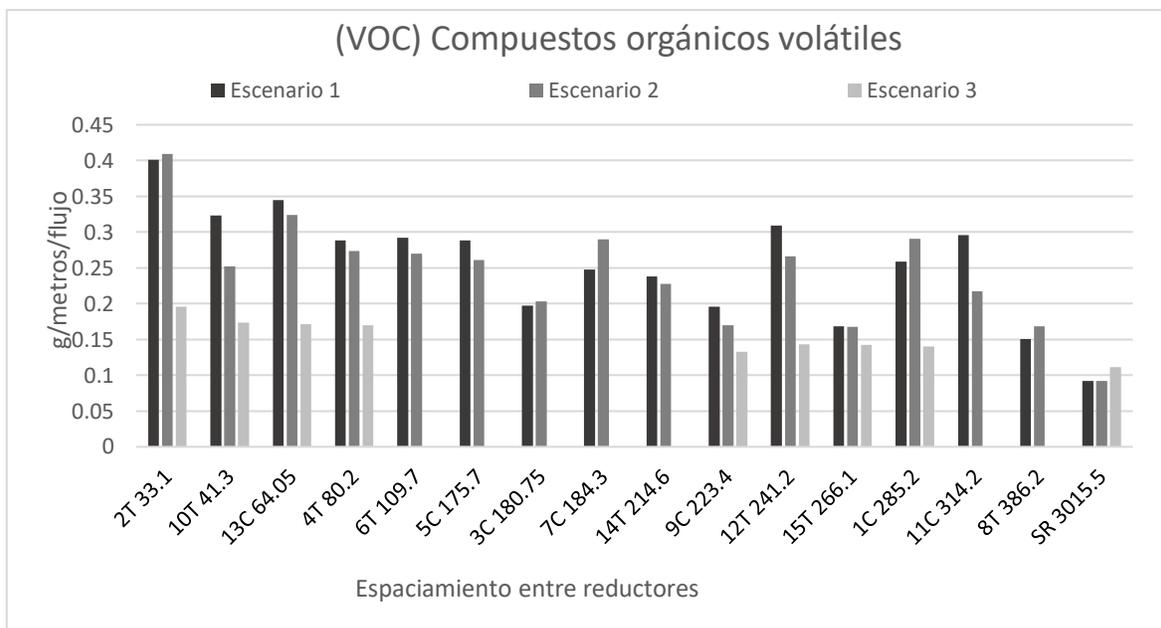


Figura 65 Gráfica de comparación de las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles de las tres simulaciones.

4.4 DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA MÍNIMA ENTRE REDUCTORES DE VELOCIDAD, QUE DISMINUYA EL GASTO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES CONTAMINANTES OCASIONADAS POR LOS VEHÍCULOS.

A partir de las simulaciones, se observó que en los espaciamientos en donde se presentó una velocidad máxima promedio de 48.42 km/h entre los reductores había una reducción significativa de consumo de combustible y de emisiones, por ello es que se prosiguió a estimar el espaciamiento en el que se alcanzara una velocidad máxima de 50km/h. Además de lo anterior, se observó que entre menor fuera la aceleración o desaceleración entre los reductores había una disminución en el gasto de combustible y en las emisiones contaminantes, por esta razón se optó por emplear reductores de tipo trapezoidal notándose que las desaceleraciones presentadas en los espaciamientos con este tipo de reductor no se presentaban abruptamente. Así, se opta por usar las características del reductor 15 el cual tiene un ancho de 6.4 metros y 17 cm de altura y una velocidad promedio sobre dicho reductor de 15.51 km/h, velocidad obtenida de los datos recolectados,

obteniendo un espaciamiento de 389 metros con un reductor de 6.4 metros de largo, es decir 395.4 metros de sección de análisis para la cuantificación del consumo de combustible y de emisiones contaminantes. El espaciamiento propuesto se considera la distancia de aceleración necesaria para obtener una velocidad máxima de 50 km/h (115 m) y la distancia necesaria para desacelerar y cruzar el reductor propuesto (68 m) a la velocidad promedio de 15.51 km/h.

El resultado de lo anterior fue una sección de aceleración de 115 metros, una sección intermedia de 206 metros en la que los vehículos mantienen una velocidad constante y por último la sección de desaceleración de 68 metros entre los reductores trapezoidales. Las distancias de las diferentes secciones están basadas en las secciones encontradas en los espaciamientos entre el reductor 7 y 8 y entre los reductores 10 y 11, así mismo la distancia de desaceleración fue en base al promedio de la distancia de desaceleración encontrada para el reductor 15.

De las secciones propuestas para la simulación en AIMSUN, se obtuvo una velocidad máxima entre los reductores trapezoidales de 52 km/h, y una velocidad promedio sobre los reductores de 15.4831 km/h.

5 CONCLUSIONES

La investigación demuestra la hipótesis al cuantificar las externalidades polucionantes inducidas por los reductores de velocidad mediante la microsimulación de tráfico, así como también la obtención del espaciamiento mínimo entre reductores. Del análisis de los datos obtenidos en campo, se notó que la eficiencia de los reductores de velocidad depende de las dimensiones que estos dispositivos tengan en las dos diferentes geometrías analizadas (circulares y trapezoidales). Se observa que los reductores de geometría circular alcanzan a disminuir la velocidad de los vehículos generalmente en un 50% con respecto de la velocidad máxima entre dichos dispositivos, notándose que este tipo de geometría analizada no poseen alturas mayores a los 15 cm, ni anchos mayores a 1.6 m para lograr su objetivo. Su eficacia depende así del ancho que presente, siendo que a mayor ancho su eficiencia disminuye, tal y como se puede observar en la Tabla 5, observando también que la velocidad de los vehículos al pasar sobre este tipo de dispositivos es más variable en comparación con los reductores de velocidad de geometría trapezoidal.

Respecto a los dispositivos del tipo trapezoidal, se determinó que el ancho de este dispositivo tiene una relación significativa con respecto a su eficiencia en la reducción de la velocidad, lo que se puede destacar de este tipo de geometría es que contrario a los dispositivos circulares, estos presentan menor variabilidad en la velocidad de los vehículos al momento de cruzarlos (ver Figura 53).

La instalación de cualquier tipo de reductor dependerá del motivo de su colocación, ya que no sólo se trata de usar el reductor más eficiente en la disminución de la velocidad con ciertas dimensiones, si no también dependerá del lugar de instalación. Así las variables para determinar su instalación deben considerar, qué reducción de velocidad se desea; si se conjugará con un paso peatonal o no, qué velocidades máximas y mínimas se esperan entre los reductores (y con ello proponer espaciamientos adecuados). Empleando las dos ecuaciones

estimadas es posible caracterizar la geometría del reductor para tomar una mejor decisión de acuerdo a las necesidades que se requieran en una vialidad.

Los resultados obtenidos ayudarán a establecer normas en la utilización de los reductores de velocidad, hay que tener en cuenta que el conocimiento de estos parámetros, no sólo ayudará a la toma de decisión de su colocación, también tendrá un impacto social y ambiental, puesto que, en este estudio se buscó la reducción de las emisiones contaminantes, las cuáles, el parque vehicular es una de las fuentes principales en la producción de bióxido de carbono, que contribuye al calentamiento por el efecto de invernadero y a la reducción de la capa de ozono.

Como líneas de investigación futura, se propone analizar la relación de las siniestralidades entre el peatón y los vehículos, en casos ex - ante, ex – post, con y sin el uso de reductores de velocidad. Además, se propone hacer un análisis de las incomodidades que este pueda generar al conductor, y la contaminación acústica inducida por la instalación de dichos dispositivos, así mismo se plantea investigar cual es el impacto que tienen los reductores de velocidad a la salud de las personas y comparar si la educación vial y respeto a los señalamientos tiene mayor impacto en la reducción de velocidad con respecto a los reductores de velocidad.

6 BIBLIOGRAFÍA

Abaza, O. A.; Hussein, Z. S. y Malto, I. S. (2012) Optimization of Speed Control Hump Spacing, ITE journal, agosto 2012

Allen, C. D., y Walsh, L. B., "A Bumpy Road Ahead?," Traffic Engineering, Oct., 1975, pp. 11-14.

Allen, C. D., y Walsh, L. B., "A Study of Speed Bumps," Department of Public Works, The City of San Jose, Calif., Oct., 1975.

Chadda, H. S. y Cross, Seward E. (1985) SPEED (ROAD) BUMPS: ISSUES AND OPINIONS, J. Transp. Eng. 111:410-418.

Ewing, R. (1999) Traffic Calming State of Practice. Prepared by the Institute of Transportation Engineers. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.

Ferrerira , L.J.A. (1982), Car Fuel Consumption in Urban Traffic: The Results of a Survey in Leeds using Instrumented Vehicles. ITS Working Paper N° 162. Institute for Transportation Studies. University of Leeds.

Galán Auquilla, A. F. y Vélez Malo, J. S. (2013). *Estudio de los reductores de velocidad en las zonas urbanas y rurales de la ciudad de cuenca, provincia del Azuay*, Monografía, Universidad de Cuenca, Ecuador, 67 p.

Grundy, C.; Steinbach, R.; Edwards, P.; Green, J.; Armstrong, B. y Wilkinson, P. (2009). Effect of 20 mph traffic speed zones on road injuries in London, 1986-2006:

controlled interrupted time series analysis, *British Medical Journal*, 339. b4469. ISSN 1468-5833.

Hallmark, S.; Knapp, K.; Thomas, G. y Smith, D. (2002) Temporary Speed Hump Impact Evaluation, Center for Transportation Research and Education CTRE Project 00-73, Office of Traffic and Safety, Iowa Department of Transportation

Yu, H.; Liu, P.; Huang, J. y Zhang X. (2011) *Developing the Simulation Module of Traffic Operations in Vicinity of Speed Bumps on Highways in VISSIM*. ICCTP 2011: pp. 2375-2384; doi: 10.1061/41186(421)237

Huang, J.; Liu, P.; Zhang, X.; Wan, J. y Li, Z. (2011) Evaluating the Speed Reduction Effectiveness of Speed Bump on Local Streets, Section: Traffic Safety and Emergency Management, pp. 2348-2357, (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/41186\(421\)234](http://dx.doi.org/10.1061/41186(421)234))

Johansson, C.; Rosander, P. y Leden, L. (2011) Distance between speed humps and pedestrian crossings: Does it matter?, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 43, Issue 5, September 2011, Pages 1846–1851

Michel, A. (2004). Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions– Part A: The ARTEMIS European driving cycles, <http://www.inrets.fr/fileadmin/ur/lte/artemis/road3/method31/Artemis_cycles_report_LTE0411.pdf> (Ene. 29, 2015).

Mar Juárez, E. (2001). Tendencias y perspectivas del consumo de gasolina y emisiones de gases contaminantes de los automóviles, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis doctoral, D.F., México, 212 p.

Marques Coelho, M. I. C.; Lopes Farias, T. y Michael Roupail, N. (2005). A methodology for modelling and measuring traffic and emission performance of speed control traffic signals, *Journal of Atmospheric Environment*, 39 (13), 2367–2376.

Menchaca Torre, H. L. y Mendoza Domínguez, A. (2013). Desempeño de un vehículo híbrido y su contraparte de combustión interna bajo condiciones de manejo de una ciudad mexicana, *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29 (2) ,219-230, ISSN 0188-4999.

Massimiliano, P. (2002) *Speed Bumps May Induce Improper Drivers' Behavior: Case Study in Italy*, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 128, No. 5, September/October 2002, pp. 472-478, (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:5\(472\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:5(472)))

Molan, A. M. y Kordani, A. A. (2014). "Optimization of Speed Hump Profiles Based on Vehicle Dynamic Performance Modeling." *J. Transp. Eng.*, 140(8), 04014035

Panis, L. I.; Broekx, S. y Liu, R. (2006). "Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits." *Sci. Total Environ.*, 371(1–3), 270–285.

Pérez Sesma, A. (2010). Programación lineal aplicada al control de emisiones contaminantes, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría, D.F., México, 73 p.

P.G.Gipps, (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Board, Vol. 15-B, pp. 105-111.

P.G.Gipps, (1986). MULTSIM: A Model for Simulating Vehicular Traffic on Multi-Lane Arterial Roads. Mathematics and Computers in Simulation, 28. 291-295.

Quistberg, A. y Miranda, J. J. (2010). Reduciendo el trauma y la mortalidad asociada a los accidentes de tránsito en los peatones en el Perú: intervenciones que pueden funcionar, *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 27 (2), 248-54. ISSN 1726-4634.

[QUA92] QUARTET Deliverable N°2 (1992), Assessment of current Tools for Environmental Assessment in QUARTET, DRIVE II Project V2018: QUARTET, September 1992.

Swanson, L.; John Abraham, C.; Smith, M.; Smith, M. y Tripi, E. (1998) Speed Control In Residential Areas, OHSP 701 (2/98)

Tapia Granados, J. A. (1998). La reducción del tráfico de automóviles: una política urgente de promoción de la salud, *Revista Panamericana de Salud Pública*, 3(3), 137-151, ISSN 1020-4989

Torné Santos, J. M. (2013). *Active Traffic Management In Metropolitan Freeways: Modeling And Assessing Dynamic Speed Limit Strategies*, Tesis doctoral, Universidad Politecnica De Catalunya, Barcelona, 137.

Transportation Research Board (2000). *Highway capacity manual*, The National Academies, USA, 1207 p.

Transport Simulation Systems (2004). *Aimsun user manual*, Transport Simulation Systems, España.

UK DoT Department of Transport, (1994), New Car Fuel Consumption: the official figures December 1994.

Yu, G., Liu, Y., Wang, Y., Yang, C., y Li, B. (2013). Estimation of Travel Time Based on Vehicle Platoons on Saturated Urban Arterial Roads. *Journal Highway Transportation. Highway and Transportation Research and Development*, 7(4), 78–86.

Yuan, L. y Han, M. (2012) *Study of geometric desing of rubber speed control-hump*. CICTP 2012: pp. 2030-2236. Doi: 10.1061/9780784412442.226

Zainuddin, N. I.; Adnan, M. A.; y Diah, J. Md (2014). "Optimization of Speed Hump Geometric Design: Case Study on Residential Streets in Malaysia." *J. Transp. Eng.*, 140(3), 05013002.

Zuñiga Alarcón, V. I. (2010). *Uso de herramientas de microsimulación para la definición de estrategias de control de tránsito para la ciudad de Santiago*, Memoria de licenciatura, Universidad de Chile, Chile, 111.

7 ANEXOS